

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curso de Engenharia Eletrônica

Albert Kirchner

Desenvolvimento de uma *Source Measure Unit*
(SMU) de dois canais para medidas elétricas e
eletroquímicas

Toledo
2025

Albert Kirchner

**Desenvolvimento de uma *Source Measure Unit*
(SMU) de dois canais para medidas elétricas e
eletroquímicas**

**Development of a two-channel Source Measure Unit (SMU) for
electrical and electrochemical measurements**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à disciplina de Trabalho de Con-
clusão de Curso 1 do Curso de Engenharia
Eletrônica da Universidade Tecnológica Fe-
deral do Paraná - UTFPR Campus Toledo,
como requisito parcial para a obtenção do tí-
tulo de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador(a) Dr. Douglas José Coutinho

Toledo
2025

RESUMO

O avanço da ciéncia e da tecnologia depende da disponibilidade de equipamentos analíticos precisos e acessíveis, porém instrumentos comerciais como *Source Measure Units* (SMUs) e potencióstatos possuem custos elevados, limitando seu acesso a laboratórios acadêmicos e centros de pesquisa emergentes. Embora soluções de baixo custo tenham sido propostas na recente literatura, essas soluções são limitadas por serem de canal único e não possuírem interfaces gráficas embarcadas, restringindo sua aplicabilidade em experimentos mais complexos. Diante desse cenário, este trabalho propôs o desenvolvimento de uma SMU de dois canais para medições elétricas e eletroquímicas, capaz de realizar técnicas voltamétricas e galvanostáticas, com o objetivo de oferecer uma alternativa acessível para a caracterização de dispositivos eletrônicos e células eletroquímicas. O hardware do equipamento foi estruturado em cinco etapas principais: alimentação, fonte de tensão, fonte de corrente, amperímetro e voltímetro, cada uma com componentes dedicados por canal. A alimentação utilizou transformadores, filtros e reguladores de tensão; a fonte de tensão empregou um conversor digital-analógico DAC8760 e um amplificador de potência; a fonte de corrente foi baseada em um amplificador diferencial; e o amperímetro utilizou um amplificador de transimpedância em conjunto com um conversor analógico-digital ADS1262. O voltímetro, por sua vez, foi composto por um amplificador diferencial e pelo mesmo conversor ADS1262. O controle do sistema foi realizado por um microcontrolador STM32, e interfaces gráficas intuitivas, tanto embarcadas quanto para computador, foram desenvolvidas para facilitar a operação e a visualização das medições. O equipamento foi projetado para atingir desempenho comparável ao de SMUs comerciais, com capacidade de aplicar tensões de -10 V a $+10\text{ V}$ e correntes de -10 mA a $+10\text{ mA}$, com resoluções mínimas de 1 mV e $10\text{ }\mu\text{A}$, respectivamente, além de leituras de tensão e corrente com resoluções da ordem de $500\text{ }\mu\text{V}$ e 500 pA . O desenvolvimento da SMU apresentou resultados consistentes, demonstrando capacidade de aplicar tensões de até $\pm 10\text{ V}$ e correntes de $\pm 10\text{ mA}$, distinguindo variações de corrente de aproximadamente $1\text{ }\mu\text{A}$ e variações de tensão de cerca de $50\text{ }\mu\text{V}$ no modo galvanostato, além de medir correntes desde aproximadamente 240 pA até 2 mA no modo potencíostato. As interfaces gráficas desenvolvidas permitiram a exportação de dados em formatos de imagem e texto, contribuindo para a usabilidade do sistema. Dessa forma, a SMU de dois canais desenvolvida neste trabalho estabeleceu-se como uma alternativa acessível e versátil para medições elétricas e eletroquímicas, preenchendo uma lacuna presente no mercado de instrumentação de baixo custo e promovendo maior acessibilidade à pesquisa científica, especialmente em instituições com recursos limitados.

Palavras-chave: SMU. Instrumentação analítica. Potencíostato. Galvanostato.

ABSTRACT

The advancement of science and technology depends on the availability of precise and accessible analytical instruments; however, commercial equipment such as *Source Measure Units* (SMUs) and potentiostats have high costs, limiting their accessibility to academic laboratories and emerging research centers. Although low-cost solutions have been proposed in recent literature, these devices are limited by being single-channel and lacking embedded graphical interfaces, which restricts their applicability in more complex experiments. In this context, this work developed a two-channel SMU for electrical and electrochemical measurements, capable of performing voltammetric and galvanostatic techniques, with the objective of providing an accessible alternative for the characterization of electronic devices and electrochemical cells. The hardware was structured into five main stages: power supply, voltage source, current source, ammeter, and voltmeter, each with dedicated components per channel. The power supply stage employed transformers, filters, and voltage regulators; the voltage source used a DAC8760 digital-to-analog converter and a power amplifier; the current source was based on a differential amplifier; and the ammeter consisted of a transimpedance amplifier combined with an ADS1262 analog-to-digital converter. The voltmeter used a differential amplifier and the same ADS1262 converter. System control was carried out by an STM32 microcontroller, and intuitive graphical interfaces, both embedded and PC-based, were developed to facilitate device operation and data visualization. The equipment was designed to achieve performance comparable to commercial SMUs, with the ability to apply voltages from -10 V to $+10\text{ V}$ and currents from -10 mA to $+10\text{ mA}$, with minimum resolutions of 1 mV and $10\text{ }\mu\text{A}$, respectively, in addition to voltage and current readings with resolutions on the order of $500\text{ }\mu\text{V}$ and 500 pA . The development of the SMU yielded consistent results, demonstrating the ability to apply voltages up to $\pm 10\text{ V}$ and currents of $\pm 10\text{ mA}$, distinguishing current variations of approximately $1\text{ }\mu\text{A}$ and voltage variations of about $50\text{ }\mu\text{V}$ in galvanostat mode, as well as measuring currents from approximately 240 pA up to 2 mA in potentiostat mode. The graphical interfaces developed allowed data export in image and text formats, contributing to the usability of the system. Thus, the two-channel SMU developed in this work established itself as an accessible and versatile solution for electrical and electrochemical measurements, addressing a gap in the low-cost instrumentation market and promoting greater accessibility to scientific research, especially in institutions with limited resources.

Keywords: SMU. Analytical instrumentation. Potentiostat. Galvanostat.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de funcionamento de um equipamento SMU.	14
Figura 2 – a) Circuito básico de um potencistato de três eletrodos; b) Representação da resistência intrínseca de uma célula eletroquímica.	15
Figura 3 – Circuito básico de um galvanostato.	16
Figura 4 – Técnicas voltamétricas.	17
Figura 5 – Voltametria de varredura linear.	18
Figura 6 – Voltametria cíclica.	18
Figura 7 – Voltametria de pulso diferencial.	19
Figura 8 – Ilustração do processo de amostragem, retenção e conversão de sinais de um ADC.	21
Figura 9 – Ilustração do processo de quantização de um ADC.	21
Figura 10 – Circuito amplificador de transimpedância.	22
Figura 11 – Representação do funcionamento do sistema quando utilizado para medida de uma célula química.	23
Figura 12 – Diagrama de blocos do conversor DAC8760.	24
Figura 13 – Diagrama de blocos do conversor ADS1262.	24
Figura 14 – Diagrama de blocos do multiplexador analógico ADG1408.	25
Figura 15 – Placa de desenvolvimento com o microcontrolador STM32F401CCU6. .	26
Figura 16 – Tela DMG80480C050_04WTC.	27
Figura 17 – Bloco de dados de comunicação com a tela DWIN.	28
Figura 18 – Diagrama de blocos do <i>hardware</i> do sistema.	28
Figura 19 – Uso do equipamento no modo potencistato: a) voltametria em uma célula eletroquímica; b) voltametria em um diodo.	29
Figura 20 – Uso do equipamento no modo galvanostato: a) técnica galvanostática com medida do potencial do eletrodo de referência em relação ao terra; b) técnica galvanostática com medida do potencial do eletrodo de corrente em relação ao terra; c) técnica galvanostática em um diodo	30
Figura 21 – Uso do equipamento para caracterização de TBJ.	30
Figura 22 – Placa de circuito impresso desenvolvida para o projeto.	31
Figura 23 – Diagrama de blocos da fonte de tensão.	32
Figura 24 – Diagrama de blocos da fonte de corrente.	33
Figura 25 – Diagrama de blocos do amperímetro.	34
Figura 26 – Diagrama de blocos do voltímetro.	35
Figura 27 – Pinagem do conector DB15 utilizado para a interface dos eletrodos da SMU.	36

Figura 28 – Pacote SPI para escrita de registrador.	37
Figura 29 – Diagrama UML representando a estrutura da biblioteca em C desenvolvida para controle do conversor DAC8760.	38
Figura 30 – Sequência e temporização da escrita de registradores internos do ADS1262.	39
Figura 31 – Diagrama UML representando a estrutura da biblioteca em C desenvolvida para controle do conversor ADS1262.	41
Figura 32 – Diagrama UML representando a estrutura da biblioteca em C desenvolvida para controle da tela DWIN.	41
Figura 33 – Diagrama UML representando a estrutura geral da biblioteca SMU.	43
Figura 34 – Diagrama UML das estruturas de dados (<i>structs</i>) utilizadas na biblioteca SMU.	43
Figura 35 – Fluxograma de funcionamento da biblioteca SMU.	47
Figura 36 – Tela inicial da interface de controle para PC: a) botões principais de navegação e controle localizados na barra superior; b) painel lateral esquerdo contendo o histórico de configurações salvas, com opções para carregamento, exclusão e atualização da lista de arquivos.	49
Figura 37 – Tela “New Measure” da interface de controle: (a) seleção da porta serial e botão de conexão com o dispositivo SMU; (b) seleção do canal de operação (Canal 1, Canal 2 ou <i>Dual-Channel</i>); (c) seleção da técnica e configuração dos parâmetros do Canal 1; (d) seleção da técnica e configuração dos parâmetros do Canal 2; (e) botão de início da medição.	50
Figura 38 – Tela “Real-Time Graph” da interface de controle: (a) botões para exportação dos resultados do Canal 1 nos formatos CSV e PNG; (b) botões equivalentes para exportação dos resultados do Canal 2. Os gráficos exibem as curvas de medição em tempo real para cada canal.	51
Figura 39 – Páginas da interface embarcada DWIN desenvolvida.	52
Figura 40 – Configuração original do ADG1408, na qual canais não ativos injetavam corrente parasita na entrada inversora do LMC662, inviabilizando o funcionamento do transimpedânci.	54
Figura 41 – Configuração corrigida do ADG1408, com o terminal D ligado à entrada inversora e os resistores realocados para S1-S7.	55
Figura 42 – Diagrama de conexão utilizado nos ensaios de caracterização do galvanostato: a) configuração para medição de resistores; b) configuração para medição do fotodiodo, diodo e LEDs.	57
Figura 43 – Curvas V-I obtidas pelo galvanostato para cinco resistores comerciais submetidos a uma varredura de -10 mA a +10 mA, com passo de 50 µA, com dez repetições: a) 1 Ω; b) 4,7 Ω; c) 33 Ω; d) 670 Ω; e) 4,7 kΩ.	58
Figura 44 – Curvas V-I em escala logarítmica para os cinco resistores avaliados, destacando o comportamento próximo ao ponto de cruzamento pelo zero.	59

Figura 45 – Medição do resistor de $4,7\ \Omega$ com o menor passo de corrente ($0,305\ \mu A$): a) curva completa; b) ampliação da região entre $-0,50\ mA$ e $-0,44\ mA$.	60
Figura 46 – Curvas I–V dos dispositivos semicondutores avaliados: a) fotodiodo BPW34; b) diodo 1N4148; c) LED azul; d) LED vermelho.	61
Figura 47 – Diagrama de conexão utilizado nos ensaios de caracterização do potenciómetro: a) configuração para medição de resistores; b) configuração para medição do diodo.	62
Figura 48 – Curvas I–V obtidas pelo potenciómetro para resistores comerciais de diferentes valores, utilizando varredura de $-5\ V$ a $+5\ V$ com passo de $50\ mV$: a) $4,7\ k\Omega$, leitura de corrente com $R_{feedback} = 1\ k\Omega$; b) $41,2\ k\Omega$, $R_{feedback} = 10\ k\Omega$; c) $470\ k\Omega$, $R_{feedback} = 100\ k\Omega$; d) $4,7\ M\Omega$, $R_{feedback} = 1\ M\Omega$; e) $22,4\ M\Omega$, $R_{feedback} = 10\ M\Omega$; f) ampliação de região do resistor de $22,4\ M\Omega$.	63
Figura 49 – Curva I–V para os cinco resistores avaliados ($4,7\ k\Omega$, $41,2\ k\Omega$, $470\ k\Omega$, $4,7\ M\Omega$ e $22,4\ M\Omega$), apresentada em escala logarítmica no eixo da corrente.	65
Figura 50 – Curva I–V de um resistor de $4,7\ k\Omega$, obtido com varredura de tensão de $-10\ V$ a $10\ V$ com passo de $50\ mV$ e comutação automática das escalas do amperímetro.	66
Figura 51 – Comparação das curvas I–V do diodo 1N5819 medidas pela SMU desenvolvida e pelo Keithley 2614B. Varredura de $-2,5\ V$ a $0,3\ V$ (passo de $5\ mV$).	67
Figura 52 – Esquemático do circuito de alimentação.	74
Figura 53 – Esquemático do microcontrolador, osciladores, botões de <i>reset</i> e <i>boot</i> e conector USB.	75
Figura 54 – Esquemático com os circuitos dos reguladores de tensão e conectores de alimentação e eletrodos.	76
Figura 55 – Esquemático da fonte de tensão do canal 1 (a fonte de tensão do canal 2 possui o mesmo circuito, mudando somente o nome dos componentes).	77
Figura 56 – Esquemático da fonte de corrente do canal 1 (a fonte de corrente do canal 2 possui o mesmo circuito, mudando somente o nome dos componentes).	78
Figura 57 – Esquemático dos amperímetros dos canais 1 e 2.	79
Figura 58 – Esquemático dos voltímetros dos canais 1 e 2.	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CS	<i>Chip Select</i>
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i>
DMA	<i>Direct Memory Access</i>
DRDY	<i>Data Ready</i>
DUT	<i>Device Under Test</i>
HAL	<i>Hardware Abstraction Layer</i>
IHM	Interface Homem Máquina
LDO	<i>Low-dropout Regulator</i>
LSB	<i>Least Significant Byte</i>
MOSFET	<i>Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor</i>
MSB	<i>Most Significant Byte</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
PGA	<i>Programmable Gain Amplifier</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
SD	<i>Secure Digital</i>
SMD	<i>Surface Mount Device</i>
SMU	<i>Source Measure Units</i>
SP	<i>Description Pointer</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TBJ	<i>Bipolar Junction Transistor</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
USB-CDC	<i>USB Communication Device Class</i>
VP	<i>Variable Pointer</i>
WPF	<i>Windows Presentation Foundation</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

F_N	Frequência máxima do sinal amostrado
F_S	Frequência de amostragem
I	Corrente elétrica
I_B	Corrente da base
I_C	Corrente do coletor
I_E	Corrente do emissor
I_{in}	Corrente de entrada
R_F	Resistência de realimentação
R_{sh}	Resistor de referência da fonte de corrente
$R_{feedback}$	Resistor de realimentação
t_{degrau}	Intervalo de tempo do degrau
t_{pulso}	Intervalo de tempo do pulso
V	Tensão
V_{AVDD}	Tensão de alimentação analógica positiva
V_{AVSS}	Tensão de alimentação analógica negativa
V_{BE}	Tensão entre base e emissor
V_{CE}	Tensão entre coletor e emissor
V_{degrau}	Degrau de tensão
V_{fim}	Tensão final
V_{ini}	Tensão inicial
V_{max}	Tensão máxima
V_{out}	Tensão de saída
V_{pulso}	Pulso de tensão
V_{DAC}	Tensão de saída do DAC8760

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
3	JUSTIFICATIVA	13
4	REFERENCIAL TEÓRICO	14
4.1	Source Measure Unit	14
4.2	Potenciómetro	15
4.3	Galvanostato	16
4.4	Técnicas Eletroanalíticas	16
4.4.1	Voltametria	16
4.4.2	Métodos galvanostáticos	19
4.5	Microcontroladores	20
4.6	Conversor analógico digital	20
4.7	Conversor digital analógico	21
4.8	Medição de corrente elétrica	22
5	MATERIAIS E MÉTODOS	23
5.1	Materiais	23
5.1.1	Conversor DAC8760	23
5.1.2	Conversor ADS1262	24
5.1.3	Multiplexador analógico ADG1408	25
5.1.4	Microcontrolador STM32F401CCU6	25
5.1.5	Tela DMG80480C070_04WTC	26
5.2	Métodos	28
5.2.1	Hardware	30
5.2.1.1	Alimentação	31
5.2.1.2	Fonte de tensão	32
5.2.1.3	Fonte de corrente	33
5.2.1.4	Amperímetro	33
5.2.1.5	Voltímetro	35
5.2.1.6	Conectores	36
5.2.2	Firmware	36
5.2.2.1	Biblioteca DAC8760	37
5.2.2.2	Biblioteca ADS1262	39
5.2.2.3	Biblioteca DWIN	41

5.2.2.4	Biblioteca SMU	42
5.2.2.4.1	Funções Gerais da Biblioteca	44
5.2.2.4.2	Coleta de Parâmetros das Interfaces	44
5.2.2.4.3	Construção de structs e Execução das Medidas	45
5.2.2.4.4	Interrupção de medições	46
5.2.2.4.5	Envio de Resultados para as Interfaces	46
5.2.3	Interface Homem-Máquina	47
5.2.3.1	Interface para computador	47
5.2.3.2	Interface embarcada DWIN	51
6	RESULTADOS	53
6.1	Verificações Experimentais e Ajustes de Hardware	53
6.2	Caracterização do galvanostato	55
6.3	Caracterização do potenciómetro	61
7	CONCLUSÃO	68
7.1	Trabalhos Futuros	69
7.2	Considerações Finais	69
	REFERÊNCIAS	70
	APÊNDICE A – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO	74
	APÊNDICE B – LISTA DE MATERIAIS	81

1 INTRODUÇÃO

O avanço da ciência e da tecnologia está intrinsecamente ligado à disponibilidade de equipamentos analíticos precisos e acessíveis. No entanto, a maioria dos instrumentos comerciais, como as *Source Measure Units* (SMU) e os potencióstatos, possui custos elevados, o que limita sua aquisição por laboratórios acadêmicos e centros de pesquisa emergentes. Essa restrição financeira impacta diretamente a capacidade de realizar estudos avançados em áreas como a caracterização de dispositivos eletrônicos e o desenvolvimento de novos materiais. Diante desse cenário, o desenvolvimento de equipamentos analíticos de baixo custo torna-se essencial para democratizar o acesso à pesquisa científica.

A popularização e o amplo acesso a ferramentas de prototipagem, como as placas de desenvolvimento Arduino e ESP32, têm viabilizado a criação de dispositivos eletrônicos acessíveis e personalizados. Essas plataformas permitem a construção de equipamentos científicos de baixo custo, que podem ser adaptados às necessidades específicas de cada laboratório, reduzindo a dependência de instrumentos comerciais caros.

Recentemente, avanços na inovação tecnológica têm possibilitado o desenvolvimento de SMUs mais acessíveis. Por exemplo, [Galanti e Haidekker \(2024\)](#) projetaram uma SMU de baixo custo para a caracterização de dispositivos semicondutores, com faixa de operação de -10 V a 10 V e -100 μ A a 100 μ A, oferecendo resolução de 1 μ V e 490 pA. Já [Irving, Cecil e Yates \(2020\)](#) desenvolveram um potencióstato/galvanostato para medições eletroquímicas, operando entre -12 V e 12 V e -200 mA a 200 mA, com resolução de 6 μ A e 100 nA. Embora esses equipamentos representem avanços significativos, eles são limitados por serem de canal único e não possuírem interfaces gráficas embarcadas, o que restringe sua aplicabilidade em experimentos mais complexos.

Este trabalho propõe e implementa uma *Source Measure Unit* de dois canais, capaz de operar como potencióstato e galvanostato, integrando projeto de *hardware*, firmware e interfaces gráficas (embarcada e para PC). O protótipo mostrou desempenho satisfatório: no modo galvanostato obteve-se elevada linearidade (coeficientes de determinação entre 0,9989 e 0,9998) e resolução efetiva de cerca de 1 μ A e 50 μ V; no modo potencióstato foi possível medir correntes desde aproximadamente 240 pA até 2 mA. O custo total de desenvolvimento foi de R\$ 2.227,85 (R\$ 766,39 em impostos) e o projeto recebeu apoio da UTFPR pelo EDITAL nº 14/2025 (R\$ 500).

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma SMU de dois canais para medições elétricas e eletroquímicas, capaz de realizar técnicas voltamétricas e galvanostáticas, com a funcionalidade de caracterizar componentes eletrônicos e realizar medidas eletroquímicas, apresentando os resultados de cada medida de forma gráfica e numérica.

Os objetivos específicos do trabalho englobam o projeto e implementação de circuitos de fonte de corrente, fonte de tensão, voltímetros e amperímetros, desenvolvimento de um *firmware* baseado em máquina de estados para controle das medições, implementação de interfaces gráficas de controle e visualização de resultados e avaliação do desempenho do equipamento através de testes comparativos com o SMU da Keithley, modelo 2614B.

3 JUSTIFICATIVA

Dispositivos SMU são fundamentais para a caracterização de sistemas eletroquímicos e dispositivos semicondutores, permitindo o controle preciso de corrente e tensão em experimentos. A utilização de técnicas voltamétricas e galvanostáticas depende de um controle eficiente e preciso dos parâmetros elétricos, o que justifica a necessidade do desenvolvimento de um SMU dedicado para esses fins.

Além disso, a construção de um equipamento de baixo custo e com alta precisão, como o proposto, pode contribuir significativamente para a democratização do acesso à pesquisa em áreas como a eletroquímica e a física de materiais, especialmente em instituições que enfrentam dificuldades em adquirir equipamentos comerciais de alto custo. Com o desenvolvimento e a documentação do SMU, espera-se contribuir para suprir a carência de ferramentas adequadas para a realização de experimentos em nível acadêmico.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

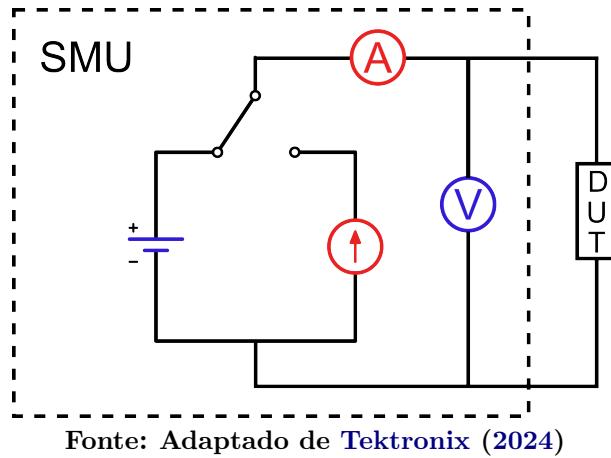
Neste capítulo, serão abordados os fundamentos teóricos que irão embasar o desenvolvimento deste trabalho.

4.1 SOURCE MEASURE UNIT

O equipamento SMU é um instrumento versátil que combina quatro funções fundamentais: medir tensão, medir corrente elétrica, fornecer tensão e fornecer corrente elétrica. Essas funções podem ser utilizadas de maneira independente ou combinadas, permitindo aplicar uma tensão e medir a corrente simultaneamente ou aplicar uma corrente e medir a tensão correspondente (TEKTRONIX, 2014; MERCER, 2017). Entre os objetivos dessas medidas, têm-se a determinação da condutividade elétrica de materiais, a identificação dos potenciais de oxidação e redução de semicondutores orgânicos, a medição do potencial de circuito aberto e da corrente de curto-círcuito em células solares e a caracterização em geral de dispositivos semicondutores como diodos, transistores bipolares de junção (TBJ) e transistores de efeito de campo (MOSFET) (TEKTRONIX, 2014).

O equipamento SMU tem a capacidade de realizar medidas em varredura, seja de tensão ou corrente, dentro de uma faixa e uma taxa de incremento ajustáveis. Essa funcionalidade reflete o uso do equipamento para experimentos com técnicas analíticas, como voltamétricas e galvanostáticas, em que o comportamento de um sistema eletroquímico pode ser estudado de maneira detalhada (TEKTRONIX, 2014). Na Figura 1 é possível verificar um diagrama simplificado do equipamento, mostrando a capacidade de fornecer tensão ou corrente elétrica a um dispositivo em teste (DUT) e ler sua resposta em tensão ou corrente.

Figura 1 – Diagrama de funcionamento de um equipamento SMU.

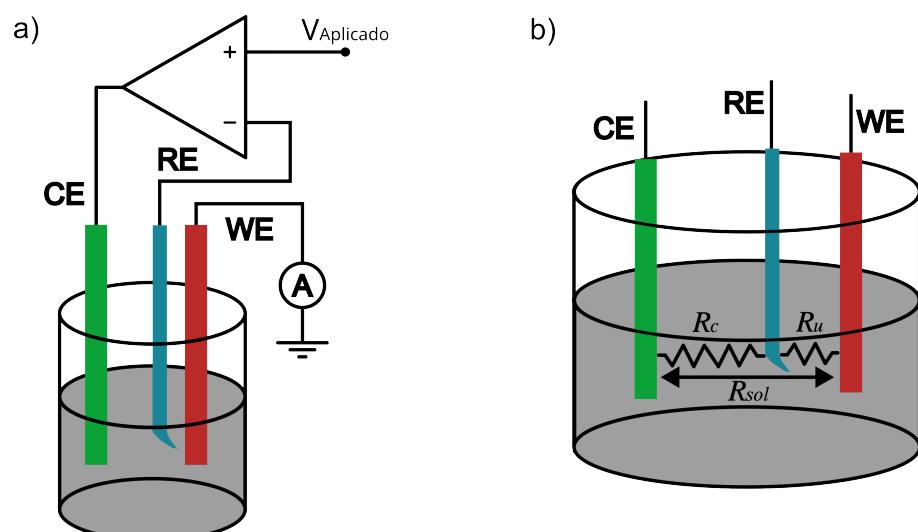


4.2 POTENCIOSTATO

No início da década de 1940, Archio Hicking, da Universidade de Leicester, na Inglaterra, desenvolveu um equipamento denominado potencioscômetro. Este instrumento foi projetado para controlar o potencial aplicado a um eletrodo, permitindo a realização de eletrólises em células eletrolíticas de forma precisa e controlada. Com o avanço das pesquisas e o aperfeiçoamento de sua invenção, o potencioscômetro consolidou-se como um dispositivo essencial para estudos e aplicações na área de eletroquímica (HARRAR, 2013).

Na Figura 2a é apresentado o circuito básico de um potencioscômetro na configuração de três eletrodos. O funcionamento do sistema tem como núcleo um amplificador operacional, responsável pelo controle da tensão aplicada e da corrente fornecida. O contra eletrodo (CE) é responsável por fornecer corrente à célula eletroquímica. À medida que a corrente flui pela célula, o potencial de equilíbrio da solução é alterado. Para monitorar esse potencial de equilíbrio, é utilizado um eletrodo de referência (RE), que mede o potencial entre o eletrodo de trabalho (WE) e a solução. Considerando que a solução eletrolítica possui uma resistência intrínseca na célula eletroquímica (R_{sol}), é fundamental minimizar a queda ôhmica, para isso, posiciona-se o eletrodo de referência próximo ao eletrodo de trabalho, reduzindo boa parte da resistência da solução (R_c), conforme ilustrado na Figura 2b. Os valores de resistência intrínseca da solução geralmente estão na faixa de dezenas de ohms, variando conforme a condutividade do eletrólito e a distância entre o eletrodo de trabalho e o contra eletrodo. O fluxo de corrente ocorre entre o contra eletrodo e o eletrodo de trabalho, com a corrente sendo medida após o eletrodo de trabalho (GAMRY INSTRUMENTS, 2015; PINE RESEARCH, 2023; METROHM, 2018; SNIZHKO et al., 2023).

Figura 2 – a) Circuito básico de um potencioscômetro de três eletrodos; b) Representação da resistência intrínseca de uma célula eletroquímica.



Fonte: Autoria própria (2024).

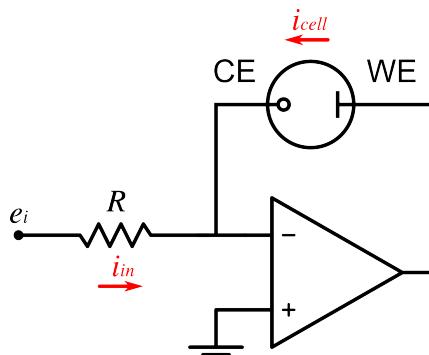
4.3 GALVANOSTATO

Um galvanostato é um instrumento eletroquímico desenvolvido para aplicar e controlar diferentes níveis de corrente elétrica, tanto positivas quanto negativas, enquanto mede o nível de tensão em uma célula eletroquímica. Esse equipamento opera com dois eletrodos: o contra eletrodo e o eletrodo de trabalho. Galvanostatos são amplamente utilizados em diversas aplicações, como caracterização de baterias, células de combustível, biossensores, estudos de corrosão, monitoramento ambiental e síntese eletroquímica de materiais (BARD; FAULKNER, 2001; IRVING; CECIL; YATES, 2021).

O galvanostato pode ser derivado de simples circuitos baseados em amplificadores operacionais, como o mostrado na Figura 3, onde a corrente é controlada através da tensão de entrada e_i , conforme Equação 1 e a tensão de resposta é medida entre o contra eletrodo e o eletrodo de trabalho (BARD; FAULKNER, 2001).

$$i_{cell} = -i_{in} = \frac{-e_i}{R} \quad (1)$$

Figura 3 – Circuito básico de um galvanostato.



Fonte: Adaptado de Bard e Faulkner (2001).

4.4 TÉCNICAS ELETROANALÍTICAS

As técnicas eletroanalíticas são diferentes maneiras de aplicar um potencial ou corrente elétrica no tempo, possibilitando a obtenção de diferentes parâmetros da amostra. Neste contexto, serão exploradas neste subcapítulo as técnicas de voltametria e os métodos galvanostáticos (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2006; SETTLE, 1997).

4.4.1 VOLTAMETRIA

A voltametria é uma técnica eletroanalítica utilizada através de potencióstatos para medir a corrente elétrica em uma célula eletroquímica enquanto se aplica um potencial que varia ao longo do tempo. Amplamente empregada em estudos analíticos e químicos, destaca-se por sua alta sensibilidade e capacidade de fornecer informações qualitativas e

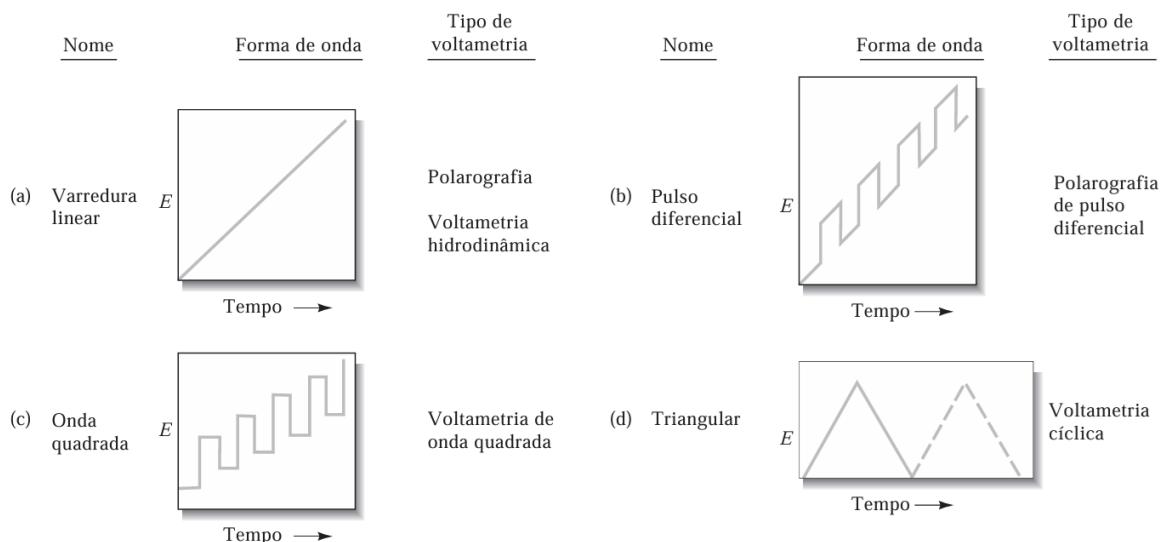
quantitativas sobre espécies eletroativas. O gráfico resultante, conhecido como voltamograma, oferece dados sobre os processos de oxidação e redução, permitindo a identificação e quantificação de analitos (SKOOG et al., 2006; HARVEY, 2000).

A origem histórica da voltametria remonta ao trabalho pioneiro de Jaroslav Heyrovsky, que desenvolveu a técnica de polarografia no início do século XX, sendo laureado com o Prêmio Nobel em 1959 por suas contribuições. Desde então, a evolução da instrumentação, das teorias e dos métodos consolidou a voltametria como uma ferramenta versátil e essencial na análise química (HARVEY, 2000).

A voltametria baseia-se em processos de transferência de massa, como difusão e migração, que transportam os analitos até a superfície do eletrodo. A corrente elétrica medida reflete a taxa de oxidação ou redução controlada pelo potencial aplicado, característica que é amplamente explorada em aplicações que vão desde a determinação de concentrações até o estudo de mecanismos de transferência de elétrons (SKOOG et al., 2006).

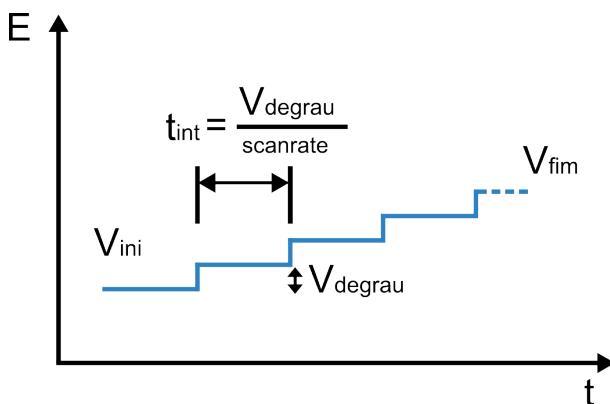
As variações da voltametria incluem a voltametria de varredura linear, voltametria cíclica e técnicas baseadas em pulsos, como a voltametria de pulso diferencial e a voltametria de onda quadrada. A Figura 4 apresenta a representação gráfica dessas diferentes metodologias (BRABEC, 1995; HARVEY, 2000).

Figura 4 – Técnicas voltamétricas.



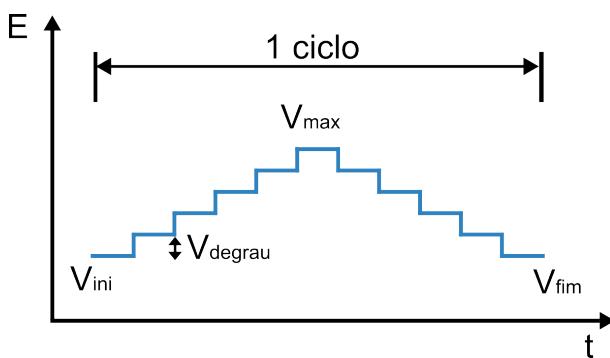
Fonte: Skoog et al. (2006).

O método voltamétrico mais simples, conhecido como voltametria de varredura linear ou polarografia, consiste na aplicação de um potencial que varia linearmente ao longo do tempo e na medição da corrente resultante. A taxa de variação do potencial é definida por alguns parâmetros, como: *scan rate*, tensão inicial (V_{ini}), tensão final (V_{fim}) e degrau de tensão (V_{degrau}), a Figura 5 exemplifica o funcionamento da técnica (SKOOG et al., 2006).

Figura 5 – Voltametria de varredura linear.

Fonte: Adaptado de [PalmSens \(2025\)](#).

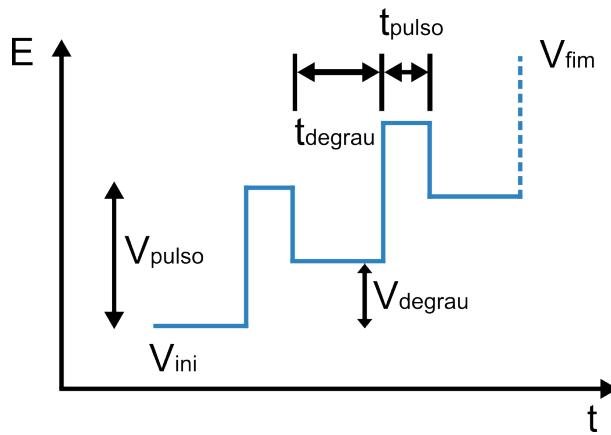
A voltametria cíclica consiste na aplicação de um potencial que varia linearmente em duas etapas: primeiro de valores negativos para positivos e, em seguida, de positivos para negativos. Nesse método, são definidos o *scan rate*, tensão inicial (V_{ini}), tensão final (V_{fim}), tensão máxima (V_{max}), degrau de tensão (V_{degrau}) e o número de ciclos, a Figura 6 ilustra a aplicação da técnica. Esse método é amplamente utilizada para estudar processos redox e avaliar a estabilidade dos produtos de reação (SETTLE, 1997).

Figura 6 – Voltametria cíclica.

Fonte: Adaptado de [PalmSens \(2025\)](#).

Com o objetivo de aumentar a sensibilidade e velocidade são utilizadas técnicas pulsatadas, as duas das mais utilizadas são a voltametria de pulso diferencial e a voltametria de onda quadrada (SETTLE, 1997).

A voltametria de pulso diferencial utiliza uma série de potenciais pulsados para aumentar a amplitude do sinal de excitação, com a corrente sendo medida no final de cada pulso e degrau, técnica projetada para minimizar a interferência de correntes não faradaicas. Os principais parâmetros, conforme Figura 7, definidos nesse método incluem a tensão inicial (V_{ini}), a tensão final (V_{fim}), o tamanho do degrau (V_{degrau}), o tamanho do pulso (V_{pulso}), intervalo de tempo do degrau (t_{degrau}) e intervalo de tempo do pulso (t_{pulso}) (SETTLE, 1997; SKOOG et al., 2006).

Figura 7 – Voltametria de pulso diferencial.

Fonte: Adaptado de [PalmSens \(2025\)](#).

A voltametria de onda quadrada é considerada um caso especial da voltametria de pulso diferencial, em que os intervalo de tempo do degrau e do pulso são iguais ([SETTLE, 1997](#)).

4.4.2 MÉTODOS GALVANOSTÁTICOS

Os métodos galvanostáticos são um conjunto de métodos eletroanalíticos, aplicados por um galvanostato, baseados na aplicação de uma corrente elétrica controlada em uma célula eletroquímica enquanto se monitora a variação do potencial ao longo do tempo ([HARVEY, 2000](#)).

Entre os métodos galvanostáticos serão apresentadas as técnicas de potenciometria, cronomotriometria, varredura linear potenciométrica e potenciometria cíclica ([SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2006](#); [BRAZEC, 1995](#)).

A potenciometria é uma técnica que realiza a medição do potencial em células eletroquímicas sem causar um consumo significativo de corrente, sua principal aplicação é na determinação do ponto final em titulações. Já a cronomotriometria é uma técnica eletroanalítica que mede o potencial em células eletroquímicas enquanto aplica uma corrente constante e não nula. Essa abordagem é empregada no estudo de mecanismos e na análise da cinética de reações químicas ([PALMSENS, 2025](#); [PINE RESEARCH INSTRUMENTATION, 2025](#)).

A varredura linear potenciométrica é semelhante à voltametria de varredura linear, com a diferença de que, nesse caso, a corrente é controlada enquanto a tensão é medida. Essa analogia também se aplica à relação entre a potenciometria cíclica e a voltametria cíclica, conforme subseção 4.4.1.

4.5 MICROCONTROLADORES

Microcontroladores são circuitos integrados projetados para operar como pequenos computadores autossuficientes, combinando, em um único chip, uma *Central Processing Unit* (CPU), memórias, dispositivos de entrada e saída (I/O) e temporizadores. Frequentemente estão presentes outros periféricos como conversores analógico-digitais e unidades de modulação por largura de pulso (LEE, 2017; BANNATYNE; VIOT, 1998; GüVEN et al., 2017).

Outra característica importante dos microcontroladores é a presença de módulos adicionais que expandem suas capacidades. Exemplos comuns incluem unidades de comunicação serial, temporizadores externos e conversores de sinais. Isso possibilita que esses dispositivos desempenhem funções complexas sem a necessidade de outros componentes externos (BANNATYNE; VIOT, 1998; GüVEN et al., 2017).

Microcontroladores simples operam com palavras de 8 bits, sendo adequados para aplicações básicas que demandam pouca memória e funções lógicas simples. Esses dispositivos consomem níveis reduzidos de energia e frequentemente incluem um modo de economia de energia (*sleep mode*), que pode diminuir o consumo para a faixa de nanowatts. Por outro lado, existem versões mais avançadas, que oferecem maior capacidade de processamento e um número ampliado de periféricos, aproximando-se das capacidades de processadores de propósito geral (LEE, 2017).

4.6 CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL

Sensores são dispositivos que convertem um fenômeno físico em outro tipo de sinal, geralmente elétrico. Esse sinal elétrico gerado pelo sensor é, na maioria das vezes, processado antes de ser enviado para um conversor analógico-digital (ADC), que o transforma em um sinal digital, permitindo que a leitura seja utilizada em um computador (TEMES; CHEN, 2011; OPPENHEIM; SCHAFER, 1999).

Para transformar o sinal analógico desejado em uma sequência de códigos binários, é necessário passar pela etapa de amostragem e retenção. Nessa etapa, o circuito de processamento de sinal mantém a amplitude do sinal analógico constante entre os pulsos de amostragem. Esse processo pode ser visualizado na Figura 8 (FLOYD, 2015; TEMES; CHEN, 2011).

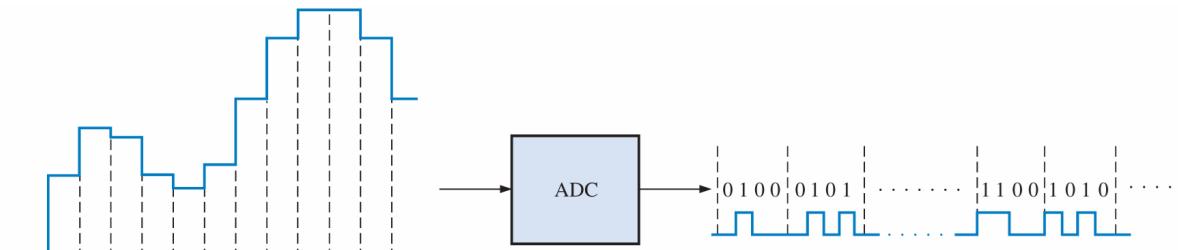
No processo de amostragem, é crucial considerar a frequência máxima do sinal que será amostrado para determinar adequadamente a frequência de amostragem. Isso é orientado pelo teorema de Nyquist, que estabelece a seguinte relação:

$$F_S \geq 2F_N, \quad (2)$$

onde F_S é a frequência de amostragem e F_N é a frequência máxima do sinal a ser amostrado. Dessa forma, garantindo que a frequência de amostragem seja pelo menos o dobro

da frequência máxima do sinal, evita-se o fenômeno do *aliasing*, prevenindo distorções indesejadas no sinal digitalizado (OPPENHEIM; SCHAFER, 1999).

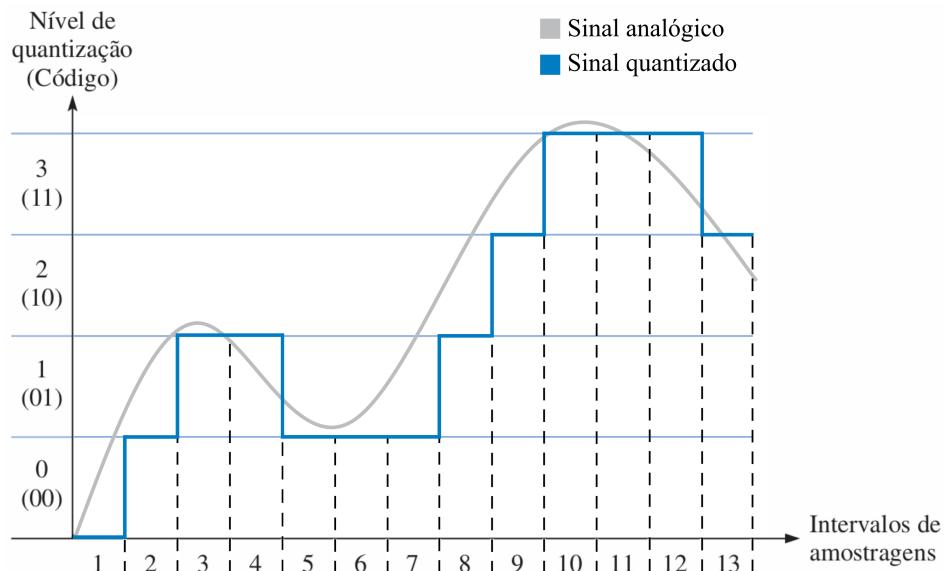
Figura 8 – Ilustração do processo de amostragem, retenção e conversão de sinais de um ADC.



Fonte: Floyd (2015).

O processo de conversão do valor analógico para uma sequência de códigos binários é chamado de quantização. Durante a quantização, o ADC atribui um código específico a cada valor amostrado do sinal. Quanto maior o número de bits utilizado na representação do sinal analógico, mais precisa será a conversão, um exemplo do processo de quantização de um ADC de 2 bits pode ser visto na Figura 9 (FLOYD, 2015).

Figura 9 – Ilustração do processo de quantização de um ADC.



Fonte: Adaptado de Floyd (2015).

4.7 CONVERSOR DIGITAL ANALÓGICO

O conversor digital-analógico (DAC) é um dispositivo que transforma um sinal digital em um nível de tensão analógica. A resolução do sinal convertido está diretamente relacionada ao número de bits do conversor. Por exemplo, um DAC de 8 bits que opera em

uma faixa de 0 a 5 V terá uma resolução de aproximadamente 19,5 mV, representando a menor variação de tensão que pode ser reproduzida pelo dispositivo (TOCCI; WIDMER; MOSS, 2011; ZUMBAHLEN, 2007).

4.8 MEDIÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA

Existem duas metodologias principais para a medição de corrente elétrica: o método por resistência *shunt* e o método por amplificador de transimpedância. O método por resistência *shunt* realiza a medição de corrente de forma indireta, monitorando a queda de tensão em um resistor *shunt* e utilizando a lei de Ohm para calcular o valor da corrente. Essa técnica é amplamente empregada em multímetros digitais e eletrômetros antigos (TEKTRONIX, 2014).

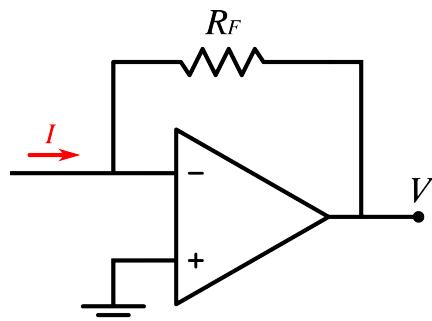
Apesar de ser um método simples, o uso de resistência *shunt* apresenta desvantagens em sistemas de medição de baixas correntes. A principal limitação é a queda de tensão no resistor, conhecida como *voltage burden*, que reduz a tensão disponível no circuito de teste. Isso compromete a precisão da medição, tornando necessário aplicar correções adicionais para garantir resultados confiáveis (SNIZHKO et al., 2023; KEITHLEY, 2014).

Equipamentos como picoamperímetros e SMUs geralmente utilizam sistemas de medição de corrente baseados no amplificador de transimpedância, representado na Figura 10. Essa configuração converte a corrente elétrica (I) em um nível de tensão tensão (V), proporcional à resistência de realimentação (R_F), conforme a relação descrita na Equação 3 (TEKTRONIX, 2014).

Uma vantagem significativa dessa topologia é a minimização do efeito de *voltage burden*. Isso ocorre devido ao alto ganho do amplificador operacional, que mantém a tensão na entrada inversora igual à da entrada não inversora, resultando em uma diferença de potencial praticamente nula (MORTUZA et al., 2017; TEKTRONIX, 2014).

$$V = -R_F I \quad (3)$$

Figura 10 – Circuito amplificador de transimpedância.



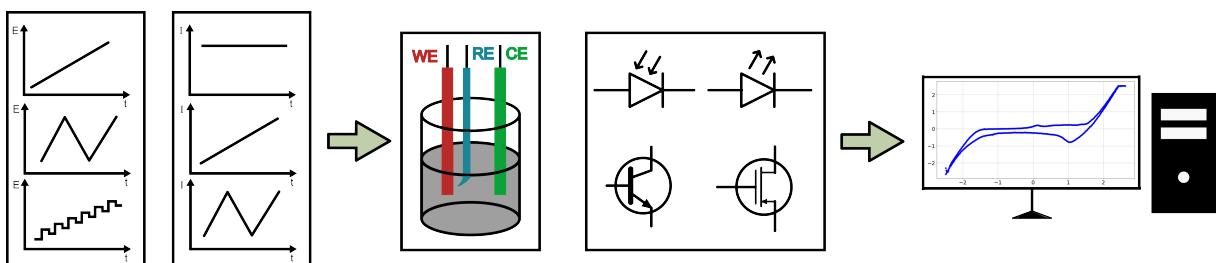
Fonte: Autoria própria (2024).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão discutidos os materiais que foram utilizados e os métodos aplicados no desenvolvimento do equipamento. O sistema foi projetado para aplicar diferentes técnicas eletroanalíticas; para o controle e operação do sistema, foram desenvolvidas duas interfaces: uma interface embarcada e uma interface para computador, ambas destinadas a facilitar a configuração e a execução das medições.

Uma representação do sistema é ilustrada na Figura 11: para operar o equipamento, é necessário selecionar uma das técnicas eletroanalíticas a ser aplicada no dispositivo em teste, que pode ser uma célula eletroquímica ou um componente eletrônico. Após a realização da medida, os resultados são exibidos na interface do equipamento.

Figura 11 – Representação do funcionamento do sistema quando utilizado para medida de uma célula química.



Fonte: Autoria Própria (2024).

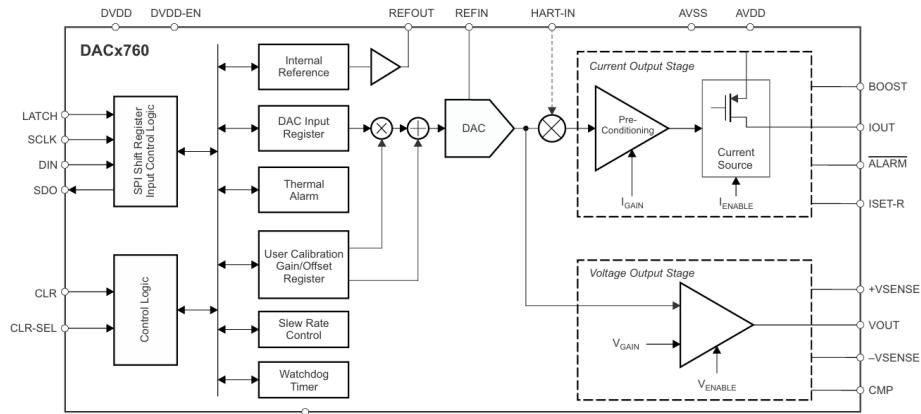
5.1 MATERIAIS

Nesta seção serão apresentados os principais materiais utilizados no desenvolvimento do equipamento.

5.1.1 CONVERSOR DAC8760

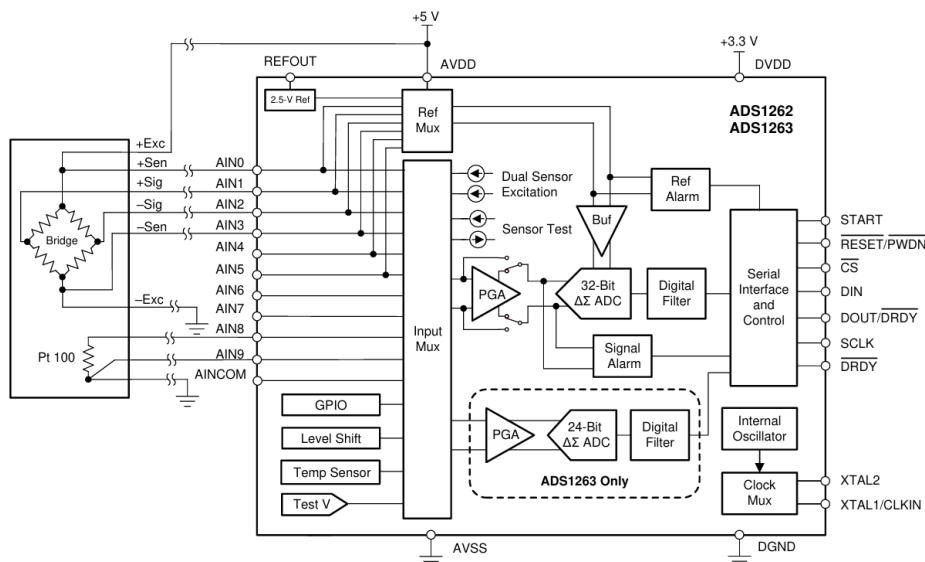
Para a aplicação de diferentes potenciais elétricos, foi utilizado o conversor digital-analógico de 16 bits DAC8760 da Texas Instruments, garantindo um passo de tensão mínimo de $305,18 \mu\text{V}$ quando operando na aplicação de potencial na faixa de -10 V a 10 V. Essas configurações possibilitam a aplicação de diferentes técnicas voltamétricas com precisão e uma faixa de potencial abrangente.

O DAC8760 também permite operar em diferentes faixas de saída de tensão, podendo ser configurado para 0 a 5 V, -5 V a 5 V ou 0 a 10 V, além da faixa de -10 V a 10 V. Adicionalmente, o dispositivo oferece a possibilidade de operar como uma fonte de corrente programável. A comunicação com o microcontrolador é realizada por meio da interface serial SPI (*Serial Peripheral Interface*). A Figura 12 apresenta o diagrama de blocos do conversor, destacando suas principais funcionalidades (TEXAS INSTRUMENTS, 2013).

Figura 12 – Diagrama de blocos do conversor DAC8760.Fonte: [Texas Instruments \(2013\)](#)

5.1.2 CONVERSOR ADS1262

Para o amperímetro do equipamento, empregou-se o conversor analógico-digital de 32 bits ADS1262 da Texas Instruments, que permite operar em uma faixa de tensão de -2,5 V a 2,5 V, com resolução de 1,16 nV. O ADS1262 utiliza uma interface SPI para comunicação e é amplamente aplicado em instrumentação de laboratório, processos analíticos e de controle, bem como em balanças de precisão, devido à sua alta precisão e flexibilidade. Esse conversor possui um *Programmable Gain Amplifier* (PGA) com ganho de até 32 vezes, possibilitando uma resolução de até 0,363 nV no ganho máximo. O diagrama de blocos do componente é apresentado na Figura 13 ([TEXAS INSTRUMENTS, 2015](#)).

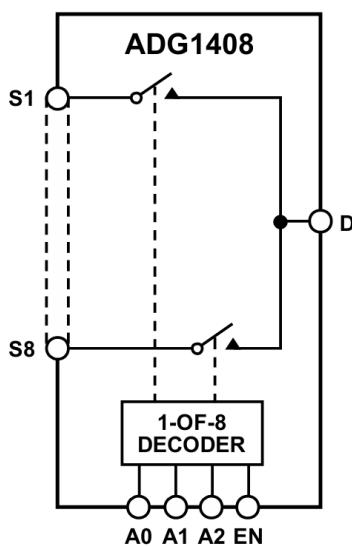
Figura 13 – Diagrama de blocos do conversor ADS1262.Fonte: [Texas Instruments \(2015\)](#)

5.1.3 MULTIPLEXADOR ANALÓGICO ADG1408

Visando a seleção automática das resistências de ganho do amplificador de transimpedância, foi empregado o multiplexador analógico de oito canais ADG1408. Este componente possui uma resistência máxima de canal de $6,7\ \Omega$, suportando uma corrente máxima de 190 mA.

O ADG1408 é amplamente utilizado como substituto de relés em sistemas de aquisição de dados e equipamentos de teste automático. O diagrama de blocos funcional é apresentado na Figura 14 ([ANALOG DEVICES, 2016](#)).

Figura 14 – Diagrama de blocos do multiplexador analógico ADG1408.



Fonte: [Analog Devices \(2016\)](#)

5.1.4 MICROCONTROLADOR STM32F401CCU6

O microcontrolador utilizado para o controle geral do sistema foi o STM32F401CCU6, baseado em um núcleo ARM Cortex-M4 de 32 bits, com frequência de operação de até 84 MHz. Este microcontrolador possui *Direct Memory Access* (DMA), recurso empregado para a atualização das interfaces de controle, permitindo que a CPU trabalhe em paralelo na aquisição de dados. Uma placa de desenvolvimento com o microcontrolador STM32F401CCU6 pode ser vista na Figura 15 ([STMICROELECTRONICS, 2019](#)).

O microcontrolador também conta com suporte nativo ao padrão *USB Communication Device Class* (USB-CDC), que permite sua operação como uma porta serial virtual quando conectado a um computador. Esse recurso é amplamente utilizado em sistemas embarcados por dispensar conversores externos e oferecer comunicação direta via USB.

A família STM32 também dispõe da biblioteca *Hardware Abstraction Layer* (HAL), fornecida pela STMicroelectronics, que disponibiliza uma camada de abstração para os periféricos internos do microcontrolador. O HAL oferece interfaces de alto nível para configuração e operação de módulos como SPI, USART, temporizadores, GPIOs e con-

troladores de DMA, além de rotinas padronizadas de inicialização e tratamento de interrupções. Esse conjunto de ferramentas facilita o desenvolvimento de *firmware* e contribui para maior portabilidade e organização do código em aplicações baseadas na plataforma STM32.

Figura 15 – Placa de desenvolvimento com o microcontrolador STM32F401CCU6.



Fonte: [STMicroelectronics \(2019\)](#)

5.1.5 TELA DMG80480C070_04WTC

A interface embarcada conta com a tela DMG80480C070_04WTC, fabricada pela DWIN. Trata-se de um display LCD de 7 polegadas, com resolução de 800x480 pixels e sensor de toque capacitivo integrado. Essa tela opera com uma tensão de alimentação entre 4,5 V e 5,5 V, apresentando um consumo que varia de 100 mA a 300 mA, dependendo do brilho configurado para a luz de fundo. A comunicação com o microcontrolador pode ser realizada utilizando o protocolo UART ou RS232, dependendo da configuração do sistema ([DWIN TECHLONOGY, 2021](#)).

A memória do sistema é dividida em Flash e RAM. A memória Flash (16 MB) é usada apenas para armazenar os arquivos do projeto, como imagens, fontes e configurações, que podem ser carregados durante a inicialização através de um cartão *Secure Digital* (SD). Já a memória *Random Access Memory* (RAM), com 128 KB, é responsável pelo funcionamento dinâmico da interface e pela troca de dados com o usuário. Essa RAM é dividida em duas regiões principais:

- 0x0000 - 0x0FFF: área de uso exclusivo do sistema, contendo variáveis internas, como controle de brilho, relógio e status de operação;
- 0x1000 - 0xFFFF: área disponível ao usuário, destinada ao armazenamento de variáveis.

Nessa região de usuário, os endereços são livres e podem ser definidos conforme o projeto. Cada controle criado (como textos, botões ou indicadores) é associado a um endereço *Variable Pointer* (VP), onde o valor desse controle é armazenado e pode ser lido ou alterado via UART. Opcionalmente, cada elemento pode possuir também um *Description Pointer* (SP), que define atributos visuais, como cor, posição ou tamanho da fonte. Assim, toda a interação entre o microcontrolador e a tela ocorre por meio da

leitura e escrita desses endereços na RAM, enquanto os recursos gráficos permanecem armazenados na Flash.

Figura 16 – Tela DMG80480C050_04WTC.



Fonte: [DWIN Techlonology \(2021\)](#)

A comunicação entre o microcontrolador e a tela segue o protocolo DGUS II, que organiza os dados transmitidos em blocos binários denominados *data blocks*. Cada pacote é iniciado por um cabeçalho fixo de dois bytes (0x5A A5), seguido pelo campo de comprimento (*length*), pelo identificador do comando (*Instruction*), pelo bloco de dados e, por fim, dois bytes opcionais de *Cyclic Redundancy Check* (CRC), como mostrado na Figura 17. O display interpreta esses pacotes e atualiza as variáveis da RAM conforme o comando recebido.

Os dois comandos mais utilizados são o 0x82, responsável pela escrita de variáveis, e o 0x83, destinado à leitura de variáveis. No comando de escrita, o pacote tem o formato:

[5A A5] [Length] [0x82] [AddrH] [AddrL] [DataH] [DataL], onde:

- AddrH e AddrL - Endereço VP: especificam o endereço inicial de memória onde o valor será gravado;
- DataH e DataL: Dados: representam o valor a ser armazenado.

Por exemplo, o envio da sequência 5A A5 05 82 50 00 00 0A grava o valor 0x000A no endereço 0x5000 da RAM. Já no comando de leitura, a estrutura é:

[5A A5] [Length] [0x83] [AddrH] [AddrL] [CountH] [CountL], onde:

- AddrH e AddrL - Endereço VP: primeiro endereço da RAM a ser lido;
- CountH e CountL: Quantidade: número de variáveis (de 16 bits cada) a serem lidas em sequência.

Um exemplo prático é o pacote 5A A5 04 83 50 00 00 01, que solicita ao *display* o valor armazenado no endereço 0x5000. O dispositivo responde com um pacote de formato

semelhante, contendo o mesmo identificador de comando e os dados solicitados, como 5A A5 06 83 50 00 00 0A.

Figura 17 – Bloco de dados de comunicação com a tela DWIN.

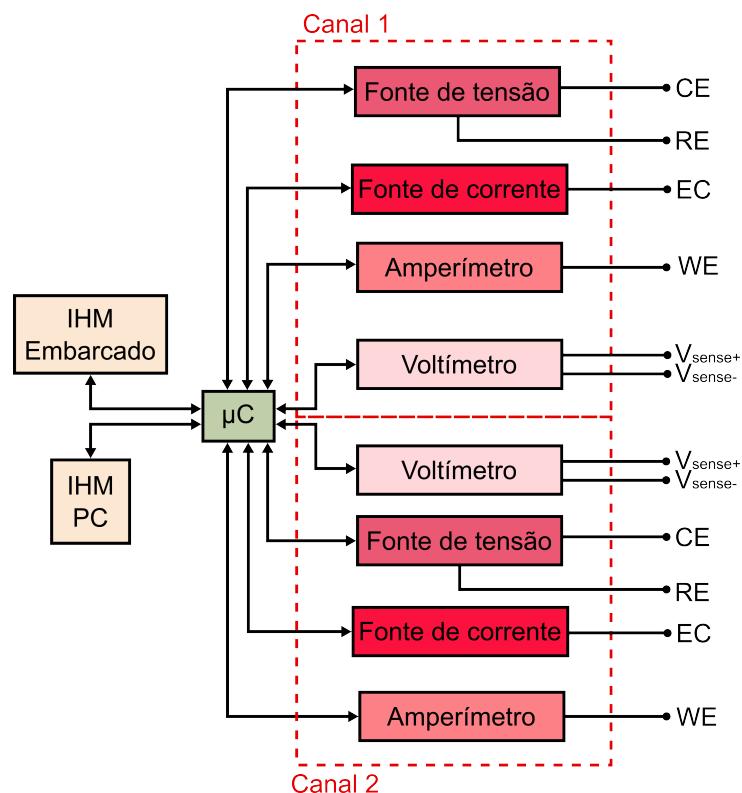
Data block	1	2	3	4	5
Definition	Frame Header	Length	Instruction	Data	CRC Check (optional)
Length	2	1	1	Max.249	2
Description	0x5AA5	Including instruction, data and CRC check	0x82 Write 0x83 Read		CRC-16(x16+x15+x2+1)

Fonte: [DWIN Techlonogy \(2021\)](#)

5.2 MÉTODOS

O controle do equipamento é realizado por meio da Interface Homem-Máquina (IHM) embarcada ou da IHM para computador, que são responsáveis por enviar ao microcontrolador os parâmetros de medição definidos pelo usuário. O microcontrolador, por sua vez, coordena a comunicação com os demais módulos do sistema, aplicando diferentes potenciais, realizando leituras de tensão e medições de corrente, conforme a técnica voltamétrica selecionada na interface. A Figura 18 apresenta uma visão geral do sistema.

Figura 18 – Diagrama de blocos do *hardware* do sistema.



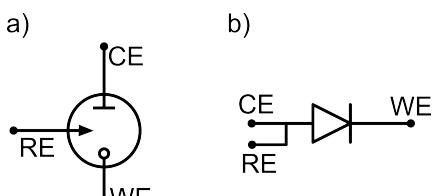
Fonte: Autoria Própria (2024).

O dispositivo SMU pode ser entendido como a combinação de um potencistato e um galvanostato. Dessa forma, os eletrodos podem ser classificados de acordo com a função do equipamento:

- Eletrodos para potencistato:
 - Eletrodo de trabalho (WE)
 - Contra eletrodo (CE)
 - Eletrodo de referência (RE)
- Eletrodos para galvanostato:
 - Eletrodo de corrente (EC)
 - Eletrodo positivo do voltímetro (V_{sense+})
 - Eletrodo negativo do voltímetro (V_{sense-})

Na Figura 19, são apresentadas as diferentes possibilidades de utilização do potencistato. Na Figura 19a, o potencistato é empregado de forma convencional para medir uma célula eletroquímica, utilizando todos os eletrodos. Na Figura 19b, o potencistato é configurado para a medição de um diodo. Nesse caso, é necessário conectar o contra-eletrodo ao eletrodo de referência, transformando o amplificador operacional do potencistato em um *buffer*, já que para a medição de um diodo não se faz necessário o uso de um eletrodo de referência.

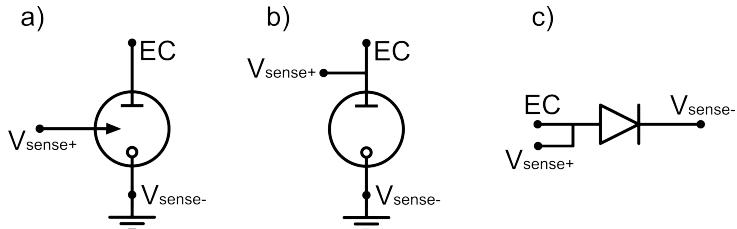
Figura 19 – Uso do equipamento no modo potencistato: a) voltametria em uma célula eletroquímica; b) voltametria em um diodo.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Na Figura 20, são apresentadas diferentes formas de utilização do galvanostato. Na Figura 20a, o equipamento é empregado para a medição de uma célula eletroquímica. Nessa configuração, o eletrodo de corrente aplica corrente elétrica na célula, enquanto o voltímetro mede a tensão de resposta entre um eletrodo de referência e o terra. Na Figura 20b, a diferença está na medição da tensão, que agora é realizada entre o próprio eletrodo de corrente e o terra. Por fim, na Figura 20c, o galvanostato é utilizado para a medição de um diodo, mantendo uma configuração semelhante à da Figura 20b.

Figura 20 – Uso do equipamento no modo galvanostato: a) técnica galvanostática com medida do potencial do eletrodo do eletrodo de referência em relação ao terra; b) técnica galvanostática com medida do potencial do eletrodo de corrente em relação ao terra; c) técnica galvanostática em um diodo



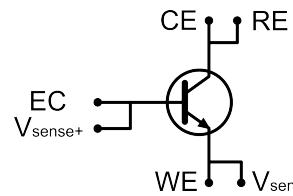
Fonte: Autoria Própria (2024).

Na Figura 21, o equipamento é utilizado para medir a curva característica de um transistor bipolar de junção, especificamente a relação entre a corrente de base (I_B) e a tensão coletor-emissor (V_{CE}). Nesse cenário, tanto o potenciómetro quanto o galvanostato são empregados. O galvanostato aplica diferentes níveis de corrente na base (I_B) do transistor, enquanto, para cada valor de I_B , o potenciómetro realiza uma varredura de tensão entre o coletor e o emissor (V_{CE}) e mede a corrente no emissor (I_E). Posteriormente, a corrente de coletor (I_C) pode ser obtida por meio da Equação 4.

Vale destacar que os eletrodos de medição de tensão do galvanostato não são utilizados, uma vez que não há interesse na medição da tensão entre a base e o emissor (V_{BE}) nesta aplicação.

$$I_C = I_E - I_B \quad (4)$$

Figura 21 – Uso do equipamento para caracterização de TBJ.



Fonte: Autoria Própria (2024).

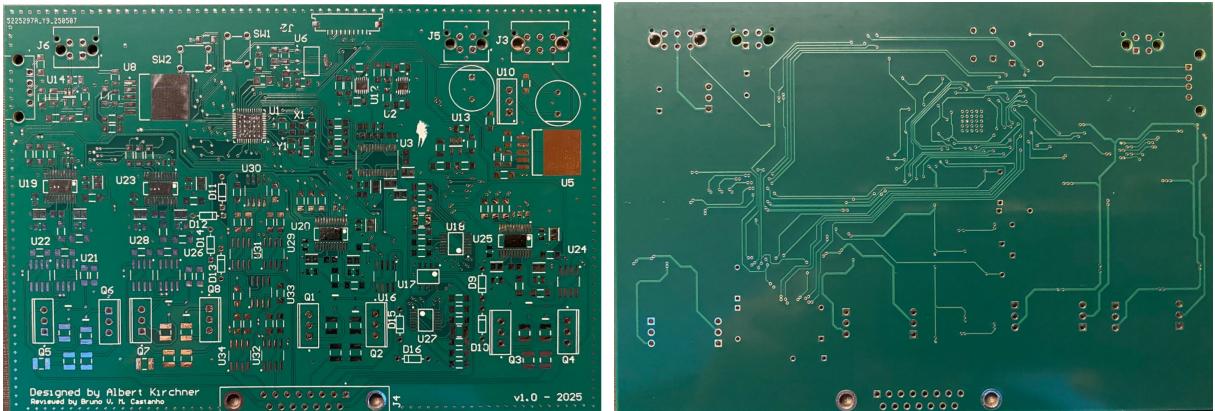
5.2.1 HARDWARE

O *hardware* do instrumento foi estruturado em cinco etapas funcionais principais: alimentação, fonte de tensão, fonte de corrente, amperímetro, voltímetro e conectores, conforme Figura 18. Cada canal de medição é composto por uma fonte de tensão, uma fonte de corrente, um amperímetro e um voltímetro independentes. O diagrama esquemático detalhado de cada bloco é apresentado no Apêndice A.

Para integrar todos os circuitos, foi desenvolvida uma placa de circuito impresso (PCI) utilizando componentes *surface-mount device* (SMD). O projeto da placa foi elaborado

no software Altium Designer, versão 25.3.3, resultando em uma placa de dimensões 140 × 95 mm. A Figura 58 apresenta a PCI desenvolvida para o projeto.

Figura 22 – Placa de circuito impresso desenvolvida para o projeto.



Fonte: Autoria Própria (2025).

5.2.1.1 ALIMENTAÇÃO

O circuito de alimentação foi composto pelas etapas de transformação, filtragem, retificação e regulação linear.

A transformação é realizada por um transformador de 127/220 V para 36 V, com derivação central e corrente nominal de 1,5 A. Para mitigar interferências e harmônicos provenientes da rede elétrica, foram empregados capacitores de diversos valores nas entradas e saídas do transformador, bem como na saída da ponte retificadora, atuando como filtros e garantindo uma tensão contínua estável e livre de ruído em alta frequência.

A retificação é efetuada pelo circuito integrado MB10F, um retificador de onda completa compacto capaz de suportar correntes de até 1 A. Em seguida, as tensões passam pelos reguladores lineares LM7820 e LM7920, que estabelecem as linhas primárias de ±20 V, as quais servem de base para a geração das tensões secundárias de ±16 V, ±8 V, ±2,5 V, +3,3 V e +5 V, utilizadas conforme a função de cada subsistema.

As tensões de ±16 V e ±8 V são geradas pelos reguladores LT1963 e LT1964, que apresentam ruído típico de $40 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$ e $30 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$, respectivamente, entre 10 kHz e 100 kHz. As linhas de ±16 V alimentam os amplificadores operacionais CA3140, empregados nas fontes de tensão, corrente e voltímetro, além dos conversores digitais-analógicos DAC8760 e dos amplificadores de potência. As linhas de ±8 V, por sua vez, suprem o amplificador operacional LMC662 e os multiplexadores ADG1408, empregados no amperímetro.

Para as tensões diferenciais de ±2,5 V, destinadas ao conversor analógico-digital ADS1262, foram empregados os reguladores LT3042 e LT3094, que apresentam ruído ultrabaixo de $0,8 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$.

Por fim, as linhas de +3,3 V e +5 V, geradas pelos reguladores AMS1117-3.3V e LM7805, respectivamente, são dedicadas ao domínio digital. O microcontrolador STM32

e as interfaces digitais são alimentados pela linha de +3,3 V, derivada da linha de +8 V, enquanto a tela DWIN utiliza +5 V provenientes do LM7805.

Em todas as etapas de regulação foram implementados capacitores de desacoplamento próximos aos pinos de entrada e saída dos *Low-dropout Regulator* (LDO), conforme recomendação dos respectivos fabricantes, garantindo a estabilidade e a atenuação de ruídos de alta frequência. De forma análoga, cada circuito integrado do sistema recebeu capacitores de desacoplamento dimensionados segundo as especificações dos fabricantes, posicionados o mais próximo possível de seus terminais de alimentação para minimizar oscilações e interferências entre os estágios analógico e digital.

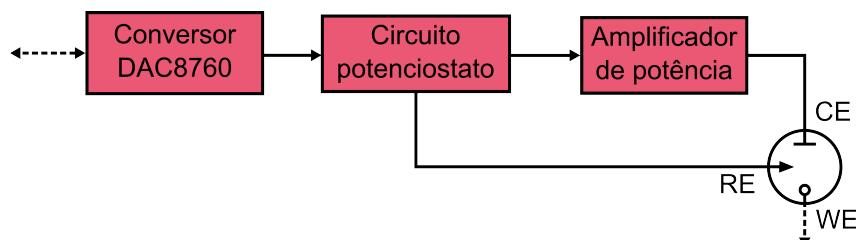
5.2.1.2 FONTE DE TENSÃO

A fonte de tensão é composta pelo DAC DAC8760, pelo amplificador operacional CA3140, responsável pelo circuito potencistato, e por um estágio de potência em configuração classe AB, conforme apresentado na Figura 23. O DAC8760 é responsável pela geração do sinal analógico, permitindo a aplicação de tensões programáveis na faixa de -10 V a +10 V com resolução de 16 bits. No entanto, o dispositivo fornece corrente máxima de apenas 5 mA, valor insuficiente para a aplicação proposta. Dessa forma, o DAC atua apenas como gerador de referência de potencial, enquanto o controle de corrente e a amplificação de potência são realizados pelas etapas subsequentes.

O amplificador operacional CA3140 é utilizado como elemento central do circuito potencistato, configurado como amplificador de erro. Esse componente apresenta *input bias current* típico de 10 pA, *slew rate* de 9 V/μs e tensão de alimentação simétrica de até ±18 V. Assim, o amplificador monitora continuamente a diferença de potencial entre esses eletrodos e ajusta a saída do estágio de potência para que a tensão imposta seja mantida dentro do valor programado pelo DAC.

O estágio de potência subsequente opera em configuração classe AB e é responsável por fornecer a corrente necessária ao dispositivo em teste. O classe AB foi escolhido pela fidelidade do sinal, evitando a distorção de cruzamento.

Figura 23 – Diagrama de blocos da fonte de tensão.



Fonte: Autoria Própria (2024).

5.2.1.3 FONTE DE CORRENTE

A fonte de corrente, apresentada no diagrama de blocos da Figura 24, foi projetada para gerar correntes bidirecionais na faixa de -10 mA a $+10 \text{ mA}$ a partir de uma tensão de referência programada pelo conversor digital-analógico DAC8760. O sistema opera como um conversor tensão-corrente (V-I) baseado em realimentação negativa, de modo que a corrente fornecida à carga seja proporcional à tensão definida pelo DAC.

O primeiro bloco corresponde ao DAC8760, que gera uma tensão de referência ajustável conforme o valor digital enviado pelo microcontrolador. Essa tensão define diretamente o valor de corrente desejado, já que o circuito foi dimensionado para manter a relação linear entre a corrente de saída e a tensão do DAC.

O sinal proveniente do DAC é aplicado ao segundo bloco, denominado amplificador diferencial adaptado. Esse estágio interpreta a tensão de referência e compara continuamente esse valor com a tensão medida sobre o resistor de amostragem presente na saída da fonte. Com isso, o amplificador ajusta sua própria saída para que a queda de tensão no resistor de amostragem corresponda à tensão definida pelo DAC. Como consequência, a corrente na carga passa a obedecer à relação:

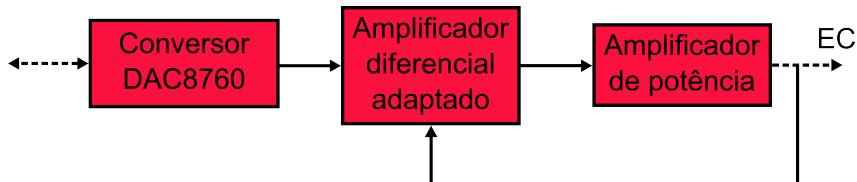
$$I_{\text{out}} = \frac{V_{\text{DAC}}}{R_{\text{sh}}},$$

onde R_{sh} é o resistor de referência utilizado para medir a corrente. O uso da realimentação força o sistema a corrigir automaticamente qualquer variação causada por mudanças na impedância da carga, mantendo a corrente no valor especificado.

O terceiro bloco, o amplificador de potência, fornece a corrente necessária para que o laço de controle mantenha a queda de tensão correta no resistor de amostragem.

O sinal de saída (EC) retorna ao amplificador diferencial em forma de tensão medida sobre o resistor de amostragem, fechando o laço de realimentação. Dessa forma, a corrente aplicada à carga passa a depender exclusivamente da tensão definida pelo DAC e do valor de R_{sh} .

Figura 24 – Diagrama de blocos da fonte de corrente.



Fonte: Autoria Própria (2024).

5.2.1.4 AMPERÍMETRO

O amperímetro é composto por um amplificador de transimpedância, um multiplexador analógico ADG1408, um limitador de tensão na saída do amplificador e o conversor

ADS1262, conforme apresentado na Figura 25.

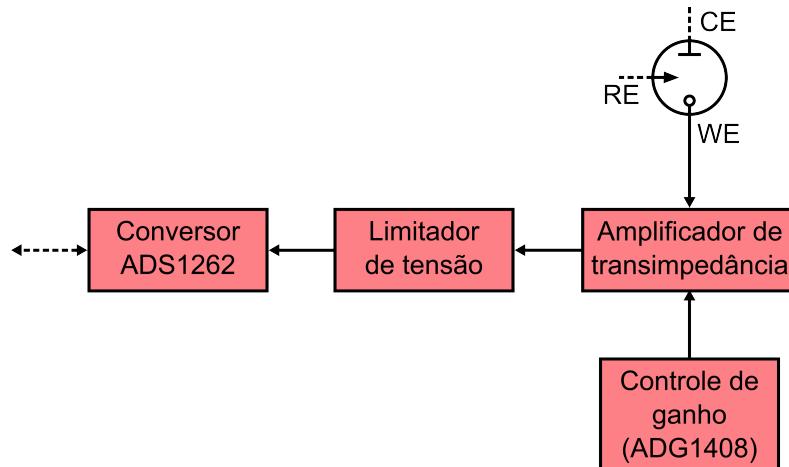
O amplificador operacional utilizado no amplificador de transimpedância é o LMC662, escolhido devido ao seu desempenho adequado para medições de correntes extremamente baixas. O dispositivo apresenta *input bias current* típico de 2 fA, um valor suficientemente reduzido para que a corrente de entrada do amplificador não introduza erros significativos na conversão de corrente para tensão, especialmente nas faixas em que o resistor de realimentação é da ordem de megaohms.

O amplificador de transimpedância realiza a conversão de corrente em tensão, com ganho variável determinado pelo resistor de realimentação ($R_{feedback}$), cuja seleção é feita pelo multiplexador ADG1408. Na saída do amplificador, foi implementado um limitador de tensão para assegurar que a tensão gerada permaneça dentro da faixa permitida pelo conversor ADS1262, limitada a $V_{AVDD} + 0,1$ e $V_{AVSS} - 0,1$, resultando em $\pm 2,6$ V.

O conversor ADS1262 realiza a leitura da tensão de saída do amplificador, que obedece à relação expressa na Equação 5, onde I_{in} representa a corrente de entrada e $R_{feedback}$ o resistor de realimentação ativo no momento da medição:

$$V_{out} = -I_{in} \cdot R_{feedback} \quad (5)$$

Figura 25 – Diagrama de blocos do amperímetro.



Fonte: Autoria Própria (2024).

O circuito inclui um sistema de comutação automática de ganho, responsável por ajustar dinamicamente o valor de $R_{feedback}$ conforme a intensidade da corrente medida. O multiplexador ADG1408 seleciona um entre sete resistores de realimentação conectados às suas entradas ($10\ \Omega$, $100\ \Omega$, $1\ k\Omega$, $10\ k\Omega$, $100\ k\Omega$, $1\ M\Omega$ e $10\ M\Omega$), garantindo que a tensão de saída do amplificador permaneça dentro da faixa ideal de operação do ADS1262 ($\pm 2,5$ V).

Esse controle é realizado automaticamente pelo microcontrolador STM32, que altera o canal ativo do multiplexador conforme a resposta do ADC, dispensando ajustes manu-

ais. O método amplia significativamente a faixa dinâmica do amperímetro, permitindo medições que variam de centenas de miliampères até a ordem de picoampères. O controle de $R_{feedback}$ será abordado em detalhes na subseção 5.2.2.4.3.

A Tabela 1 apresenta as faixas, em valor absoluto, de medição de corrente associadas a cada resistência de realimentação.

Tabela 1 – Faixas de medição de corrente para cada resistência de realimentação.

Resistência de realimentação ($R_{feedback}$)	Faixa de corrente (A)
10 Ω	24 m - 240 m
100 Ω	2,4 m - 24 m
1 kΩ	240 μ - 2,4 m
10 kΩ	24 μ - 240 μ
100 kΩ	2,4 μ - 24 μ
1 MΩ	240 n - 2,4 μ
10 MΩ (corrente máxima da escala)	240 n

Fonte: Autoria própria (2025).

5.2.1.5 VOLTÍMETRO

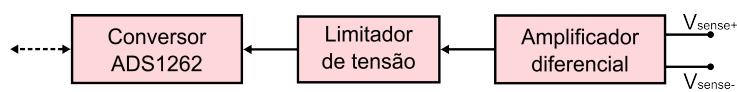
O voltímetro foi composto por um amplificador diferencial, um limitador de tensão e pelo conversor ADS1262, conforme apresentado na Figura 26. Como o ADS1262 opera com faixa de entrada limitada a aproximadamente $\pm 2,5$ V, tornou-se necessário reduzir a amplitude do sinal medido para permitir a leitura de tensões diferenciais maiores. Para isso, o amplificador diferencial foi configurado com ganho de $\frac{1}{4}$ V/V, permitindo que tensões aplicadas entre V_{sense+} e V_{sense-} de até ± 10 V fossem adequadamente condicionadas para o ADC.

O amplificador operacional utilizado no estágio diferencial foi o CA3140, selecionado por sua alta impedância de entrada e baixa corrente de polarização (tipicamente 10 pA).

Após o estágio diferencial, foi empregado um limitador baseado em diodo Zener, responsável por impedir que a saída ultrapassasse a faixa segura do ADS1262, protegendo o conversor contra sobretensões e evitando saturação do seu estágio analógico de entrada.

Com essa configuração, o voltímetro é capaz de medir tensões diferenciais, positivas ou negativas, de até 10 V.

Figura 26 – Diagrama de blocos do voltímetro.



Fonte: Autoria Própria (2024).

5.2.1.6 CONECTORES

A placa da SMU foi projetada com diferentes conectores dedicados à interligação dos sinais de medição, à distribuição das linhas de alimentação e à comunicação com as interfaces do sistema.

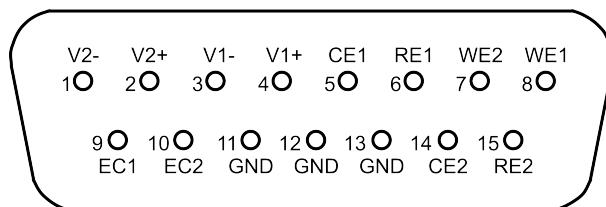
Para parte da alimentação, foram previstos dois conectores MicroFit de quatro pinos, com passo de 3,0 mm. O primeiro conduziu as linhas primárias de +20 V e -20 V, utilizadas como entrada para a regulação das tensões de ± 16 V, enquanto o segundo foi destinado exclusivamente ao retorno de terra.

Além disso, foi empregado um conector MicroFit de seis pinos, também de passo 3,0 mm, para a distribuição de outras duas linhas de +20 V e uma linha adicional de -20 V, destinadas às etapas de regulação de +8 V, +5 V e -8 V.

A comunicação entre a SMU e o computador foi realizada por meio de um conector USB fêmea presente na placa, utilizado para estabelecer a interface USB-CDC com o microcontrolador STM32. Já a interação com a tela DWIN ocorreu através de um conector WR-FPC de passo 1,00 mm, compatível com o conector do *display*. Esse conector transportou tanto os sinais seriais da UART quanto a alimentação dedicada de +5 V do *display*.

O conector para os eletrodos foi um DB15, responsável por agrupar os terminais de medição dos dois canais da SMU, incluindo três terminais de terra para uso quando necessário, conforme ilustrado na Figura 27. Para minimizar interferências externas, o cabo utilizado com o conector DB15 foi escolhido na versão blindada.

Figura 27 – Pinagem do conector DB15 utilizado para a interface dos eletrodos da SMU.



Fonte: Autoria Própria (2024).

5.2.2 FIRMWARE

O desenvolvimento do firmware foi dividido em quatro bibliotecas com os seguintes propósitos:

- DAC8760: comunicação do DAC8760 com o STM32;
- ADS1262: comunicação do ADS1262 com o STM32;
- DWIN: funções básicas para o uso da tela com o STM32; e

- SMU: biblioteca que une as bibliotecas citadas acima e com funções de aplicação e leitura de tensão e corrente, aplicação de técnicas eletroanalíticas e comunicação com as interfaces.

5.2.2.1 BIBLIOTECA DAC8760

Com o objetivo de abstrair a comunicação via SPI e facilitar o controle do conversor, foi desenvolvida uma biblioteca em linguagem C para o DAC8760. A biblioteca organiza-se em uma estrutura de dados (DAC8760_t) que armazena o pino de LATCH, a porta correspondente e o *handle* da interface SPI.

Para a aplicação em questão, o DAC8760 depende basicamente da configuração de registradores para inicialização do conversor e na configuração da tensão de saída do conversor.

A escrita em um registrador, função `DAC8760_WriteRegister(DAC8760_t *dac, uint8_t reg, uint16_t value)`, é realizada por meio de um pacote de 24 bits enviado via SPI, conforme apresentado na Figura 28. O pacote é composto por um byte contendo o endereço do registrador, seguido por dois bytes que representam o *most significant byte* (MSB) e o *least significant byte* (LSB) do dado.

Figura 28 – Pacote SPI para escrita de registrador.

BIT 23:BIT 16	BIT 15:BIT 0
Address byte	Data word

Fonte: [Texas Instruments \(2013\)](#).

A função de inicialização do DAC8760 (`DAC8760_Init(DAC8760_t *dac, uint8_t latch, GPIO_TypeDef *port, SPI_HandleTypeDef hspi)`) foi desenvolvida com base no protocolo descrito no datasheet do componente. A função executa um *reset* por *software* escrevendo o valor 0x0001 no registrador de *reset* (0x56), garantindo que o dispositivo inicie em um estado conhecido. Posteriormente, o registrador de controle (0x55) recebe o valor 0x1003, configurando a saída para operar na faixa de -10 V a +10 V. O registrador de dados (0x01) é então inicializado com 0x0000, assegurando que a saída do DAC inicie em 0 V. Por fim, é aplicado um pulso no pino de LATCH, atualizando efetivamente a saída do conversor.

A configuração da tensão de saída do conversor DAC8760 (`DAC8760_WriteVoltage(DAC8760_t *dac, uint16_t value)`) é realizada por meio da escrita no registrador de dados. Para operar o dispositivo na faixa bipolar de -10 V a +10 V, deve-se utilizar a Equação 6, que relaciona o código digital carregado no DAC com a tensão de saída.

$$V_{OUT} = V_{REF} \times GAIN \times \frac{CODE}{2^N} - GAIN \times \frac{V_{REF}}{2}, \quad (6)$$

onde:

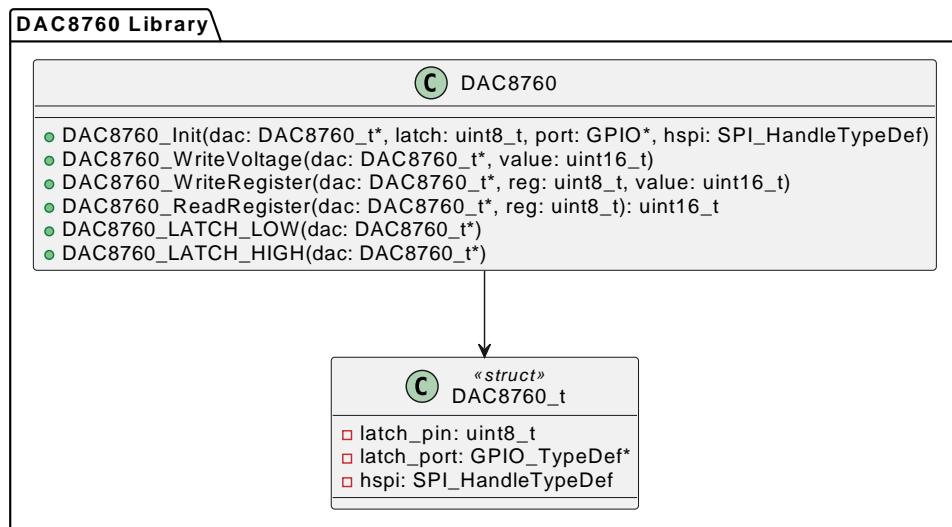
- VOUT: tensão de saída digital do conversor;
- VREF: tensão de referência utilizada pelo conversor, sendo 5 V no caso da referência interna;
- GAIN: fator de ganho definido no registrador de controle, que ajusta a faixa de saída conforme a Tabela 2.
- CODE: valor decimal correspondente ao código digital aplicado ao registrador de dados;
- N: resolução do DAC8760, igual a 16 bits;

Tabela 2 – Tabela de Ganho de Saída de Tensão.

Saída de Tensão	Ganho
0 V a 5 V	1
0 V a 10 V	2
± 5 V	2
± 10 V	4

A estrutura da biblioteca desenvolvida para o DAC8760 foi modelada em *Unified Modeling Language* (UML), de modo a evidenciar a organização das funções de controle e da estrutura de dados associada. O diagrama UML correspondente encontra-se na Figura 29.

Figura 29 – Diagrama UML representando a estrutura da biblioteca em C desenvolvida para controle do conversor DAC8760.



Fonte: Autoria própria (2025.)

No projeto, todos os conversores DAC8760 compartilham o mesmo barramento SPI (SPI2 do STM32), diferenciando-se apenas pelo pino de *latch*. Esse sinal é responsável

por atualizar a tensão de saída de cada dispositivo de forma independente, garantindo a correta sincronização entre os canais.

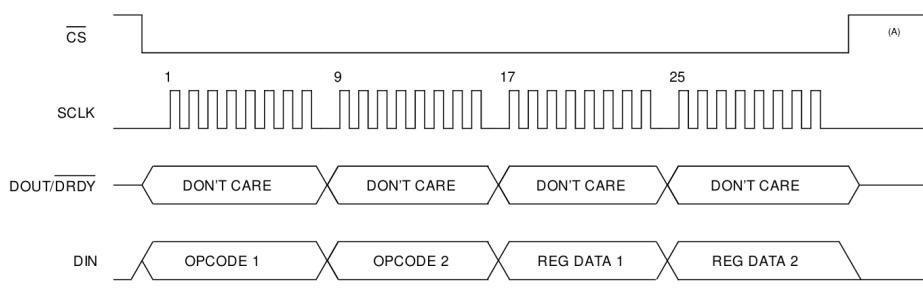
5.2.2.2 BIBLIOTECA ADS1262

Foi implementada uma biblioteca em linguagem C destinada ao ADC ADS1262, cujo propósito é abstrair a comunicação via SPI e fornecer uma interface simplificada para configuração e aquisição de dados.

A biblioteca organiza-se em funções de inicialização, configuração e aquisição de dados. Entre as principais operações implementadas estão: seleção e deseleção do chip via pino *Chip Select* (*CS*), controle do pino *START*, escrita e leitura de registradores internos e leitura de dados de conversão.

A escrita em registradores, função `ADS1262_WriteRegister(uint8_t reg, uint8_t value)`, é realizada através do comando WREG (0x40), com um pacote de quatro bytes: o primeiro byte é formado pelo comando WREG somado com o endereço do registrador, seguido de um byte indicando o número de registros a serem escritos e, por fim, dois bytes de dados. A sequência e temporização do processo de escrita de um registrador podem ser conferidas na Figura 30.

Figura 30 – Sequência e temporização da escrita de registradores internos do ADS1262.



Fonte: [Texas Instruments \(2015\)](#)

A leitura de registradores (`ADS1262_ReadRegister(uint16_t reg)`) é similar à escrita, são enviados dois bytes: o primeiro é formado pelo comando RREG (0x20) somado com o endereço do registrador, seguido do número de registradores a serem lidos. Em sequência, são enviados dois bytes de resposta do ADS1262 via SPI.

A função `ADS1262_Init` executa a seguinte sequência de inicialização: aplica um pulso no pino de reset, configura os registradores de referência de tensão, interface, modo de operação, filtro digital, ganho programável (PGA) e seleção dos canais de entrada. Dessa forma, o ADC é preparado para operar em conversão contínua, com entrada diferencial entre AIN0 e AIN1 e ganho unitário, a Tabela 3 apresenta os registradores configurados.

Tabela 3 – Configuração inicial dos registradores do ADS1262.

Registrador	Valor	Função configurada
POWER	0x01	Habilita a referência interna
INTERFACE	0x05	Retorno do byte de status e ativação do <i>checksum</i>
MODE0	0x00	Conversão contínua
MODE1	0x80	Filtro digital FIR habilitado
MODE2	0x04	PGA habilitado (1 V/V), 20 SPS
INPMUX	0x01	Entrada positiva em AIN0 e negativa em AIN1

O conversor ADS1262 permite iniciar e controlar as conversões de duas formas distintas: por meio do pino START, utilizado como sinal de *hardware*, ou através do envio de comandos específicos via SPI (START1/STOP1). Independentemente do método adotado, o dispositivo utiliza o sinal DRDY (*Data Ready*) para indicar a disponibilidade de novos dados. A cada conversão concluída, o DRDY é colocado em nível lógico baixo, devendo o microcontrolador realizar a leitura antes da próxima conversão para evitar a sobrescrita de dados.

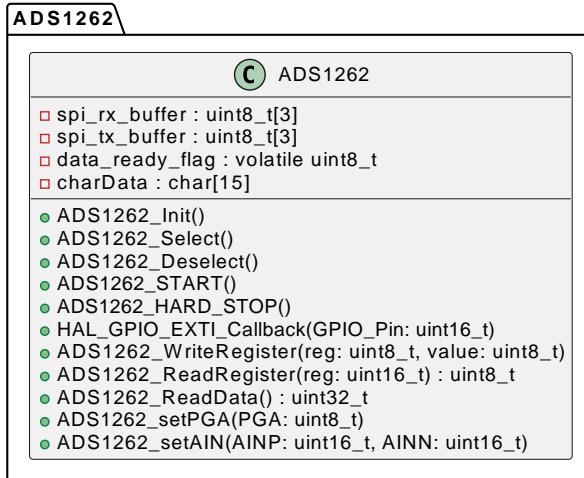
Na biblioteca desenvolvida, optou-se pela utilização do pino START para o controle das conversões. A sincronização da leitura é realizada por meio do monitoramento do sinal DRDY, que assegura a leitura dos dados assim que uma nova conversão é concluída.

O processo de leitura é executado pela função `ADS1262_ReadData()`, responsável por transferir um total de seis bytes: um byte de status, quatro bytes correspondentes ao valor de conversão (32 bits) e um byte de verificação do tipo *checksum* ou CRC. Os bytes de status e CRC são opcionais e podem ser habilitados ou desabilitados por meio da configuração do registrador INTERFACE.

Adicionalmente, foram implementadas funções auxiliares, como `ADS1262_SetPGA` (`uint8_t PGA`), que permite a alteração dinâmica do ganho do PGA, e `ADS1262_SetAIN` (`uint16_t AINP, uint16_t AINN`), responsável pela seleção programática dos canais de entrada analógica.

A estrutura da biblioteca foi representada em diagrama UML (Figura 31), evidenciando as funções implementadas. Para a comunicação entre o conversor e o microcontrolador, foi utilizado o barramento SPI1 do STM32.

Figura 31 – Diagrama UML representando a estrutura da biblioteca em C desenvolvida para controle do conversor ADS1262.



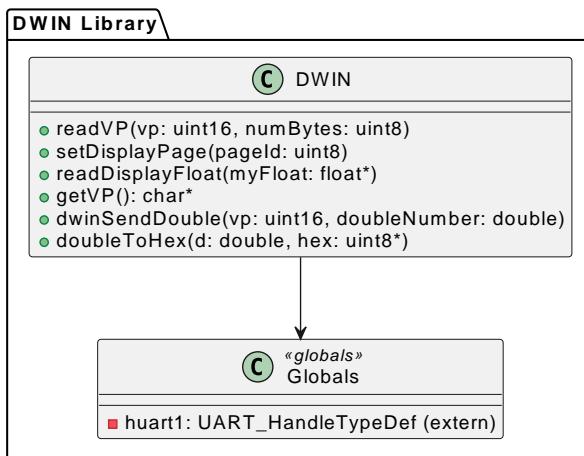
Fonte: Autoria própria (2025).

5.2.2.3 BIBLIOTECA DWIN

A biblioteca DWIN, desenvolvida em linguagem C, tem como finalidade gerenciar a comunicação serial entre o microcontrolador STM32 e o display gráfico DMG80480C070_04 WTC. Sua implementação baseia-se no protocolo DGUS II, detalhado na subseção 5.1.5, permitindo a escrita e a leitura de VPs armazenadas na RAM da tela.

As funções implementadas são apresentadas na Figura 32.

Figura 32 – Diagrama UML representando a estrutura da biblioteca em C desenvolvida para controle da tela DWIN.



Fonte: Autoria própria (2025).

A função `readVP(uint16_t vpAddress, uint8_t numBytes)` é responsável por solicitar ao display o conteúdo de um endereço VP. Para o correto processamento da resposta, essa função deve ser utilizada em conjunto com `readDisplayFloat(float *myFloat)`.

A rotina `readDisplayFloat()` realiza o tratamento dos dados recebidos. Após detectar o byte 0x83, indicativo de leitura, a função armazena os bytes subsequentes até a ocorrência do byte 0xFF, que indica o fim da mensagem. Os dados recebidos em formato ASCII são convertidos em número de ponto flutuante utilizando a função `atof()`, sendo o valor final armazenado no endereço apontado por `myFloat`. Essa combinação de funções permite ao *firmware* recuperar parâmetros configurados na interface gráfica.

A função `setDisplayPage(uint8_t pageId)` executa a troca de página na interface, enviando o comando de escrita (0x82) para o endereço de sistema 0x0084. O valor transmitido (`pageId`) corresponde ao número da página que deve ser exibida.

Para o envio de valores numéricos em formato binário, foi desenvolvida a função `dwinSendDouble(uint16_t vp, double doubleNumber)`, que permite escrever diretamente um valor de ponto flutuante de dupla precisão na memória do *display*. Essa rotina converte o número em oito bytes utilizando a função auxiliar `doubleToHex(double d, uint8_t *hex)`, baseada em uma cópia de memória direta (`memcpy`) da variável `double` para um vetor de bytes. Os bytes resultantes são então inseridos no comando de escrita, transmitido pela UART no formato *big-endian*, de modo a atender ao protocolo de comunicação do *display*.

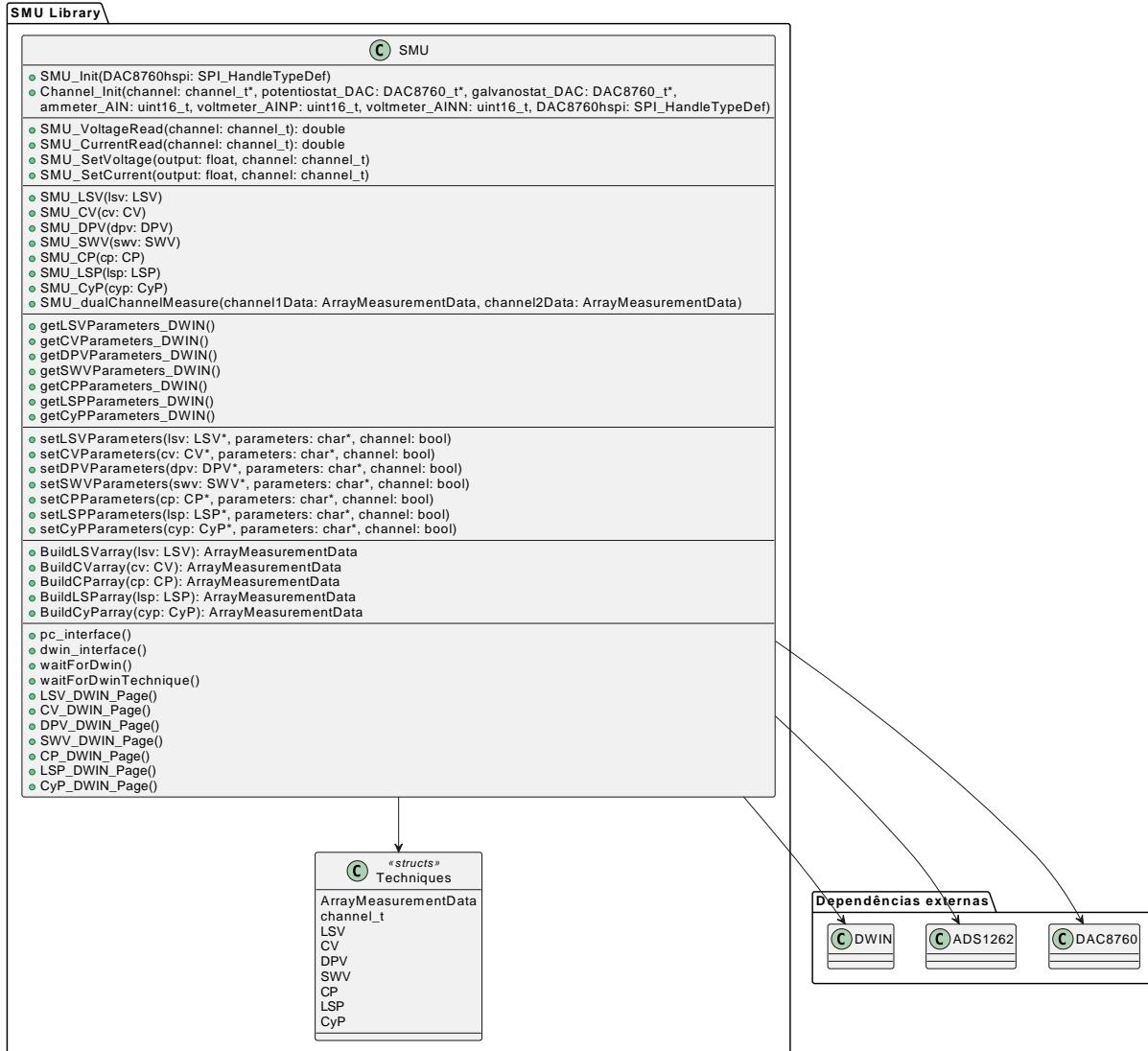
Em conjunto, as rotinas desenvolvidas compõem uma camada de abstração que gerencia todas as interações com o display DWIN, incluindo a troca de páginas, leitura e escrita de variáveis e conversão de dados. Essa biblioteca foi projetada para operar de forma modular e integrável às demais bibliotecas do sistema, como a SMU, permitindo a comunicação contínua entre o microcontrolador e a interface homem-máquina embarcada.

5.2.2.4 BIBLIOTECA SMU

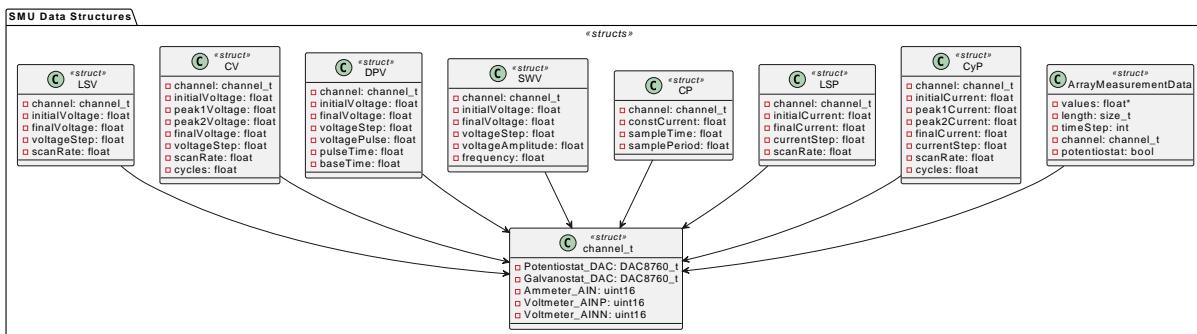
O *firmware* da biblioteca SMU é o núcleo de controle do instrumento. Sua principal função é estabelecer a camada de abstração que unifica e gerencia o *hardware* de baixo nível (DAC8760 e o ADS1262) com a lógica de alto nível das técnicas eletroquímicas e as duas interfaces de usuário: o *display* DWIN e a Interface PC (via USB-CDC). Um diagrama UML representando a biblioteca pode ser vista na Figura 33.

Esta biblioteca define a `struct channel_t`, crucial para o *design* modular de dois canais. Esta estrutura encapsula todos os recursos necessários para um canal de medição, incluindo referências ao DAC do potenciómetro e do galvanostato, e os pinos de entrada do ADS1262 (para o amperímetro e o voltímetro). Além disso, `structs` específicas (LSV, CV, DPV, SWV, CP, LSP e CyP) são utilizadas para armazenar os parâmetros de cada técnica. Para o modo *Dual-Channel*, a `struct ArrayMeasurementData` armazena um *array* com os valores de excitação pré-calculados e o tamanho total deste *array*, sendo utilizada como entrada para a função de medição síncrona. Uma representação em UML das `structs` implementadas pode ser vista na Figura 34.

Figura 33 – Diagrama UML representando a estrutura geral da biblioteca SMU.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 34 – Diagrama UML das estruturas de dados (*structs*) utilizadas na biblioteca SMU.

Fonte: Autoria própria (2025).

5.2.2.4.1 FUNÇÕES GERAIS DA BIBLIOTECA

As funções gerais da biblioteca SMU fornecem o controle básico de inicialização e a interface de baixo nível para as operações de *Source* (Fonte) e *Measure* (Medida).

A rotina de inicialização é orquestrada pela função `SMU_Init`, que inicia o sistema de medição. Esta função chama sequencialmente a `Channel_Init` para os dois canais. A `Channel_Init` configura o *hardware* de cada canal, inicializando os dois DACs (DAC8760) e associando os pinos de leitura do amperímetro e voltímetro do ADC (ADS1262) à respectiva *struct channel_t*. O processo é concluído com a inicialização do próprio ADS1262.

O controle do fluxo de sinal é feito pelas funções de *source* e *measure*:

- `SMU_SetVoltage`: converte a tensão de saída desejada para o código digital e a aplica no DAC do potencióstato;
- `SMU_SetCurrent`: converte a corrente de saída desejada em uma tensão de controle e a aplica no DAC do galvanostato;
- `SMU_VoltageRead`: controla o multiplexador do ADS1262 para ler os pinos do voltímetro e converte o valor digital para a tensão real;
- `SMU_CurrentRead`: lê a tensão de realimentação do amplificador de transimpedância do amperímetro e a converte para corrente em ampères.

5.2.2.4.2 COLETA DE PARÂMETROS DAS INTERFACES

A obtenção dos parâmetros de medição varia significativamente entre as duas interfaces de controle, refletindo suas arquiteturas de comunicação distintas.

A Interface PC envia comandos de medição como *strings* formatadas via USB-CDC. A *string* é estruturada para suportar medições em canal único ou duplo, utilizando a vírgula (,) como delimitador principal entre os comandos do canal 1 e do canal 2, seguindo o formato geral: "[Comando Canal 1], [Comando Canal 2]". A lógica de *parsing* no *firmware* é projetada para identificar a presença e a posição da vírgula, determinando o(s) canal(ais) a ser(em) configurado(s):

- 1) Somente Canal 1 (Ex: LSV;-0.5;9;20;150,);
- 2) Somente Canal 2 (Ex: ,2CyP;-5;5;-2;10;42;192;4);
- ou 3) Ambos os Canais (Ex: CP;-4;45;50,2LSP;-5;10;50;150).

As funções `setLSVParameters`, e análogas, processam a seção da *string*, extraíndo e convertendo os valores de parâmetros para popular as respectivas *structs* de técnica.

Para a Interface DWIN, o microcontrolador controla ativamente a navegação e a extração de parâmetros. Toda vez que um botão é pressionado no *display*, é enviado pela porta UART o endereço do VP associado. Este endereço funciona como um identificador para o microcontrolador, que executa a lógica de controle para determinar a página de navegação atual (`LSV_DWIN_Page` e análogas) e quando o usuário inicia uma medição. Ao receber o comando de início de medida, o microcontrolador executa funções como `getLSVParameters_DWIN()`, que se comunicam via serial para ler os valores de VP onde os parâmetros configurados estão armazenados, populando as *structs* da técnica em específico.

5.2.2.4.3 CONSTRUÇÃO DE STRUCTS E EXECUÇÃO DAS MEDIDAS

Com os parâmetros definidos, o *firmware* procede à execução da lógica de medição, seja em modo *Single-Channel* ou *Dual-Channel*.

As funções `SMU_LSV`, `SMU_CV`, e análogas, implementam o algoritmo de varredura para o modo *Single-Channel*. O corpo dessas funções consiste em um laço de repetição onde, em cada iteração, o sinal é aplicado (`SMU_SetVoltage` ou `SMU_SetCurrent`) e a resposta é lida (`SMU_CurrentRead` ou `SMU_VoltageRead`), mantendo o tempo de passo através de *polling* do temporizador interno TIM2 do STM32, com resolução de 1 μ s.

A medição *Dual-Channel* é exclusiva da Interface PC. Para isso, a função `BuildLSVarray` e suas análogas, são utilizadas para pré-calcular e armazenar a sequência completa de excitação em um *array* dinâmico. O resultado é encapsulado na *struct* `ArrayMeasurementData`. Em seguida, a função `SMU_dualChannelMeasure` recebe as duas *structs* e executa um único laço de repetição. Dentro deste laço, os pontos de excitação de ambos os canais são aplicados de forma sequencial, seguidos pela leitura de resposta de ambos os canais.

Durante a execução da medição, o *firmware* monitora continuamente a tensão lida pelo conversor ADS1262 em cada canal, a fim de ajustar automaticamente a escala de corrente. Esse controle é realizado através do multiplexador analógico ADG1408, responsável por selecionar o resistor de realimentação ($R_{feedback}$) do amplificador de transimpedância de acordo com a amplitude da tensão de saída.

O processo inicia sempre na menor sensibilidade, com o resistor de 10 Ω , correspondente ao menor ganho. A cada nova leitura, o microcontrolador verifica se a tensão medida no ADC está dentro da faixa ideal de operação ($\pm 2,5$ V). Caso o valor absoluto da leitura seja inferior a 0,1 V, o ganho é incrementado, selecionando-se o próximo resistor de maior valor. De modo inverso, se o valor absoluto da leitura ultrapassar 2,4 V, o ganho é reduzido, comutando-se para um resistor de menor valor. Essa lógica evita a saturação do conversor e garante que o sinal permaneça dentro da faixa de máxima resolução, sem a necessidade de intervenção do usuário.

5.2.2.4.4 INTERRUPÇÃO DE MEDIÇÕES

O *firmware* da SMU implementa um mecanismo de interrupção imediata das medições, disponível exclusivamente durante a operação via interface para computador. Essa funcionalidade permite ao usuário encerrar a execução de uma técnica em andamento de forma segura, interrompendo imediatamente a aplicação de sinais de excitação e retornando o sistema ao estado inicial.

O comando de interrupção é recebido pela comunicação USB-CDC e tratado na função `CDC_Receive_FS(uint8_t* Buf, uint32_t *Len)`, que é acionada automaticamente sempre que novos dados são recebidos pela porta serial virtual do STM32. Essa função foi modificada para reconhecer o comando de cancelamento enviado pela interface em formato de *string*. Quando a mensagem recebida corresponde ao texto "`stopMeasure`", o *firmware* executa a rotina `NVIC_SystemReset()`, responsável por reinicializar o microcontrolador, garantindo que todos os periféricos e variáveis retornem ao estado inicial.

5.2.2.4.5 ENVIO DE RESULTADOS PARA AS INTERFACES

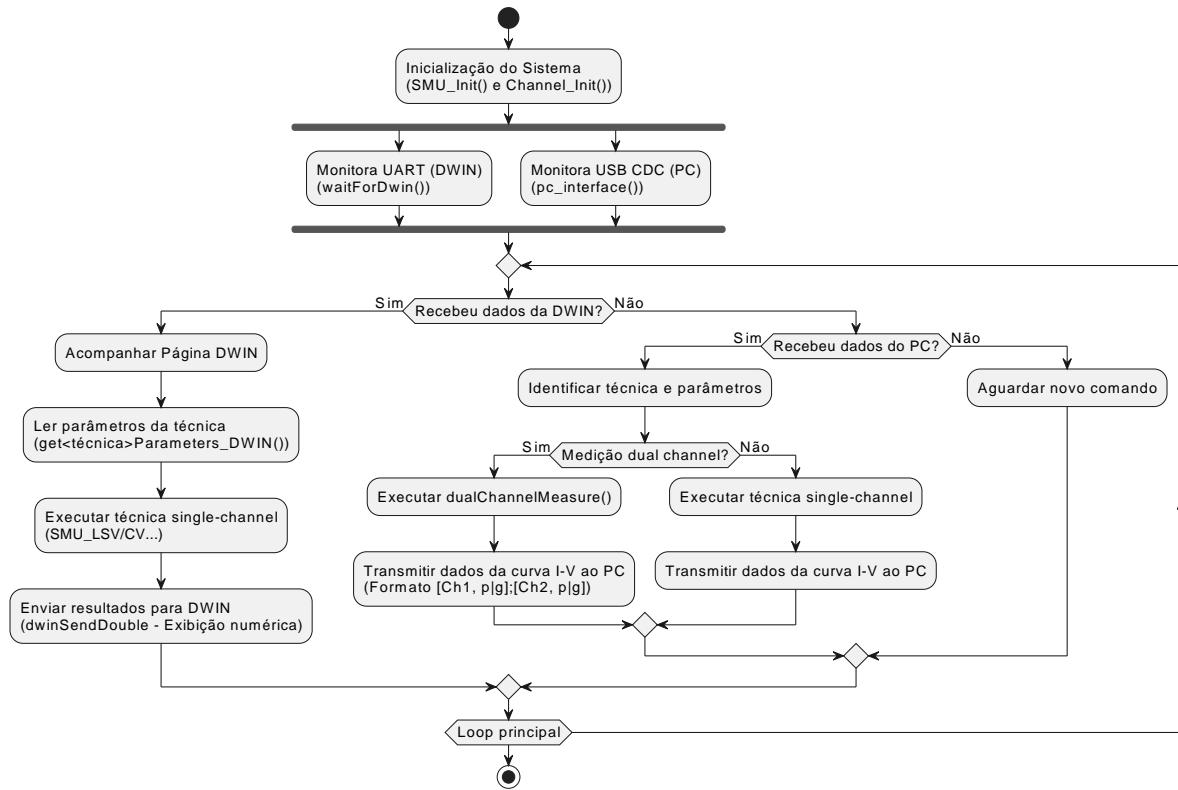
O envio dos resultados é realizado dentro do laço de execução da técnica, permitindo o *streaming* contínuo dos dados.

Para a Interface PC, os resultados são formatados em *strings* e transmitidos via USB-CDC através da função `CDC_Transmit_FS`. No caso da medição *Dual-Channel*, o *firmware* envia os dados formatados com as letras "p" e "g" para indicar o tipo de medição de cada canal, permitindo que o *software* no PC plote os gráficos de cada canal separadamente a partir de um único fluxo de dados. A letra p significa potenciómetro e g significa galvanômetro.

Para o *display* DWIN, a função `dwinSendDouble(...)` é utilizada para enviar os valores de excitação e resposta para os endereços de memória do *display*. É fundamental notar que o DWIN não realiza a plotagem dos resultados, ele apenas exibe os valores numéricos aplicados e lidos.

Assim, a biblioteca SMU atua como o elo central entre as camadas de controle de *hardware* e as interfaces de usuário, coordenando de forma modular as medições e garantindo a sincronização entre os canais. Um diagrama representando o fluxo de operação é apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Fluxograma de funcionamento da biblioteca SMU.



Fonte: Autoria própria (2025).

5.2.3 INTERFACE HOMEM-MÁQUINA

A camada de interface homem-máquina desempenha um papel essencial no funcionamento do instrumento, permitindo a interação direta entre o usuário e o sistema de medição. Foram desenvolvidas duas interfaces complementares: uma interface para computador, que oferece controle completo do equipamento e visualização gráfica detalhada dos resultados, e uma interface embarcada no próprio dispositivo, projetada para operação autônoma e configuração rápida das técnicas eletroanalíticas. Ambas comunicam-se com o microcontrolador STM32, que atua como núcleo central de controle e coordenação das medições.

5.2.3.1 INTERFACE PARA COMPUTADOR

A interface de controle para computador foi desenvolvida em linguagem C#, utilizando o framework .NET Windows Presentation Foundation (WPF). Seu objetivo é estabelecer uma comunicação direta e responsiva entre o microcontrolador STM32 e o usuário, permitindo a configuração das medições e o acompanhamento em tempo real dos resultados. A comunicação com o *firmware* da SMU é realizada por meio da porta virtual USB-CDC do microcontrolador.

As principais funcionalidades implementadas na interface incluem:

- Envio dos parâmetros de medição ao microcontrolador;
- Salvamento e carregamento de configurações de medida;
- Recebimento e exibição dos resultados em gráficos em tempo real;
- Exportação dos dados em formato *Comma-Separated Values* (CSV);
- Salvamento dos gráficos em formato de imagem *Portable Network Graphics* (PNG).

A aplicação é organizada em três telas principais: a tela inicial, a tela de configuração de nova medida e a tela de gráficos e resultados.

A tela inicial (Figura 36) apresenta na parte superior os botões de navegação e controle, cada um com uma função específica:

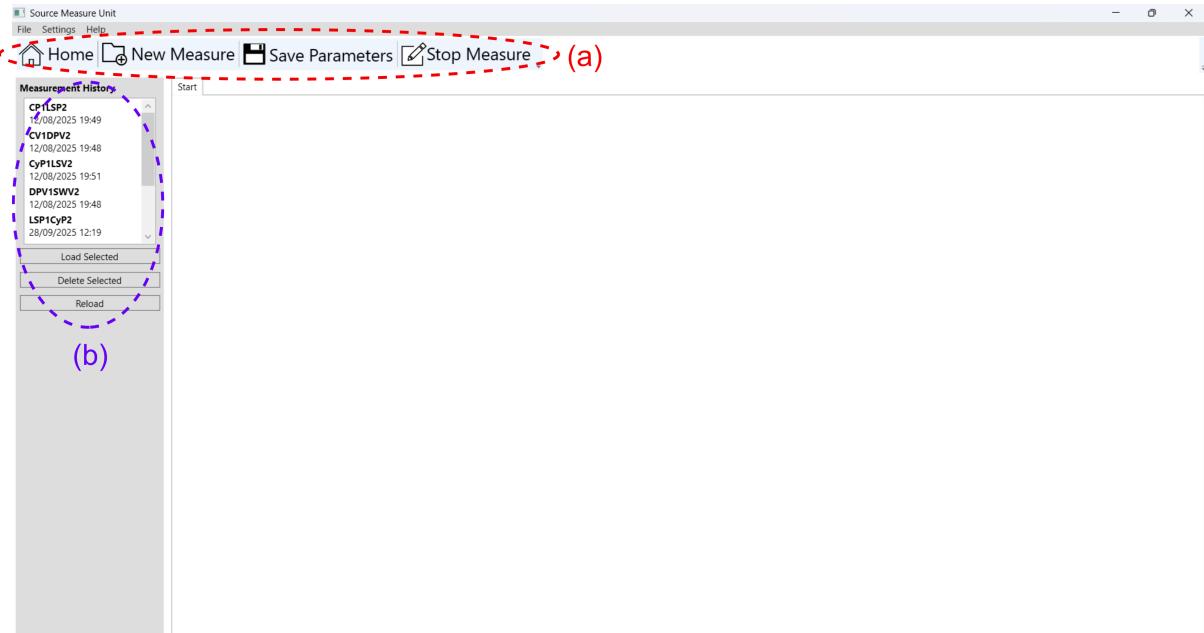
- Home: retorna à tela inicial do *software*;
- New Measure: acessa a tela de configuração de uma nova medida;
- Save Parameters: salva os parâmetros de medição em um arquivo de texto;
- Stop Measure: interrompe a medição em execução.

Na lateral esquerda, localiza-se o painel de histórico de medições, que lista os arquivos contendo configurações de medidas salvos automaticamente na pasta Documentos/SMU. Cada item da lista exibe o nome do arquivo, a data e o horário de criação, facilitando o reaproveitamento de técnicas com parâmetros recorrentes. Abaixo da lista, encontram-se os botões de gerenciamento:

- Load Selected: carrega a configuração contida no arquivo selecionado;
- Delete Selected: exclui o arquivo de parâmetros selecionado;
- Reload: atualiza a lista de arquivos exibidos com base no conteúdo da pasta Documentos/SMU.

Os parâmetros são salvos em arquivo de texto no mesmo formato utilizado pela interface para o envio de comandos ao microcontrolador, conforme descrito na subseção 5.2.2.4.2. Essa padronização garante compatibilidade direta entre os dados armazenados e o protocolo de comunicação da SMU, permitindo que as configurações salvas possam ser reutilizadas ou modificadas com facilidade.

Figura 36 – Tela inicial da interface de controle para PC: a) botões principais de navegação e controle localizados na barra superior; b) painel lateral esquerdo contendo o histórico de configurações salvas, com opções para carregamento, exclusão e atualização da lista de arquivos.



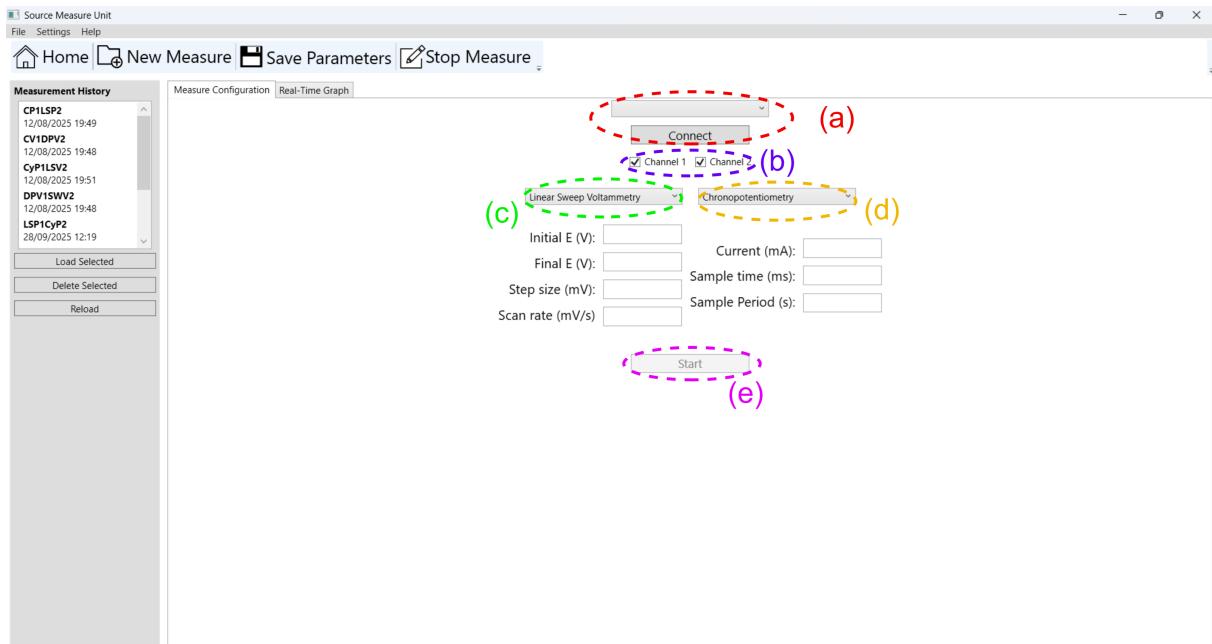
Fonte: Autoria própria (2025).

Na aba “New Measure” (Figura 37), o usuário define a conexão com o microcontrolador e os parâmetros das medições. Na parte superior da tela, é possível selecionar a porta serial correspondente ao dispositivo SMU e estabelecer a comunicação com o microcontrolador através do botão Connect.

Na sequência, o usuário seleciona o modo de operação da medição, optando entre o Canal 1, Canal 2 ou o modo *Dual-Channel*. Em seguida, é possível escolher a técnica eletroquímica desejada e definir seus parâmetros específicos de execução - os campos de entrada correspondentes só são exibidos após a seleção da técnica.

Após a configuração completa, o botão Start inicia a medição, e o *software* redireciona automaticamente para a aba “Real-Time Graph”, onde os resultados são apresentados graficamente em tempo real.

Figura 37 – Tela “New Measure” da interface de controle: (a) seleção da porta serial e botão de conexão com o dispositivo SMU; (b) seleção do canal de operação (Canal 1, Canal 2 ou *Dual-Channel*); (c) seleção da técnica e configuração dos parâmetros do Canal 1; (d) seleção da técnica e configuração dos parâmetros do Canal 2; (e) botão de início da medição.



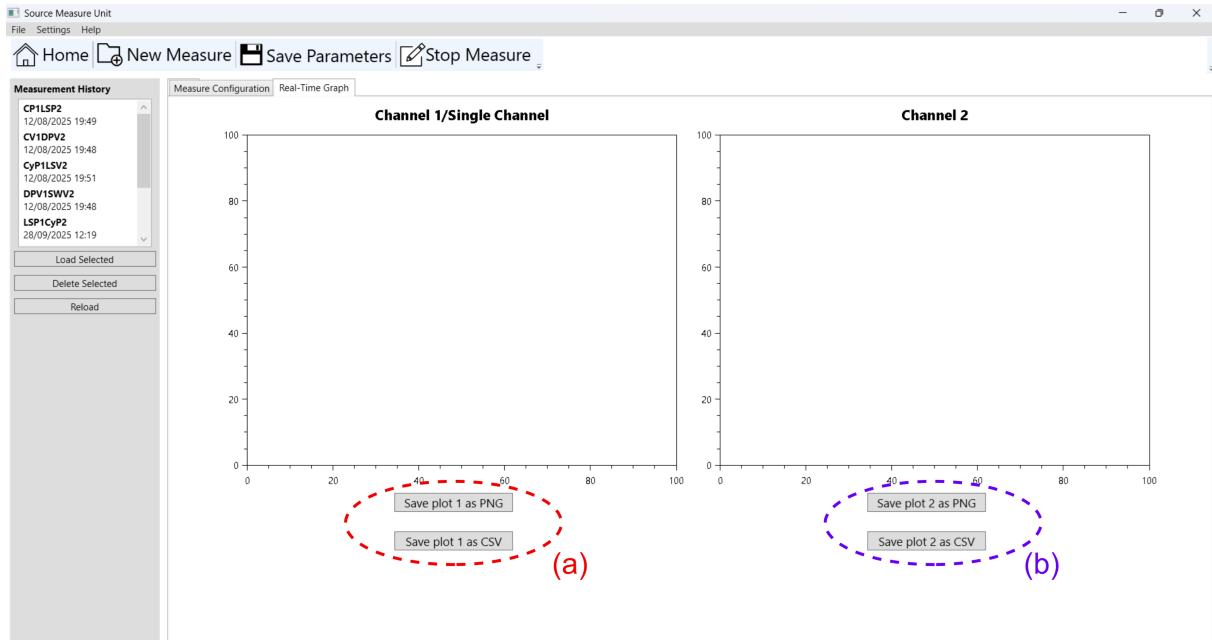
Fonte: Autoria própria (2025).

Na tela “Real-Time Graph” (Figura 38), a interface apresenta dois gráficos independentes, correspondentes ao canal 1 e ao canal 2, implementados por meio da biblioteca OxyPlot, que permite a atualização contínua dos pontos de medição.

No modo Single-Channel, apenas o gráfico do Canal 1 é utilizado, enquanto no modo *Dual-Channel*, ambos os gráficos são atualizados simultaneamente, permitindo a visualização comparativa das respostas dos dois canais.

Abaixo dos gráficos, há botões de exportação individual dos resultados nos formatos CSV e PNG. Ao selecionar uma dessas opções, o *software* abre uma janela *pop-up* que permite ao usuário escolher o diretório de destino para o salvamento local dos arquivos.

Figura 38 – Tela “Real-Time Graph” da interface de controle: (a) botões para exportação dos resultados do Canal 1 nos formatos CSV e PNG; (b) botões equivalentes para exportação dos resultados do Canal 2. Os gráficos exibem as curvas de medição em tempo real para cada canal.



Fonte: Autoria própria (2025).

5.2.3.2 INTERFACE EMBARCADA DWIN

A interface embarcada do equipamento foi desenvolvida com o *display* DWIN DMG80480C070_04WTC, responsável por permitir a operação autônoma do instrumento sem necessidade de conexão com o computador. A tela comunica-se com o microcontrolador STM32 via UART, utilizando o protocolo DGUS II.

A Figura 39 apresenta a organização visual das páginas da interface desenvolvida. O fluxo de navegação segue uma lógica hierárquica, iniciando na tela principal e se ramificando conforme a técnica selecionada. O fluxo de navegação é controlado pelo microcontrolador, como já explicado na subseção 5.2.2.3 e subseção 5.2.2.4.

Figura 39 – Páginas da interface embarcada DWIN desenvolvida.

Dual Channel SMU		Voltammetry	Galvanostat												
Channel 1	Channel 2														
00			01												
		<input type="button" value="LSV"/> <input type="button" value="CP"/> <input type="button" value="CV"/> <input type="button" value="LSP"/> <input type="button" value="DPV"/> <input type="button" value="CyP"/> <input type="button" value="SWV"/>	<input type="button" value="Back"/>												
Linear Sweep Voltammetry Initial Voltage (V) <input type="text"/> Final Voltage (V) <input type="text"/> Step Size (mV) <input type="text"/> Scan Rate (mV/s) <input type="text"/>		Cyclic Voltammetry Initial E (V) <input type="text"/> Peak 1 E (V) <input type="text"/> Peak 2 E (V) <input type="text"/> Final E (V) <input type="text"/> Step Size (mV) <input type="text"/> Scan Rate (mV/s) <input type="text"/>	<input type="button" value="Back"/> <input type="button" value="Start"/>												
02		03	<input type="button" value="Back"/> <input type="button" value="Start"/>												
Differential Pulse Voltammetry Initial E (V) <input type="text"/> Final E (V) <input type="text"/> Step Size (mV) <input type="text"/> Pulse E (mV) <input type="text"/> Pulse time (ms) <input type="text"/> Base time (ms) <input type="text"/>		Square Wave Voltammetry Initial E (V) <input type="text"/> Final E (V) <input type="text"/> Step Size (mV) <input type="text"/> Amplitude (mV) <input type="text"/> Frequency (Hz) <input type="text"/>	<input type="button" value="Back"/> <input type="button" value="Start"/>												
04		05	<input type="button" value="Back"/> <input type="button" value="Start"/>												
Chronopotentiometry Current (mA) <input type="text"/> Sample Time (s) <input type="text"/> Sample Period (s) <input type="text"/>		Linear Sweep Potentiometry Initial I (mA) <input type="text"/> Final I (mA) <input type="text"/> Step Size (mA) <input type="text"/> Scan Rate (mA/s) <input type="text"/>	<input type="button" value="Back"/> <input type="button" value="Start"/>												
06		07	<input type="button" value="Back"/> <input type="button" value="Start"/>												
Cyclic Potentiometry Initial I (mA) <input type="text"/> Peak 1 I (mA) <input type="text"/> Peak 2 I (mA) <input type="text"/> Final I (mA) <input type="text"/> Step Size (mA) <input type="text"/> Scan Rate (mA/s) <input type="text"/>		Edit <input type="text"/> <table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr> <tr><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr> <tr><td>.</td><td>0</td><td>-</td></tr> </table> <input type="button" value="X"/> <input type="button" value="Enter"/>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	.	0	-	09
1	2	3													
4	5	6													
7	8	9													
.	0	-													
08															
Galvanostat Applied current <input type="text"/> Measured Voltage <input type="text"/>		Potentiostat Applied voltage <input type="text"/> Measured current <input type="text"/>	11												
10															

Fonte: Autoria própria (2025).

6 RESULTADOS

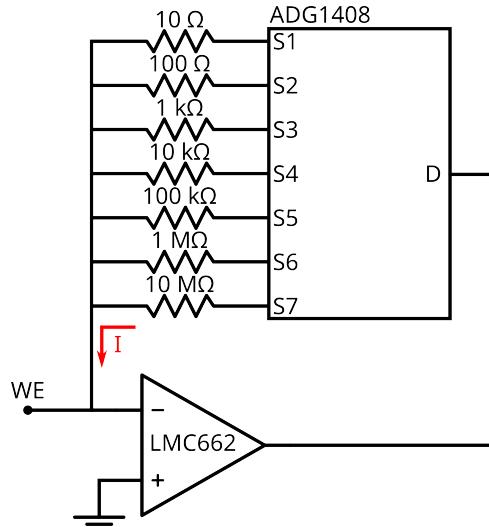
O presente capítulo reúne os resultados experimentais obtidos com o protótipo da SMU desenvolvida, abrangendo os modos galvanostato e potenciómetro. Todas as medições apresentadas foram realizadas por meio do software para PC desenvolvido para o equipamento. Os resultados são organizados em três partes: (i) verificações experimentais e ajustes de *hardware* necessários para o correto funcionamento do protótipo; (ii) caracterização do modo galvanostato; e (iii) caracterização do modo potenciómetro.

6.1 VERIFICAÇÕES EXPERIMENTAIS E AJUSTES DE HARDWARE

Durante a fase de testes do protótipo foram identificados comportamentos incompatíveis com o funcionamento esperado do amperímetro e do estágio de potência. Essas não conformidades estavam associadas a detalhes de projeto da PCB e foram corrigidas manualmente por meio de rompimento de trilhas e adição de *jumpers*. As principais adaptações são descritas a seguir.

A primeira correção relevante diz respeito ao circuito de seleção das resistências de realimentação do amperímetro, implementado por meio do multiplexador analógico ADG1408. No layout original, ilustrado na Figura 40, cada resistor de realimentação estava conectado entre um terminal individual (S1–S7) e a entrada inversora do LMC662, enquanto o terminal comum D permanecia ligado à saída do amplificador. Essa disposição fazia com que os canais não selecionados do ADG1408, mesmo estando abertos, injetassem correntes parasitas. Como esses canais estavam diretamente conectados à entrada inversora, tais correntes deslocavam esse nó para aproximadamente $-0,6\text{ V}$, rompendo o curto-círcuito virtual e impedindo o funcionamento correto do transimpedânci. Dessa forma, o amperímetro tornava-se incapaz de operar de forma estável, independentemente do resistor de realimentação selecionado.

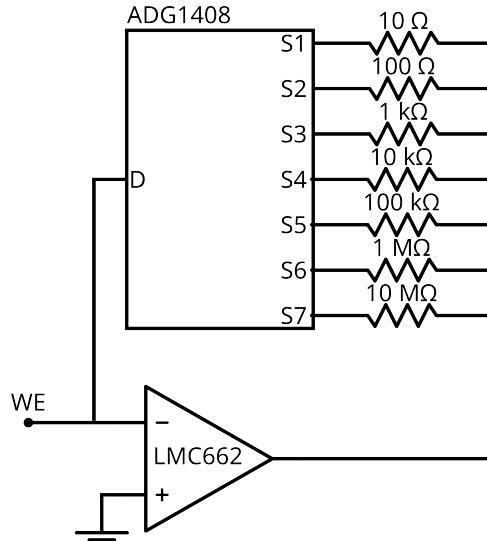
Figura 40 – Configuração original do ADG1408, na qual canais não ativos injetavam corrente parasita na entrada inversora do LMC662, inviabilizando o funcionamento do transimpedânci.



Fonte: Autoria própria (2025)

A correção adotada consistiu em inverter a topologia de conexão do multiplexador, de forma que o terminal comum D passasse a ser ligado diretamente à entrada inversora do LMC662, enquanto cada resistor de realimentação foi realocado para um dos terminais individuais S1–S7, conforme mostrado na Figura 41. Essa reorganização eliminou o caminho de fuga que permitia a injeção de correntes parasitas provenientes dos canais não selecionados, preservando o curto-circuito virtual do amplificador operacional. A implementação prática da correção exigiu o rompimento de trilhas na placa e a instalação de *jumpers* para reencaminhar as conexões, resultando em um funcionamento estável do amperímetro.

Figura 41 – Configuração corrigida do ADG1408, com o terminal D ligado à entrada inversora e os resistores realocados para S1-S7.



Fonte: Autoria própria (2025)

Foi também detectado um defeito crítico no layout referente ao transistor TIP127 utilizado no estágio de potência. No projeto original, os terminais do TIP127 estavam invertidos (coletores e emissores trocados), o que impedia o funcionamento correto do dispositivo. Em consequência, o estágio de potência deixava de operar completamente, afetando tanto a fonte de corrente quanto a fonte de tensão, o circuito não fornecia a corrente ou a tensão esperadas quando o TIP127 permanecia na posição invertida. Para contornar o problema durante a validação experimental, o TIP127 foi isolado da PCB e remontado externamente em uma *protoboard*, com conexões feitas por meio de *jumpers* soldados na placa. Essa solução provisória restaurou a operação dos estágios de potência.

As escalas de $10\ \Omega$ e $100\ \Omega$ do amperímetro apresentaram comportamento incoerente, caracterizado pela perda do curto-círcuito virtual na entrada inversora do LMC662 e pela geração de respostas instáveis. Os sinais observados indicaram que a entrada inversora era deslocada para uma tensão não nula, impedindo o funcionamento adequado do amplificador de transimpedância. Como não foi possível estabilizar essas duas escalas de forma reproduzível, optou-se por excluí-las da análise experimental.

Por fim, o consumo de corrente da SMU também foi monitorado durante os ensaios. Em condição de repouso, o sistema apresentou consumo aproximado de 130 mA, enquanto durante as varreduras esse valor aumentou para até cerca de 190 mA, dependendo da potência demandada em cada medida.

6.2 CARACTERIZAÇÃO DO GALVANOSTATO

Para a avaliação do desempenho do galvanostato foram conduzidos três experimentos:
 (i) extração das curvas V-I de cinco resistores comerciais com dez repetições, a fim de

observar a linearidade e repetibilidade; (ii) obtenção de uma curva V-I de um resistor de $4,7\ \Omega$ utilizando o menor passo de corrente disponível, para caracterizar a resolução efetiva do sistema; e (iii) extração de curvas I-V de dispositivos semicondutores (fotodiodo, diodo e LEDs).

No primeiro experimento, aplicou-se uma varredura de $-10\ \text{mA}$ a $+10\ \text{mA}$ com passo de $50\ \mu\text{A}$ nos resistores de $1\ \Omega$, $4,7\ \Omega$, $33\ \Omega$, $670\ \Omega$ e $4,7\ \text{k}\Omega$, cada um medido dez vezes. As curvas obtidas são apresentadas na Figura 43, enquanto a Tabela 4 resume os valores médios de resistência, erros percentuais em relação aos valores nominais, desvios padrão médios das tensões e coeficientes de determinação (R^2). O diagrama de conexão para a medida dos resistores pode ser conferido na Figura 42a.

Para o resistor de $1\ \Omega$, obteve-se resistência média de $1,009\ \Omega$, com erro relativo de $0,97\%$, compatível com a tolerância nominal de 5% . O desvio padrão médio das tensões foi de $33,2\ \mu\text{V}$, indicando que a dispersão entre as dez repetições permaneceu na ordem de poucas dezenas de microvolts. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,999541$) confirma elevada linearidade ao longo de toda a faixa de corrente aplicada.

Para o resistor de $4,7\ \Omega$, a resistência média medida foi de $4,534\ \Omega$, com erro relativo de $3,51\%$, também compatível com a tolerância de fabricação. O desvio padrão médio foi de $24,9\ \mu\text{V}$ (o menor entre todos os dispositivos avaliados) evidenciando excelente repetibilidade. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,999833$) mostra que a relação $V-I$ permanece fortemente linear.

No resistor de $33\ \Omega$, a resistência medida foi de $31,275\ \Omega$, com erro percentual de $5,23\%$, levemente acima da faixa de tolerância. O desvio padrão médio ($31,6\ \mu\text{V}$) manteve-se próximo ao observado nos resistores de menor valor, demonstrando estabilidade mesmo para tensões maiores. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,999840$) indica que a linearidade praticamente não se altera.

Para o resistor de $670\ \Omega$, a resistência média obtida foi de $629,8\ \Omega$ (erro de $5,99\%$). O desvio padrão médio subiu para $481\ \mu\text{V}$ devido à maior amplitude de tensão medida. Parte da curva apresentou saturação acima de aproximadamente $\pm 8\ \text{mA}$, decorrente da limitação do estágio de potência. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,999799$) permanece elevado nos trechos não saturados.

Por fim, o resistor de $4,7\ \text{k}\Omega$ apresentou resistência média de $4,296\ \text{k}\Omega$ (erro de $8,60\%$). O desvio padrão médio ($3,36\ \text{mV}$) foi o maior entre todos os resistores, consequência direta da grande amplitude de tensão envolvida. Saturação ocorreu ao atingir $\pm 10\ \text{V}$, limite máximo do voltímetro, mas os trechos não saturados exibiram linearidade consistente ($R^2 = 0,998988$).

Os resultados evidenciam que todos os resistores avaliados apresentaram relação V-I altamente linear, com coeficientes de determinação próximos de 1. Para aqueles que permaneceram integralmente dentro da faixa de *compliance* do galvanostato, a linearidade foi mantida em toda a varredura de corrente. A repetibilidade, avaliada pelo desvio

padrão médio das tensões entre repetições, confirmou a estabilidade do conjunto fonte de corrente-voltímetro ao longo das medições.

Nos resistores de maior valor, o aumento do desvio padrão decorreu principalmente da maior amplitude de tensão medida, sem indicar degradação intrínseca do instrumento. A saturação observada em $4,7\text{ k}\Omega$ é consistente com os limites de entrada do voltímetro, enquanto a saturação precoce no resistor de $670\ \Omega$ evidencia que o estágio de potência atinge seu limite próximo de $\pm 35\text{ mW}$, caracterizando o ponto máximo de potência útil do galvanostato.

Figura 42 – Diagrama de conexão utilizado nos ensaios de caracterização do galvanostato: a) configuração para medição de resistores; b) configuração para medição do fotodiodo, diodo e LEDs.

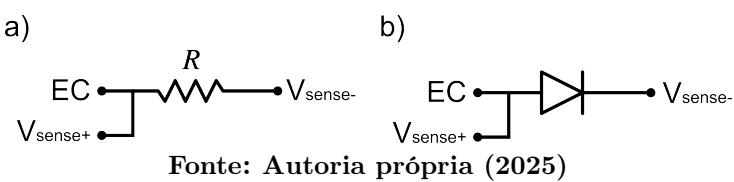
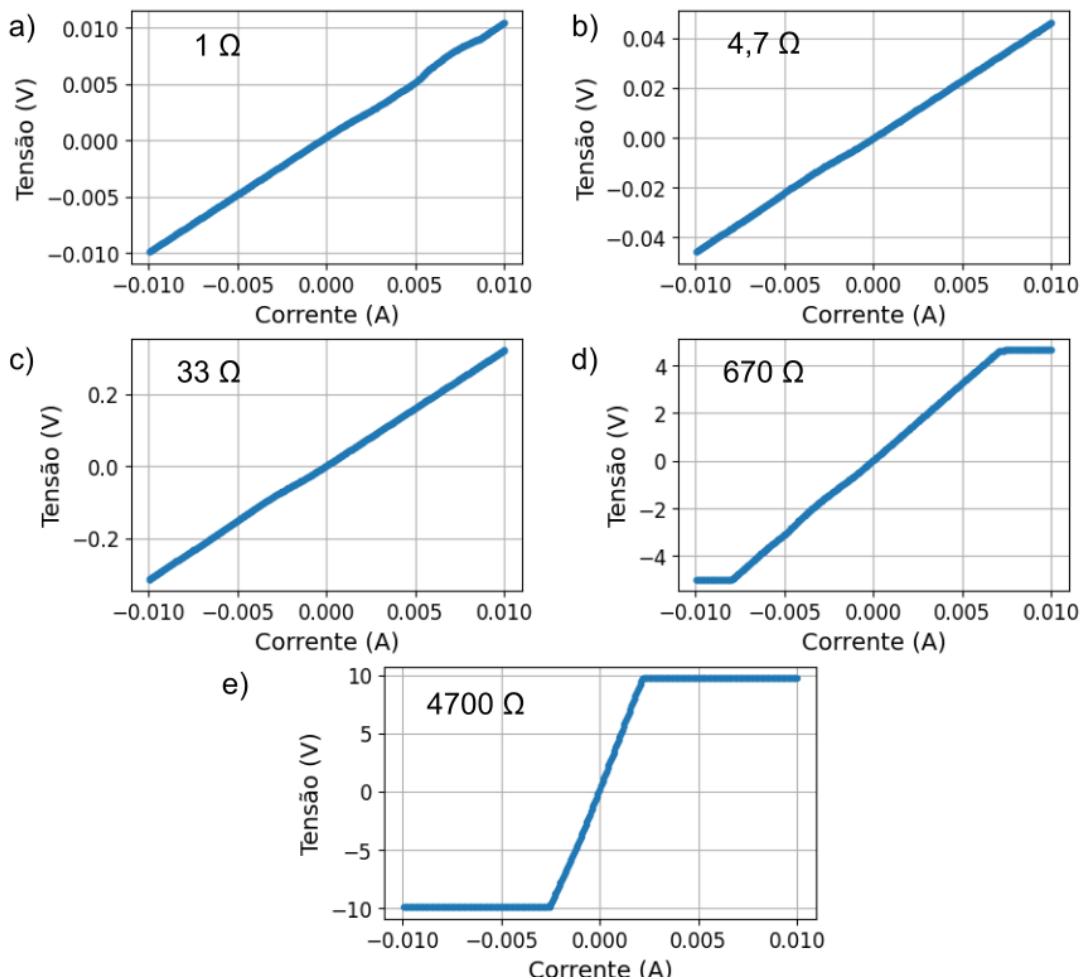


Figura 43 – Curvas V–I obtidas pelo galvanostato para cinco resistores comerciais submetidos a uma varredura de -10 mA a $+10 \text{ mA}$, com passo de $50 \mu\text{A}$, com dez repetições: a) 1Ω ; b) $4,7 \Omega$; c) 33Ω ; d) 670Ω ; e) $4,7 \text{ k}\Omega$.



Fonte: Autoria própria (2025)

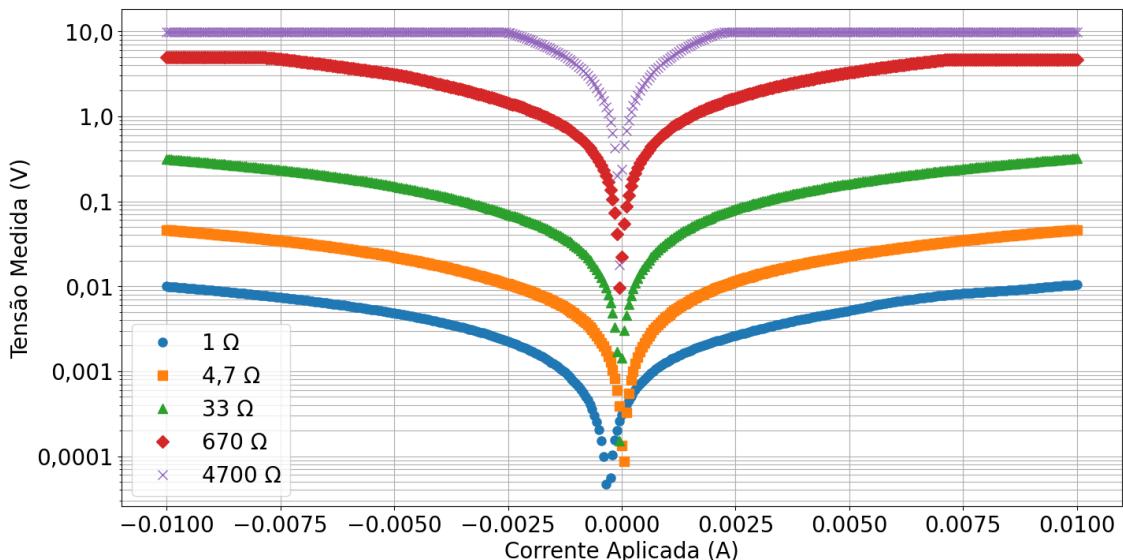
Tabela 4 – Estatísticas das medições realizadas no modo galvanostato: desvio padrão médio (média dos desvios padrão calculados ponto-a-ponto entre repetições), resistência calculada por regressão linear, erro percentual relativo ao valor nominal e valor médio de R^2 obtido em dez repetições para cada resistor.

Resistor (Ω)	Desvio padrão médio (V)	Resistência calculada (Ω)	Erro percentual (%)	R^2 médio
1	$33,238 \mu$	1,009	0,970	0,999541
4,7	$24,926 \mu$	4,534	-3,512	0,999833
33	$31,597 \mu$	31,275	-5,227	0,999840
670	$481,013 \mu$	629,819	-5,997	0,999799
4,7 k	3,363 m	4295,976	-8,596	0,998988

Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 44 apresenta as mesmas curvas de corrente mostradas anteriormente, agora em escala logarítmica, o que permite examinar com maior clareza tanto a faixa dinâmica de medição quanto o comportamento das curvas nas proximidades do ponto de cruzamento pelo zero. Nessa representação, observa-se um deslocamento em relação ao ponto $(0, 0)$, mais evidente no resistor de $1\ \Omega$, cuja corrente apresenta um *offset* de aproximadamente $300\ \mu\text{A}$ na região próxima de zero volt. Esse deslocamento caracteriza um erro de acurácia do potenciómetro, manifestando-se predominantemente quando a corrente nominal se aproxima do limite inferior de medição. Além disso, a escala logarítmica evidencia a precisão e a resolução efetiva do sistema ao longo de toda a faixa avaliada, permitindo visualizar a transição contínua entre diferentes ordens de magnitude de corrente.

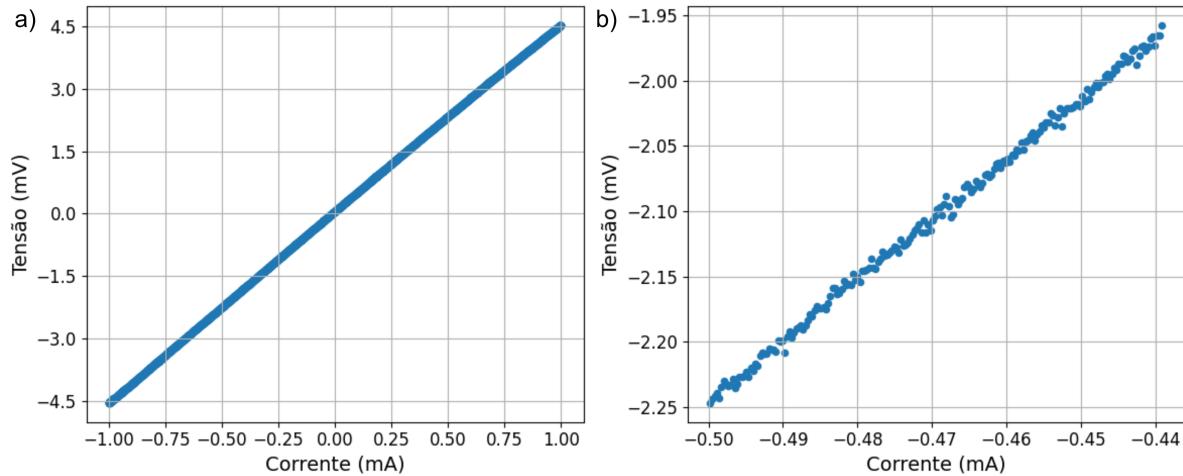
Figura 44 – Curvas V–I em escala logarítmica para os cinco resistores avaliados, destacando o comportamento próximo ao ponto de cruzamento pelo zero.



Fonte: Autoria própria (2025)

Para avaliar a resolução efetiva do sistema, realizou-se uma varredura de $-1\ \text{mA}$ a $+1\ \text{mA}$ em um resistor de $4,7\ \Omega$, utilizando o passo mínimo teórico da fonte de corrente ($0,305\ \mu\text{A}$) e cinco repetições. A Figura 45a apresenta a curva completa, enquanto a Figura 45b mostra um recorte ampliado da região entre $-0,50\ \text{mA}$ e $-0,44\ \text{mA}$. A análise do trecho ampliado revela que o voltímetro é capaz de resolver variações de tensão na faixa de aproximadamente $50\ \mu\text{V}$, enquanto a fonte de corrente demonstra uma resolução efetiva próxima de $1\ \mu\text{A}$.

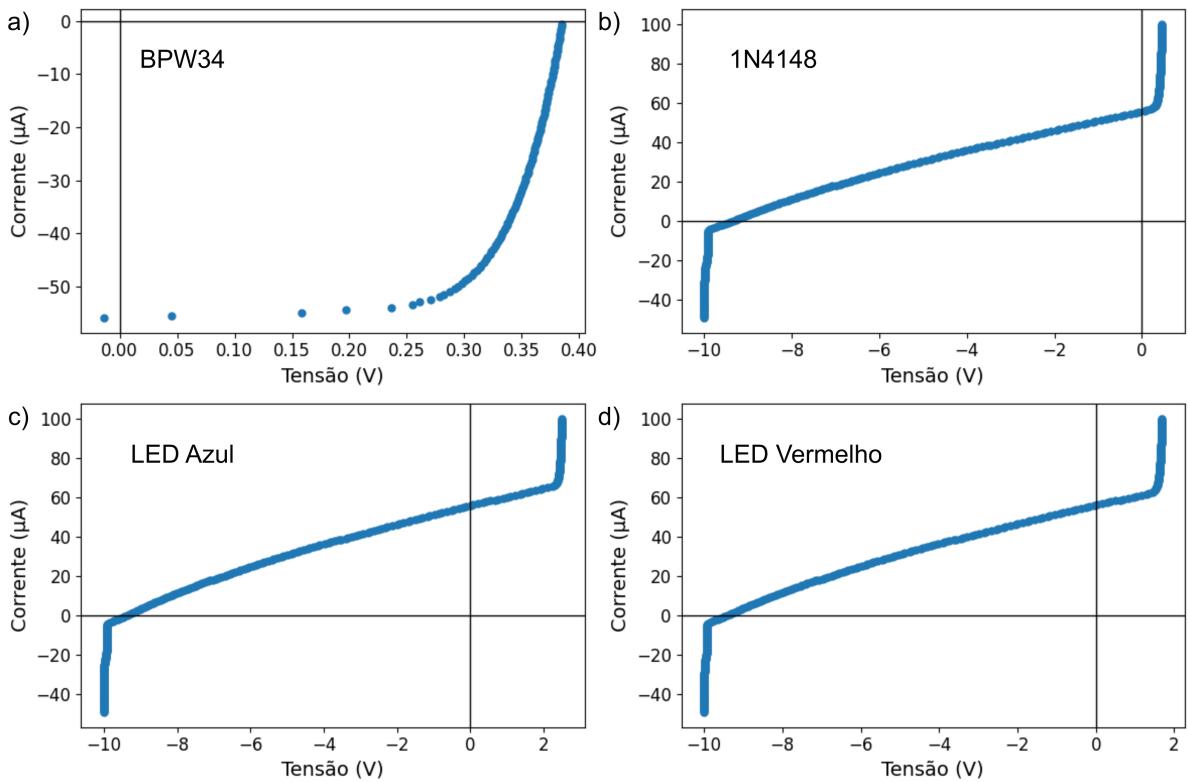
Figura 45 – Medição do resistor de $4,7\ \Omega$ com o menor passo de corrente ($0,305\ \mu\text{A}$):
a) curva completa; b) ampliação da região entre $-0,50\ \text{mA}$ e $-0,44\ \text{mA}$.



Fonte: Autoria própria (2025)

Por fim, foram obtidas curvas I – V de quatro dispositivos semicondutores: o fotodiodo BPW34, o diodo 1N4148 e dois LEDs (vermelho e azul). Os resultados, apresentados na Figura 46, evidenciam o comportamento característico de cada componente. Para o BPW34, verificou-se uma tensão de circuito aberto (V_{OC}) de aproximadamente 0,38 V e uma corrente de curto-círcuito (I_{SC}) de cerca de 55 μA sob iluminação ambiente. Nos dispositivos retificadores e emissores de luz, as tensões limiares de condução ($V_{D,on}$) foram estimadas a partir da interseção da reta tangente ao trecho de condução com o eixo de tensão. Obtiveram-se valores de aproximadamente 0,35 V para o diodo 1N4148, 1,6 V para o LED vermelho e 2,4 V para o LED azul, todos consistentes com as características típicas desses componentes. O diagrama de conexão para realização destas medidas pode ser conferido na Figura 42b.

Figura 46 – Curvas I–V dos dispositivos semicondutores avaliados: a) fotodiodo BPW34; b) diodo 1N4148; c) LED azul; d) LED vermelho.



Fonte: Autoria própria (2025)

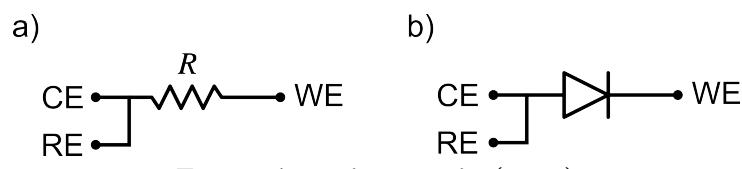
6.3 CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIOSTATO

A avaliação do modo potencioscopia foi realizada por meio de quatro conjuntos de medições: (i) extração de curvas corrente-tensão de cinco resistores comerciais utilizando os resistores de realimentação do amperímetro individualmente; (ii) visualização das mesmas curvas em escala logarítmica, a fim de evidenciar a faixa de medição de corrente; (iii) obtenção de uma varredura completa com a troca automática dos resistores de realimentação; e (iv) comparação da curva I-V de um diodo 1N5819 medida pela SMU desenvolvida e por um equipamento comercial Keithley 2614B.

A Figura 48 apresenta as curvas obtidas para os resistores de $4,7\text{ k}\Omega$, $41,2\text{ k}\Omega$, $470\text{ k}\Omega$, $4,7\text{ M}\Omega$ e $22,4\text{ M}\Omega$, a partir de uma varredura de tensão aplicada de -5 V a $+5\text{ V}$ com passo de 50 mV . A Tabela 5 resume os valores médios estimados de resistência, os erros percentuais em relação aos valores nominais e os desvios padrão médios das correntes para cinco repetições em cada resistor. Em todos os casos, o comportamento corrente-tensão apresentou elevada linearidade, com coeficientes de determinação superiores a 0,9994, indicando que a tensão aplicada pelo potencioscópio resultou em correntes proporcionais ao valor da resistência ensaiada. Os valores estimados de resistência permaneceram próximos dos valores nominais, com erros percentuais que variaram de 0,03% a 8,49%.

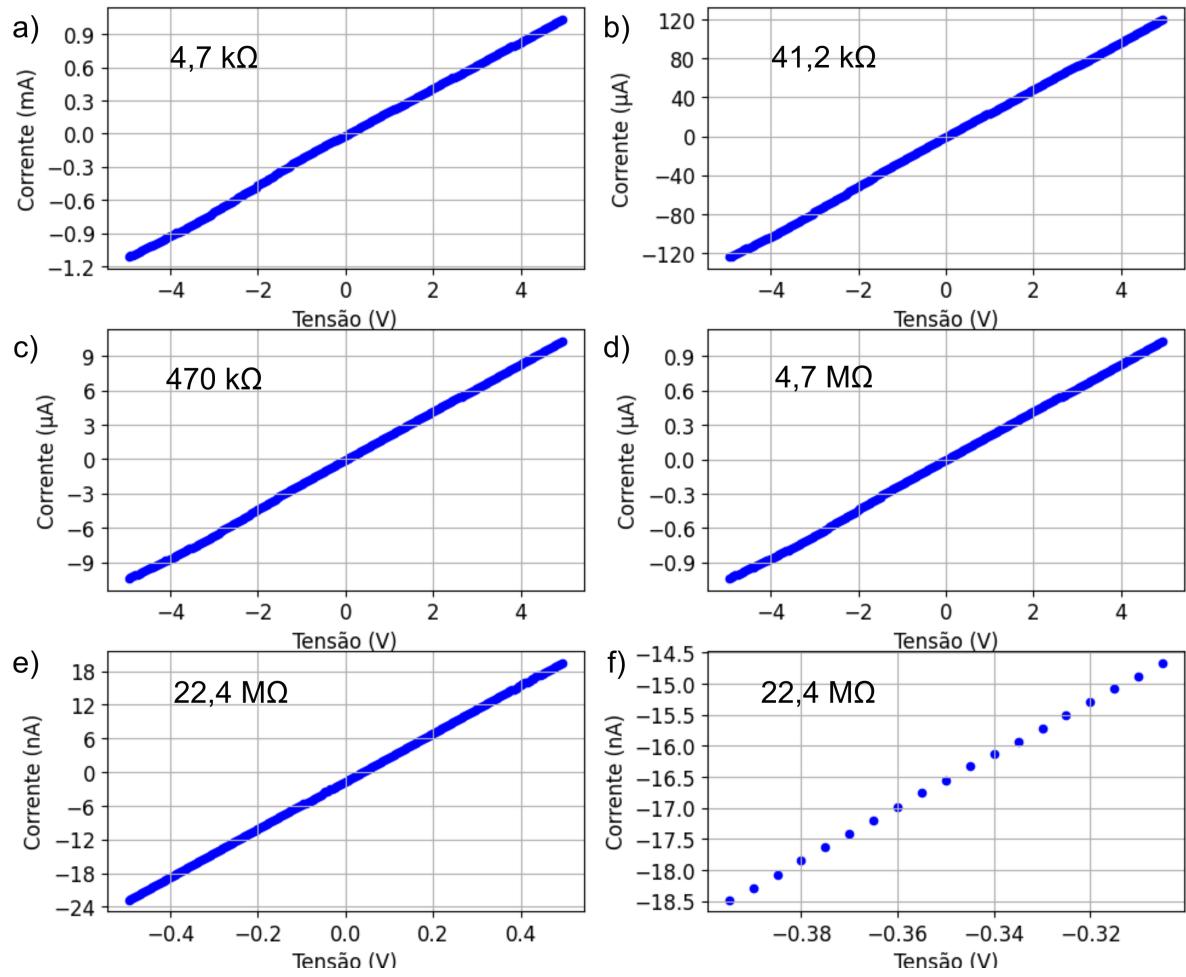
Os desvios padrão médios das correntes apresentam variações coerentes com as amplitudes de corrente associadas a cada resistor. Para resistores até a ordem de megohms, os desvios permaneceram na faixa de nanoampères a décimos de microampère, enquanto para o resistor de $22,4\text{ M}\Omega$ o valor médio caiu para aproximadamente 240 pA. Esse comportamento reflete as pequenas correntes envolvidas na medição desse resistor. A Figura 48f, correspondente a um recorte da curva do resistor de $22,4\text{ M}\Omega$, ilustra que diferenças consecutivas de corrente da ordem de cerca de 250 pA puderam ser distinguidas, caracterizando a resolução efetiva atingida pelo amperímetro nas condições utilizadas. O diagrama de conexão para a medida dos resistores pode ser conferido na Figura 47a.

Figura 47 – Diagrama de conexão utilizado nos ensaios de caracterização do potenciostato: a) configuração para medição de resistores; b) configuração para medição do diodo.



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 48 – Curvas I–V obtidas pelo potenciómetro para resistores comerciais de diferentes valores, utilizando varredura de -5 V a $+5\text{ V}$ com passo de 50 mV : a) $4,7\text{ k}\Omega$, leitura de corrente com $R_{\text{feedback}} = 1\text{ k}\Omega$; b) $41,2\text{ k}\Omega$, $R_{\text{feedback}} = 10\text{ k}\Omega$; c) $470\text{ k}\Omega$, $R_{\text{feedback}} = 100\text{ k}\Omega$; d) $4,7\text{ M}\Omega$, $R_{\text{feedback}} = 1\text{ M}\Omega$; e) $22,4\text{ M}\Omega$, $R_{\text{feedback}} = 10\text{ M}\Omega$; f) ampliação da região do resistor de $22,4\text{ M}\Omega$.



Fonte: Autoria própria (2025)

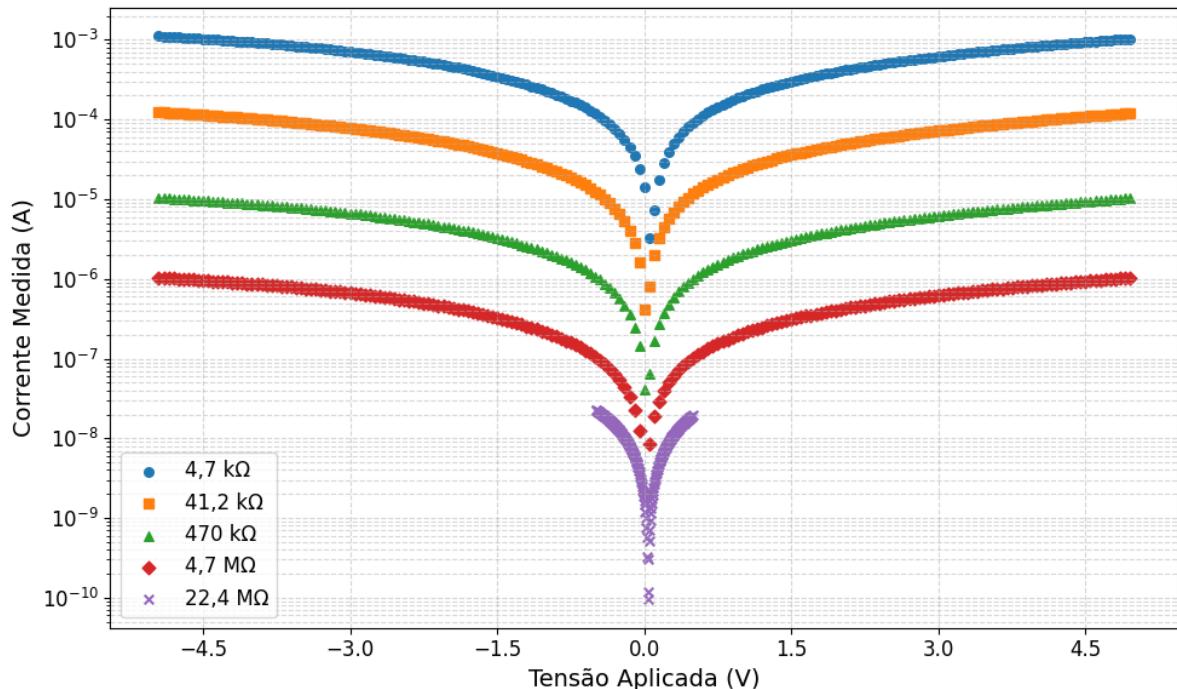
Tabela 5 – Estatísticas das medições realizadas no modo potenciómetro: desvio padrão médio (média dos desvios padrão calculados ponto-a-ponto entre repetições), resistência calculada por regressão linear, erro percentual relativo ao valor nominal e valor médio de R^2 obtido em cinco repetições para cada resistor.

Resistor (Ω)	Desvio padrão médio (A)	Resistência calculada (Ω)	Erro percentual (%)	R^2 médio
4,7 k	1,649 u	4,539 k	-3,41	0,999421
41,2 k	0,119 u	40,353 k	-2,06	0,999735
470 k	9,834 n	471,768 k	0,38	0,999772
4,7 M	1,735 n	4,698 M	-0,03	0,999754
22,4 M	240,210 p	24,302 M	8,49	0,999987

Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 49, apresentada em escala logarítmica, permite visualizar de forma contínua a resposta das diferentes faixas de medição de corrente durante a varredura de tensão. As curvas associadas a cada resistor permanecem claramente separadas ao longo de toda a faixa de operação, refletindo a coerência entre a corrente medida e a resistência conectada. Nas proximidades de zero volt, as curvas convergem devido à redução natural da corrente imposta pela própria relação $I = V/R$, sem apresentar descontinuidades. Observa-se ainda que o sistema mantém capacidade de leitura absoluta desde a faixa de centenas de picoampères até correntes próximas de 1 mA, cobrindo mais de seis ordens de grandeza.

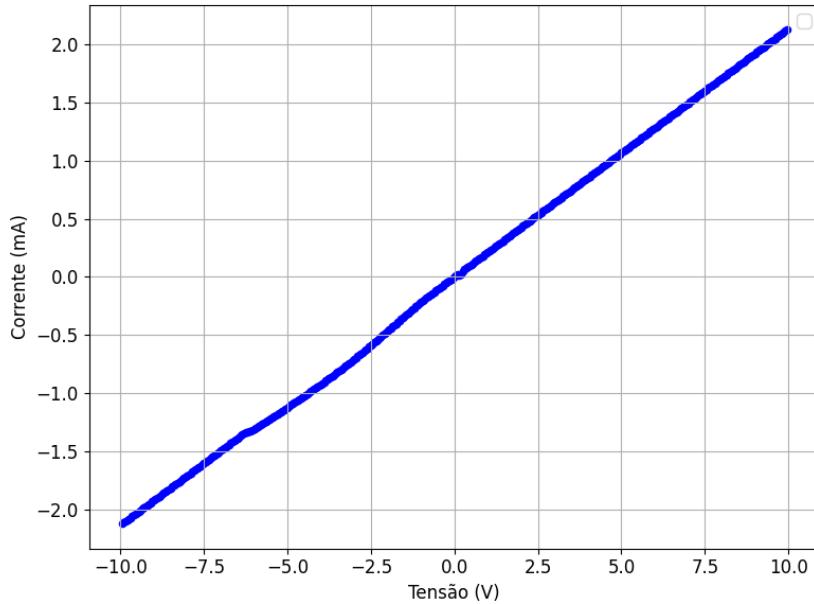
Figura 49 – Curva I-V para os cinco resistores avaliados ($4,7\text{ k}\Omega$, $41,2\text{ k}\Omega$, $470\text{ k}\Omega$, $4,7\text{ M}\Omega$ e $22,4\text{ M}\Omega$), apresentada em escala logarítmica no eixo da corrente.



Fonte: Autoria própria (2025)

A varredura completa exibida na Figura 50, realizada de -10 V a $+10\text{ V}$ com passo de 50 mV e com comutação automática dos resistores de realimentação do amperímetro, evidencia que a troca entre escalas ocorreu de forma contínua ao longo de toda a medida. Para o resistor de $4,7\text{ k}\Omega$, essa varredura de tensão resultou em correntes na faixa de aproximadamente -2 mA a $+2\text{ mA}$, sem descontinuidades visíveis ou variações inesperadas na inclinação da curva, indicando operação adequada do algoritmo de seleção de ganho. A resistência estimada a partir da curva completa foi de $4623\text{ }\Omega$, correspondente a um erro percentual de $1,65\%$ em relação ao valor nominal.

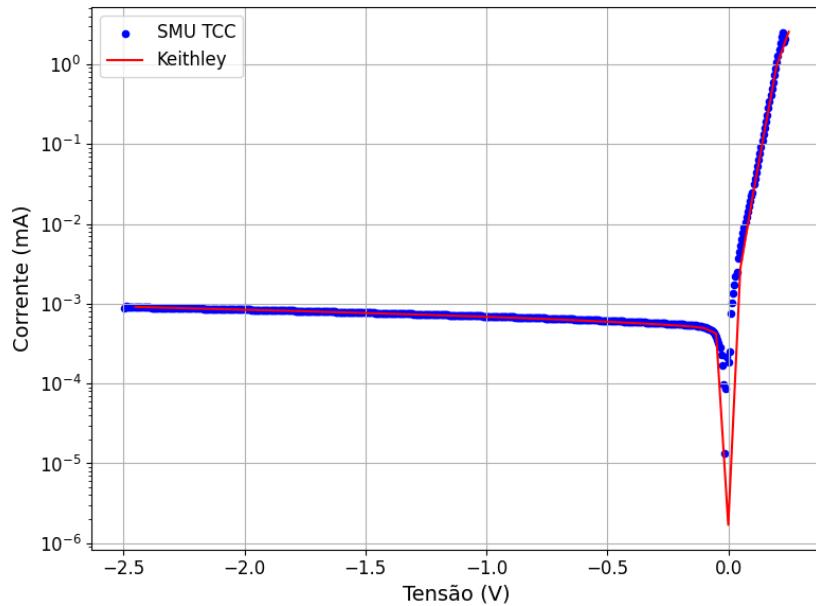
Figura 50 – Curva I-V de um resistor de $4,7\text{ k}\Omega$, obtido com varredura de tensão de -10 V a 10 V com passo de 50 mV e comutação automática das escalas do amperímetro.



Fonte: Autoria própria (2025)

Por fim, a comparação entre a SMU desenvolvida e o equipamento Keithley 2614B, apresentada na Figura 51, evidencia a concordância entre as curvas I-V medidas para o diodo 1N5819. A região direta, o ponto de joelho e a inclinação da curva mostraram correspondência consistente entre os dois instrumentos, indicando que o modo potenciosístato da SMU reproduziu adequadamente o comportamento característico do dispositivo. O diagrama de conexão para a medida do 1N5819 pode ser conferido na Figura 47b.

Figura 51 – Comparação das curvas I–V do diodo 1N5819 medidas pela SMU desenvolvida e pelo Keithley 2614B. Varredura de −2,5 V a 0,3 V (passo de 5 mV).



Fonte: Autoria própria (2025)

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de uma SMU de dois canais para medições elétricas e eletroquímicas, contemplando o projeto de hardware, firmware e interfaces gráficas, tanto embarcada quanto em computador. O equipamento foi projetado para operar como potenciómetro e galvanostato, realizando técnicas voltamétricas e galvanostáticas, além de possibilitar medições de dispositivos semicondutores e resistores em ampla faixa de operação.

Os resultados experimentais demonstraram que o protótipo alcançou desempenho satisfatório nas faixas de operação analisadas. No modo galvanostato, as curvas V-I apresentaram elevada linearidade, com coeficientes de determinação entre 0,9989 e 0,9998 para todos os resistores avaliados, além de repetibilidade consistente entre repetições. A caracterização de resolução mostrou que o sistema foi capaz de distinguir variações de corrente de aproximadamente 1 μ A e variações de tensão na ordem de 50 μ V. No modo potenciómetro, o equipamento demonstrou capacidade de leitura de corrente desde aproximadamente 240 pA até cerca de 2 mA, cobrindo mais de seis ordens de magnitude. As curvas obtidas apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,9994, e a comparação com o equipamento comercial Keithley 2614B mostrou boa concordância na caracterização do diodo 1N5819, evidenciando a funcionalidade do sistema em ampla faixa dinâmica.

Durante a fase experimental, algumas limitações foram identificadas, incluindo erros no design da placa de circuito impresso, comportamento inadequado nas escalas de 10 Ω e 100 Ω do amperímetro, e limitações de potência dos estágios de saída. Essas limitações foram contornadas sempre que possível por meio de correções manuais, permitindo dar continuidade à avaliação do protótipo. Ainda assim, o conjunto de resultados confirma que a arquitetura proposta é viável e que o sistema, mesmo em sua versão inicial, constitui uma solução funcional e de baixo custo. O custo total de desenvolvimento foi de R\$ 2.227,85, sendo R\$ 766,39 referentes exclusivamente a impostos, conforme detalhado no Apêndice B. Para fins de comparação, o equipamento comercial utilizado como referência, o Keithley 2614B, possui preço de aproximadamente US\$ 15.600 (equivalente a cerca de R\$ 84.552 na cotação do dia 8 de dezembro de 2025) segundo a distribuidora Newark, o que evidencia a expressiva diferença de custo entre a solução proposta e instrumentos profissionais disponíveis no mercado.

O projeto contou com apoio financeiro da UTFPR, por meio do EDITAL nº 14/2025 - Apoio a Trabalhos de Conclusão de Curso, que disponibilizou R\$ 500,00, valor essencial para aquisição de componentes e implementação do protótipo.

De forma geral, o trabalho evidencia que uma SMU, utilizando componentes acessíveis e microcontroladores de uso geral, pode ser implementada de forma eficiente. O desenvol-

vimento integrou conhecimentos de eletrônica analógica e digital, sistemas embarcados, aquisição de dados e instrumentação, consolidando competências adquiridas ao longo da graduação.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Diversas melhorias podem ser exploradas em versões futuras do equipamento, visando ampliar precisão, robustez e usabilidade:

- Implementação de média automática por ponto de medição: permitir que o usuário selecione o número de amostras por ponto, reduzindo o ruído e aumentando a repetibilidade das medições.
- Uso completo do PGA do ADS1262: a habilitação e calibração do amplificador de ganho programável possibilitará ampliar a sensibilidade do amperímetro e voltímetro.
- Correções no design da PCB: inclui reorganização definitiva da topologia do ADG1408 e correção da pinagem do TIP127.
- Aumento da capacidade de potência dos amplificadores de saída: adoção de estágios de potência mais robustos possibilitará ampliar a faixa de operação.

7.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento desta SMU demonstrou a aplicabilidade dos conhecimentos adquiridos ao longo da graduação em engenharia eletrônica, envolvendo desde conceitos de circuitos analógicos, sistemas embarcados e instrumentação até técnicas de programação e desenvolvimento de interfaces. O trabalho também reforça a possibilidade de criar equipamentos analíticos funcionais e de baixo custo, oferecendo ferramentas acessíveis para ensino e pesquisa em eletroquímica e caracterização elétrica. O protótipo resultante pode servir de base para aprimoramentos futuros e para o desenvolvimento de novas ferramentas experimentais, contribuindo para a democratização de dispositivos de instrumentação em ambientes acadêmicos.

REFERÊNCIAS

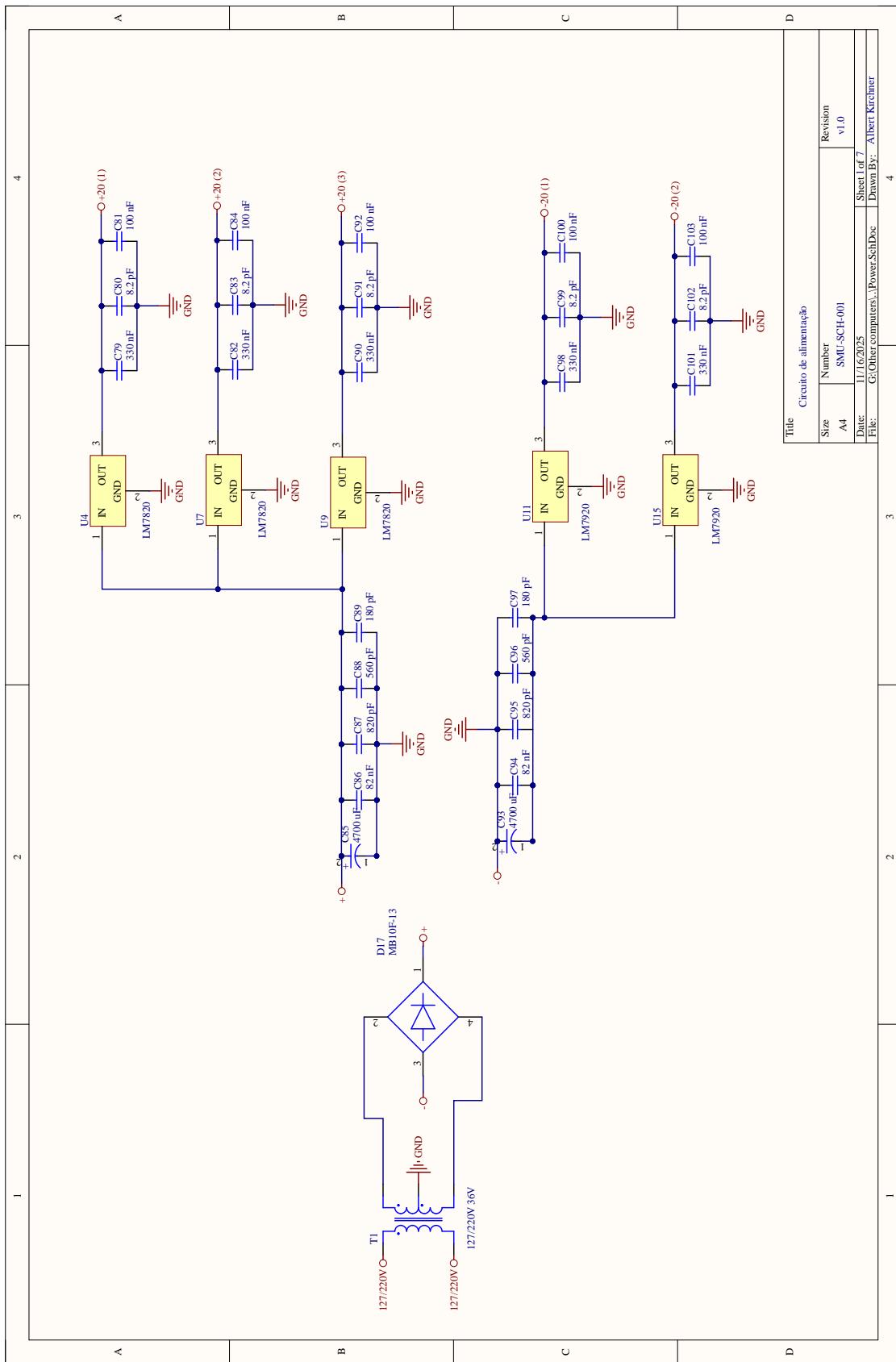
- ANALOG DEVICES. **ADG1408**. [S.l.], 2016. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG1408_1409.pdf>.
- BANNATYNE, R.; VIOT, G. **Introduction to Microcontrollers**. Schaumburg: Motorola, 1998. Transportation Systems Group, Consumer Systems Group.
- BARD, A. J.; FAULKNER, L. R. **Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications**. 2nd. ed. New York: Wiley, 2001. ISBN 978-0471043720.
- BRABEC, V. **Experimental Techniques in Bioelectrochemistry**. Berlin: Springer-Verlag, 1995. ISBN 9783540591344.
- DWIN TECHNOLOGY. **DMG80480C050_04WTC**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.dwin-global.com/5-inch-hmi-smart-lcdmodel-dmg80480c050_04wcommercial-grade-product/>.
- FLOYD, T. L. **Sistemas Digitais: Fundamentos e Aplicações**. 9. ed. São Paulo: Pearson, 2015. ISBN 9788576057976.
- GALANTI, A. M.; HAIDEKKER, M. A. Low-cost source measure unit (smu) to characterize sensors built on graphene-channel field-effect transistors. **Sensors**, v. 24, n. 12, p. 3841, 2024. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/24/12/3841>>.
- GAMRY INSTRUMENTS. **Potentiostat Fundamentals**. [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://www.gamry.com/assets/Application-Notes/Potentiostat-Fundamentals.pdf>>.
- GÜVEN, Y. et al. Understanding the concept of microcontroller based systems to choose the best hardware for applications. **Research Inveny: International Journal of Engineering And Science**, v. 7, p. 38, 12 2017.
- HARRAR, J. The potentiostat and the voltage clamp. **Electrochemical Society Interface**, v. 22, p. 42–44, 12 2013.
- HARVEY, D. **Modern Analytical Chemistry**. Boston: McGraw-Hill Education, 2000. ISBN 9780072375473.
- IRVING, P.; CECIL, R.; YATES, M. Mystat: A compact potentiostat/galvanostat for general electrochemistry measurements. **HardwareX**, v. 9, p. e00163, 2021. ISSN 2468-0672. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067220300729>>.
- IRVING, P.; CECIL, R.; YATES, M. Z. Mystat: A compact potentiostat/galvanostat for general electrochemistry measurements. **HardwareX**, v. 9, p. e00163, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00163>>.
- KEITHLEY. **Making Precision Low Current and High Resistance Measurements**. [S.l.], 2014.
- LEE, E. A. **Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach**. 2. ed. Cambridge: MIT Press, 2017. ISBN 9780262029556.

- MERCER, D. **What Is a Source Measurement Unit or SMU?** [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/studentzone/studentzone-december-2017.html>>.
- METROHM. **Basic overview of the working principle of a potentiostat/galvanostat (PGSTAT) – Electrochemical cell setup.** [S.l.], 2018.
- MORTUZA, A. et al. Pico-current measurement challenges and remedies: A review. **Universal Journal of Engineering Science**, v. 5, p. 57–63, 11 2017.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-Time Signal Processing**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. ISBN 9780131988421.
- PALMSENS. **Cross-reference techniques**. 2025. Accessed: 2025-01-11. Disponível em: <<https://www.palmsens.com/cross-reference-techniques/>>.
- PINE RESEARCH. **What is a Potentiostat and how does it work?** [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://pineresearch.com/shop/kb/theory/instrumentation/what-potentiostat-does/>>.
- PINE RESEARCH INSTRUMENTATION. **Chronopotentiometry (CP) - A Galvanostatic Method**. 2025. Accessed: 2025-01-11. Disponível em: <[https://pineresearch.com/shop/kb/software/methods-and-techniques/galvanostatic-methods/chronopotentiometry-cp/#:~:text=Chronopotentiometry%20\(CP\)%20is%20a%20galvanostatic%20method%20in%20which%20the%20current,chemical%20reaction%20mechanisms%20and%20kinetics](https://pineresearch.com/shop/kb/software/methods-and-techniques/galvanostatic-methods/chronopotentiometry-cp/#:~:text=Chronopotentiometry%20(CP)%20is%20a%20galvanostatic%20method%20in%20which%20the%20current,chemical%20reaction%20mechanisms%20and%20kinetics)>.
- SETTLE, F. A. (Ed.). **Handbook of Instrumental Techniques for Analytical Chemistry**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997. ISBN 9780131773387.
- SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Principles of Instrumental Analysis**. 6th. ed. Belmont, CA: Thomson Brooks/Cole, 2006. ISBN 9780495012016.
- SKOOG, D. A. et al. **Fundamentos de Química Analítica**. 8. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2006. ISBN 9788522105379.
- SNIZHKO, D. et al. Potentiostat design keys for analytical applications. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 936, p. 117380, 2023. ISSN 1572-6657. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1572665723002400>>.
- STMICROELECTRONICS. **STM32F401CCU6**. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f401cb.pdf>>.
- TEKTRONIX. **Low Level Measurements Handbook - 7th Edition: Precision DC Current, Voltage, and Resistance Measurements.** [S.l.], 2014. Disponível em: <<https://cdn.tmi.yokogawa.com/Understanding+Source+Measure+Unit+Specifications2.pdf>>.
- TEKTRONIX. **Keithley 2400 Standard Series SMU**. [S.l.], 2024. Disponível em: <<https://www.tek.com/en/products/keithley/source-measure-units/2400-standard-series-sourcemeter>>.
- TEMES, G.; CHEN, C.-H. **Incremental Data Converters for Sensor Interfaces**. New York: Springer, 2011. ISBN 9781441972385.

- TEXAS INSTRUMENTS. **DAC8760**. [S.l.], 2013. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac7760.pdf>>.
- TEXAS INSTRUMENTS. **ADS1262**. [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1262.pdf>>.
- TOCCI, R. J.; WIDMER, N. S.; MOSS, G. L. **Sistemas Digitais: Princípios e Aplicações**. 11. ed. São Paulo: Pearson, 2011. ISBN 9788588639796.
- ZUMBAHLEN, H. **Basic Linear Design**. [S.l.]: Analog Devices, Inc., 2007. ISBN 0-916550-28-1.

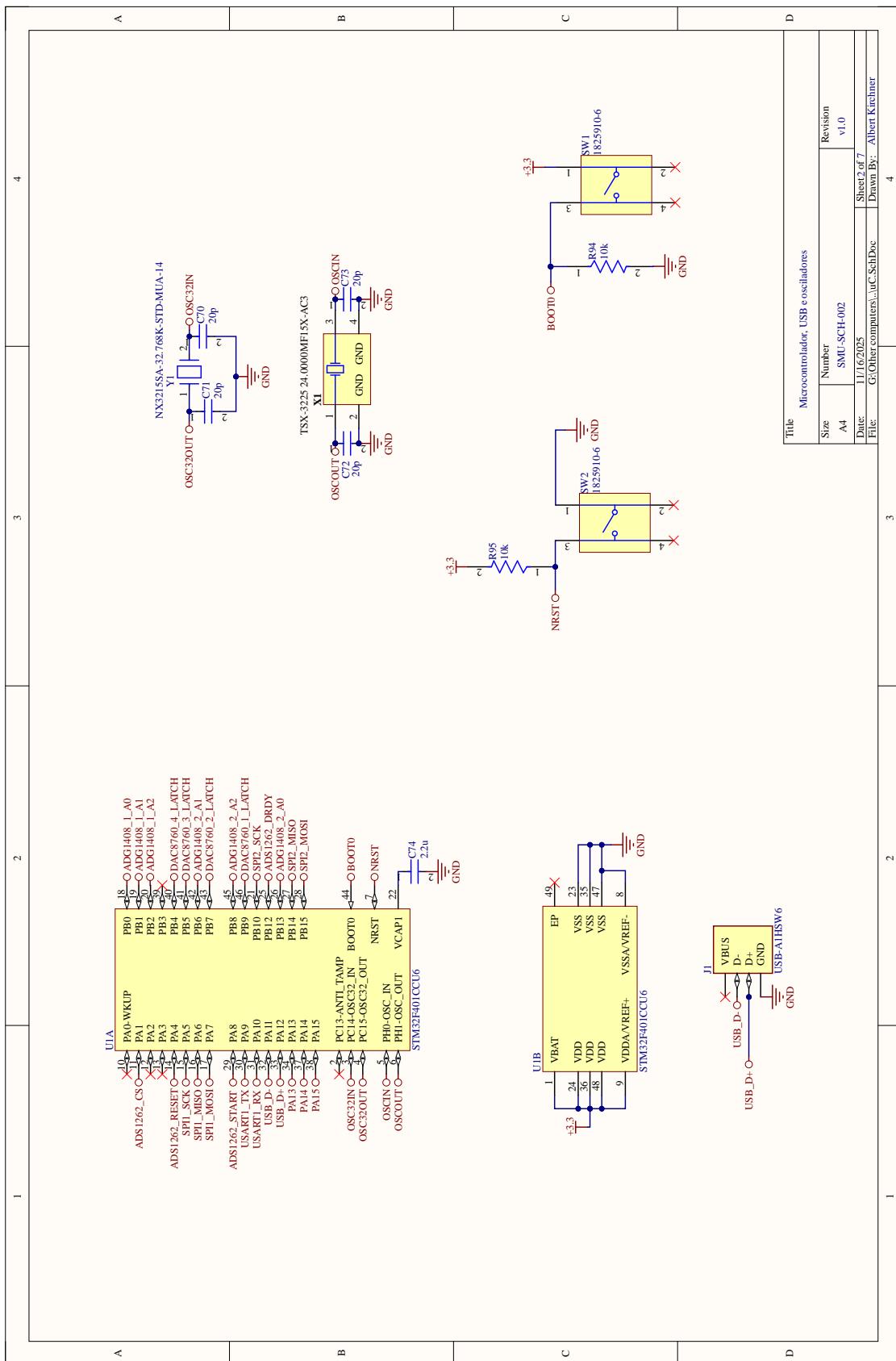
APÊNDICE A – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO

Figura 52 – Esquemático do circuito de alimentação.



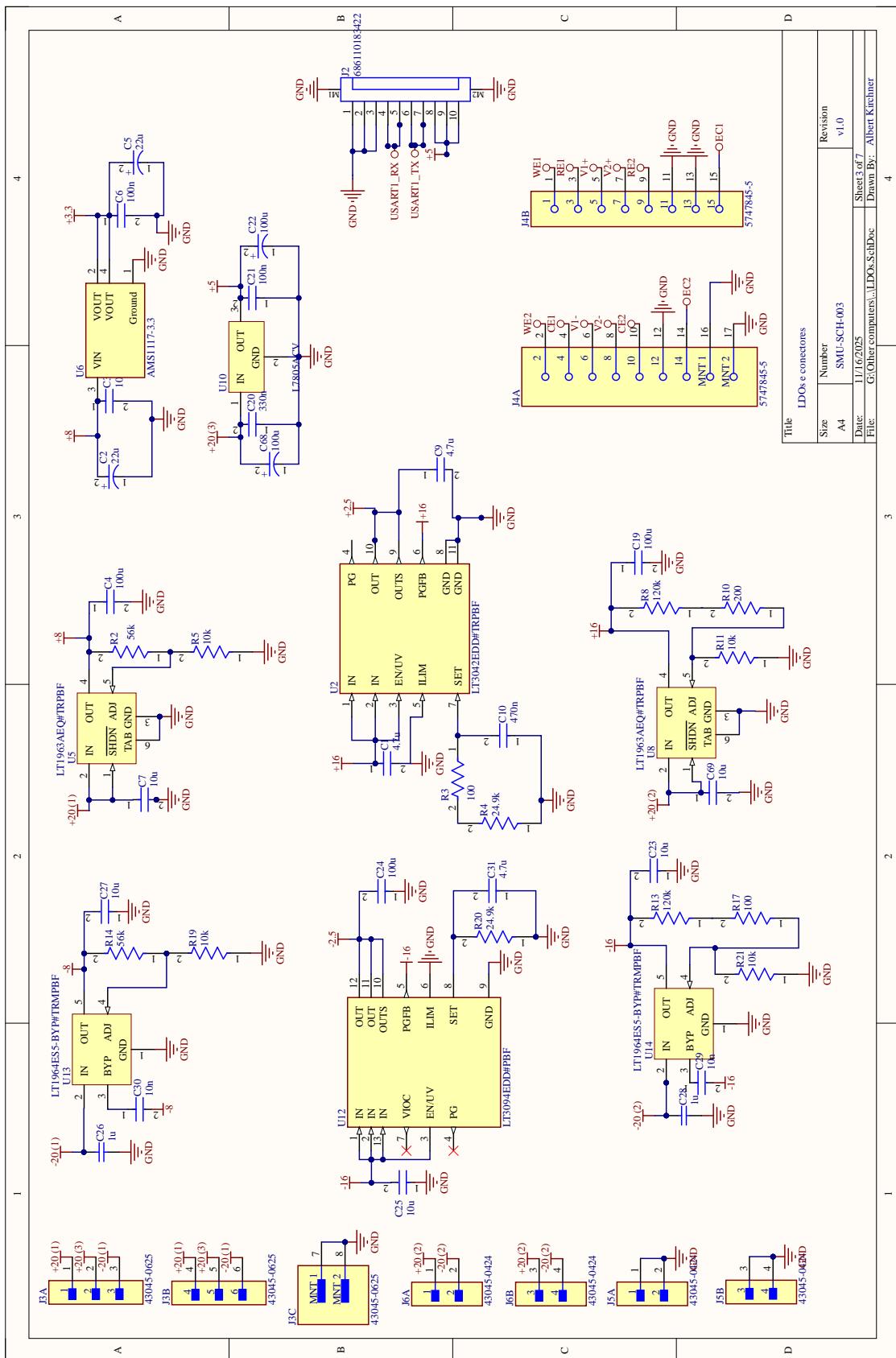
Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 53 – Esquemático do microcontrolador, osciladores, botões de *reset* e *boot* e conector USB.



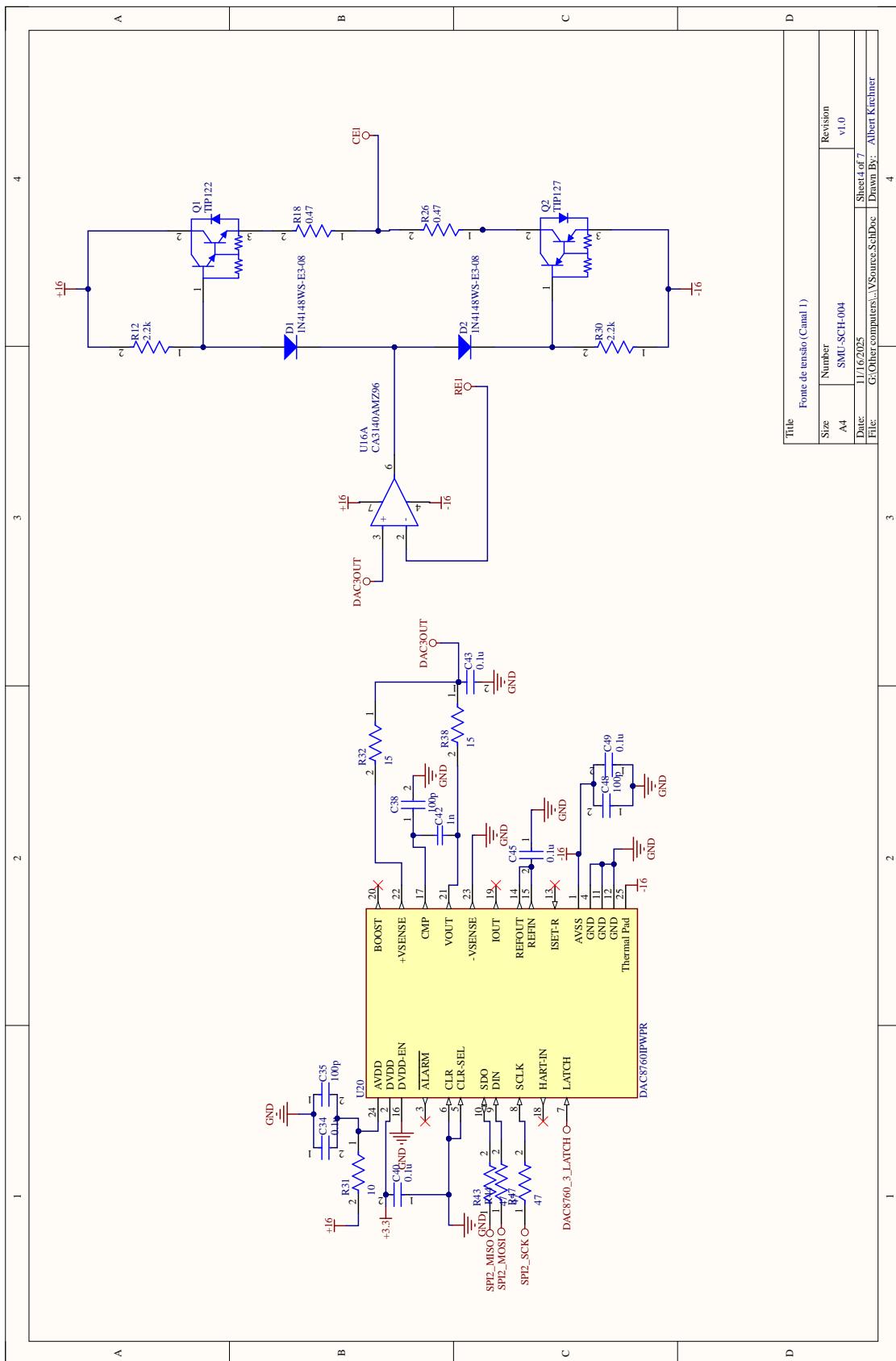
Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 54 – Esquemático com os circuitos dos reguladores de tensão e conectores de alimentação e eletrodos.



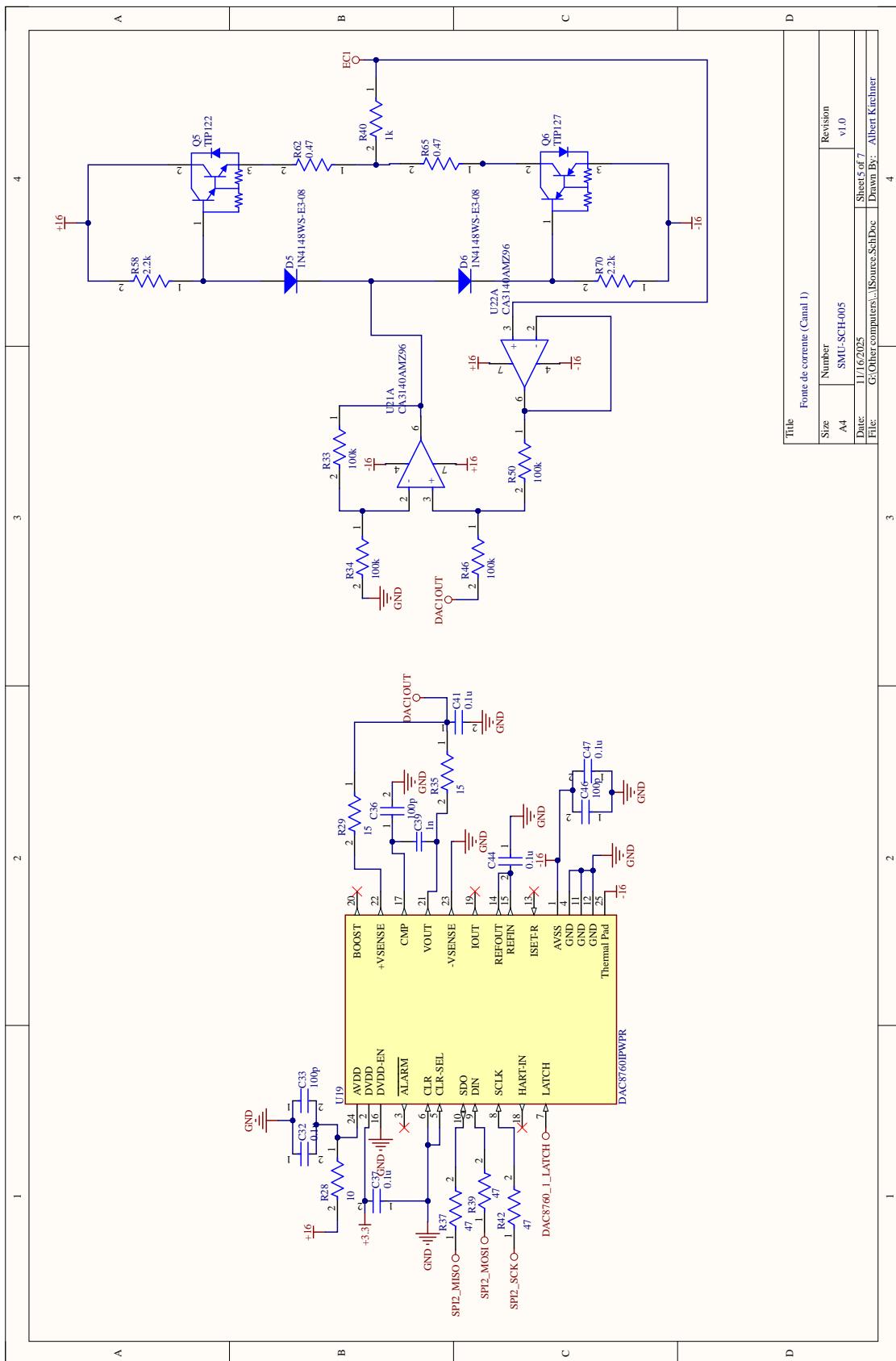
Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 55 – Esquemático da fonte de tensão do canal 1 (a fonte de tensão do canal 2 possui o mesmo circuito, mudando somente o nome dos componentes).



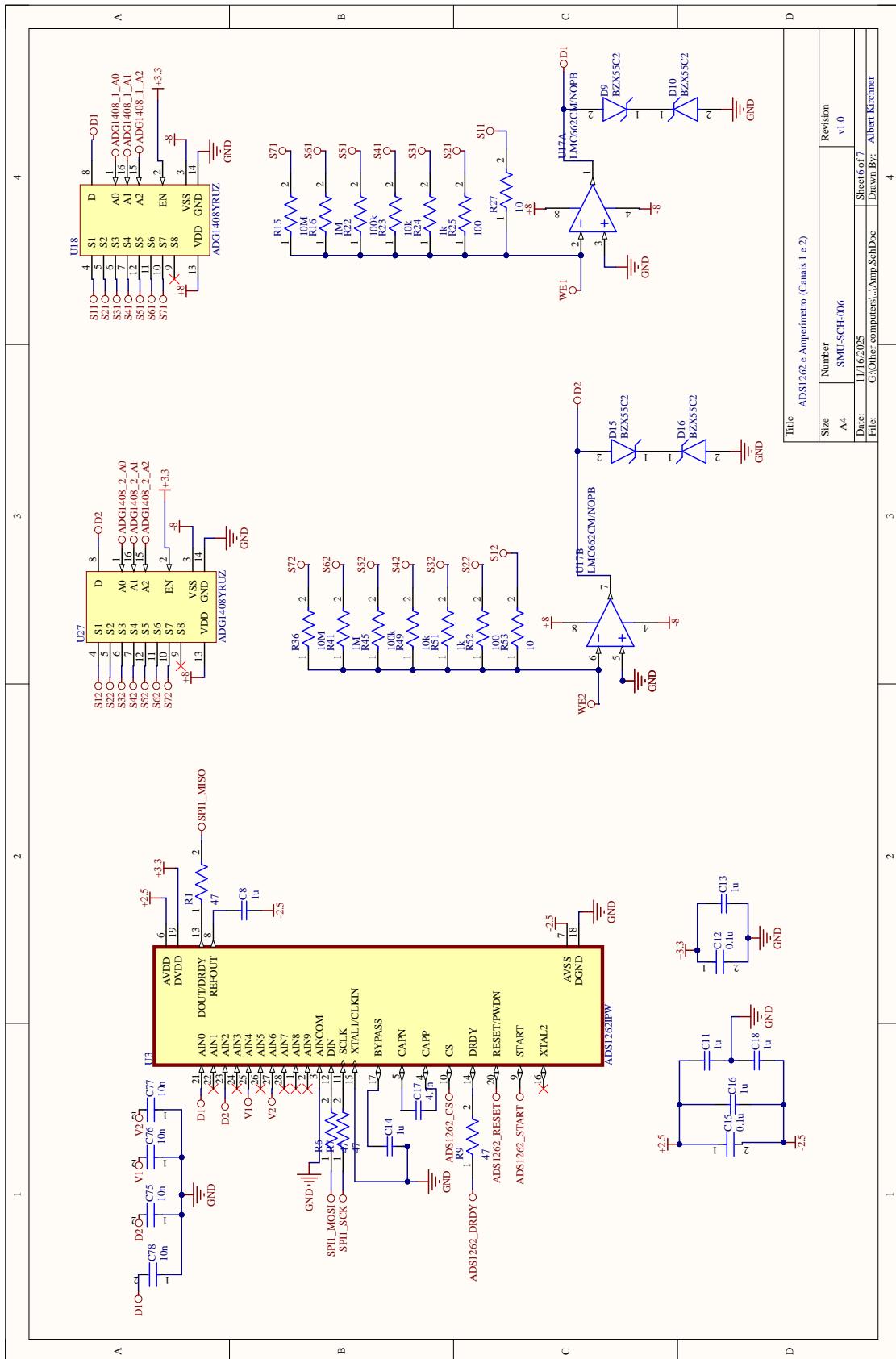
Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 56 – Esquemático da fonte de corrente do canal 1 (a fonte de corrente do canal 2 possui o mesmo circuito, mudando somente o nome dos componentes).



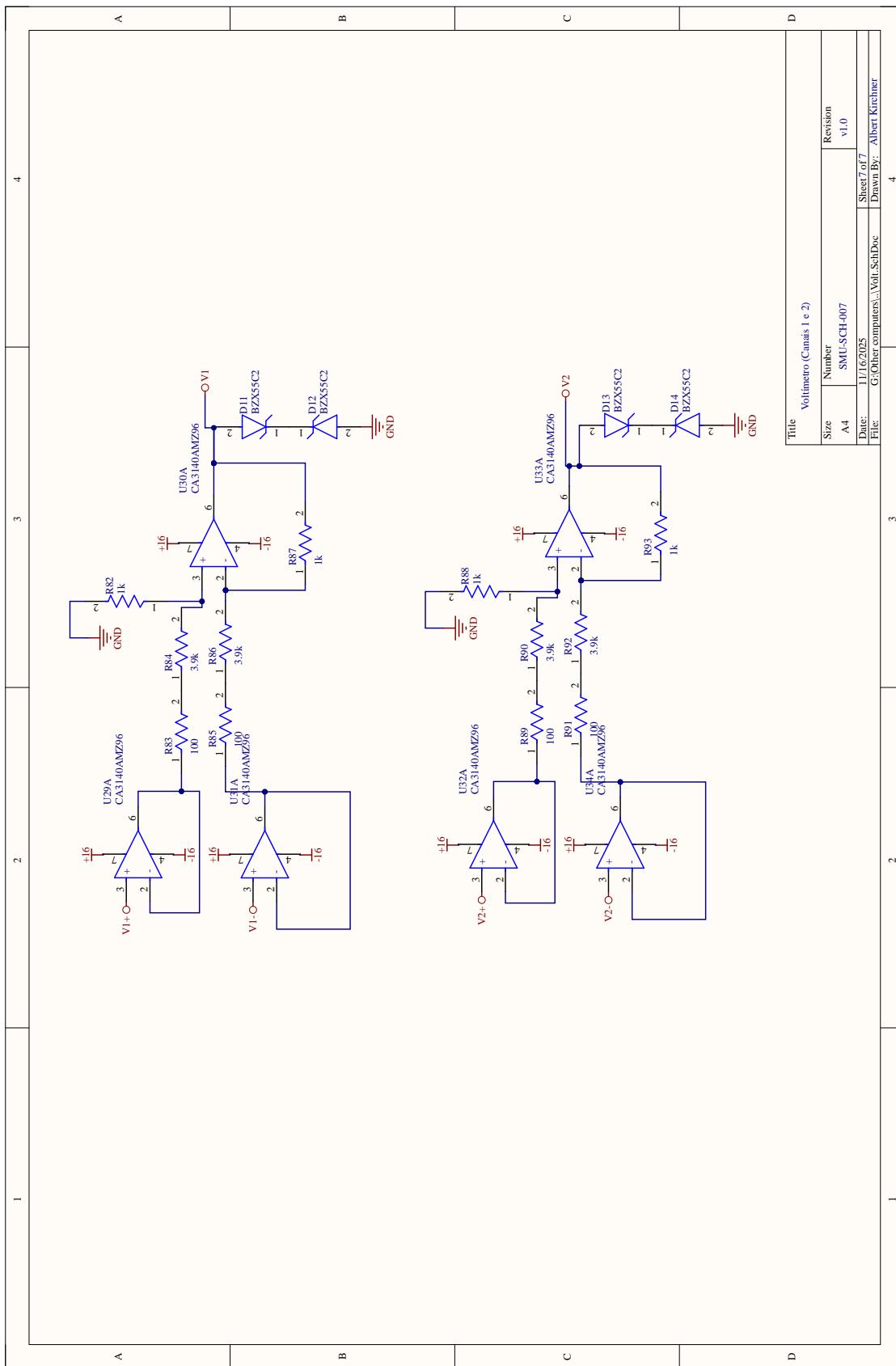
Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 57 – Esquemático dos amperímetros dos canais 1 e 2.



Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 58 – Esquemático dos voltímetros dos canais 1 e 2.



Fonte: Autoria Própria (2025).

APÊNDICE B – LISTA DE MATERIAIS

Tabela 6 – Tabela de custos dos componentes utilizados para desenvolvimento do projeto.

Componente	Quantidade	Preço unitário	Imposto total	Preço total
10Ω (1206)	4	R\$ 0,14	-	R\$ 0,56
15Ω (1206)	8	R\$ 0,14	-	R\$ 1,12
47Ω (1206)	16	R\$ 0,04	-	R\$ 0,64
100Ω (1206)	6	R\$ 0,14	-	R\$ 0,84
200Ω (1206)	1	R\$ 0,14	-	R\$ 0,14
1kΩ (1206)	4	R\$ 0,14	-	R\$ 0,56
3.9kΩ (1206)	4	R\$ 0,04	-	R\$ 0,16
10kΩ (1206)	6	R\$ 0,14	-	R\$ 0,84
24.9kΩ (1206)	2	R\$ 9,00	R\$ 9,00	R\$ 18,00
56kΩ (1206)	2	R\$ 8,23	R\$ 3,53	R\$ 11,76
100kΩ (1206)	8	R\$ 0,14	-	R\$ 1,12
120kΩ (1206)	2	R\$ 8,23	R\$ 3,53	R\$ 11,76
100Ω (1206)	2	R\$ 0,14	-	R\$ 0,28
1kΩ (1206)	2	R\$ 0,14	-	R\$ 0,28
10kΩ (1206)	2	R\$ 0,14	-	R\$ 0,28
100kΩ (1206)	2	R\$ 0,14	-	R\$ 0,28
1MΩ (1206)	2	R\$ 0,14	-	R\$ 0,28
10MΩ (1206)	2	R\$ 0,04	-	R\$ 0,08
0.47Ω (1210)	8	R\$ 10,27	R\$ 4,61	R\$ 14,88
10Ω (1210)	2	R\$ 9,41	R\$ 4,24	R\$ 13,65
1kΩ (1210)	2	R\$ 9,72	R\$ 4,34	R\$ 14,06
2.2kΩ (1210)	8	R\$ 9,89	R\$ 4,46	R\$ 14,35
20 pF (1206)	4	R\$ 0,72	-	R\$ 2,88
10 nF (1206)	2	R\$ 0,72	-	R\$ 1,44
100 nF (1206)	3	R\$ 0,72	-	R\$ 2,16
330 nF (1206)	1	R\$ 17,69	R\$ 7,88	R\$ 25,57
480 nF (1206)	1	R\$ 0,72	-	R\$ 0,72
1 μF (1206)	2	R\$ 0,72	-	R\$ 1,44
2.2 μF (1206)	1	R\$ 12,01	R\$ 5,44	R\$ 17,45
4.7 μF (1206)	3	R\$ 0,72	-	R\$ 2,16
10 μF (1206)	5	R\$ 0,72	-	R\$ 3,60
22 μF (1206)	2	R\$ 14,80	R\$ 14,80	R\$ 29,60

100 μ F (1206)	3	R\$ 25,79	R\$ 11,48	R\$ 37,27
100 pF (0805)	12	R\$ 0,31	-	R\$ 3,72
1 nF (0805)	4	R\$ 0,31	-	R\$ 1,24
4,7 nF (0805)	1	R\$ 0,31	-	R\$ 0,31
10 nF (0805)	4	R\$ 0,31	-	R\$ 1,24
0,1 μ F (0805)	22	R\$ 0,31	-	R\$ 6,82
1 μ F (0805)	6	R\$ 0,31	-	R\$ 1,86
ADS1262	1	R\$ 23,79	R\$ 10,38	R\$ 34,17
DAC8760	2	R\$ 32,49	R\$ 103,26	R\$ 168,24
DAC8760	2	R\$ 62,29	R\$ 54,38	R\$ 178,96
STM32F401CCU6	1	R\$ 25,00	R\$ 11,18	R\$ 36,18
CA3140	12	R\$ 36,60	R\$ 28,43	R\$ 65,03
LMC662	1	-	-	-
ADG1408	2	R\$ 20,89	R\$ 27,42	R\$ 69,20
LT1964	2	R\$ 10,11	R\$ 10,20	R\$ 30,42
LT3094	1	-	-	-
LM7805	1	-	-	-
AMS1117-3.3v	1	-	-	-
LT1963	2	R\$ 12,69	R\$ 12,78	R\$ 38,16
LT3042	1	-	-	-
TIP127	4	-	-	-
TIP122	4	-	-	-
1N4148	8	R\$ 7,39	R\$ 3,37	R\$ 10,76
Diodo Zener	8	R\$ 6,71	R\$ 3,01	R\$ 9,72
Display DWIN	1	R\$ 295,00	-	R\$ 295,00
Microfit 2x3	1	R\$ 7,00	-	R\$ 7,00
Microfit 2x2	2	R\$ 7,00	-	R\$ 14,00
Conector flat	1	R\$ 1,22	R\$ 14,83	R\$ 16,05
Conector USB PCB	1	R\$ 1,50	-	R\$ 1,50
Botão táctil	2	-	-	-
Oscilador 32.768kHz	1	R\$ 4,09	R\$ 12,08	R\$ 16,17
Oscilador 24MHz	1	R\$ 1,00	-	R\$ 1,00
Transformador	1	-	-	-
127/220V para 36V				
Conector DB15	1	R\$ 51,49	R\$ 22,97	R\$ 74,46
Cabo flat 10 pinos	1	R\$ 19,61	R\$ 8,79	R\$ 28,40
Conector DB15 PCB	1	R\$ 8,00	-	R\$ 8,00
fêmea				

5 PCIs (pedido mí- nimo)	R\$ 146,12	R\$ 370,00	R\$ 516,12
Frete total		R\$ 363,91	
Total		R\$ 2.227,85	

Fonte: Autoria própria (2025).