



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

TAYANA LIMA DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UM MULTÍMETRO DE BANCADA PARA
MEDIÇÃO EM CIRCUITOS ELÉTRICOS DE BAIXA POTÊNCIA

TUCURUÍ

2023

TAYANA LIMA DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UM MULTÍMETRO DE BANCADA PARA
MEDIÇÃO EM CIRCUITOS ELÉTRICOS DE BAIXA POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
como requisito parcial para a obtenção de
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica,
pela Universidade Federal do Pará.

Orientador:
Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz.

TUCURUÍ

2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

S586d Silva, Tayana Lima da.
Desenvolvimento de um multímetro de bancada para medição
em circuitos elétricos de baixa potência / Tayana Lima da Silva. —
2023.
68 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz
Coorientador(a): Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de
Engenharia Elétrica, Tucuruí, 2023.

1. Instrumentação; Arduino; Multímetro de bancada. I.
Título.

CDD 537.5

TAYANA LIMA DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UM MULTÍMETRO DE BANCADA PARA MEDIÇÃO EM
CIRCUITOS ELÉTRICOS DE BAIXA POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará.

Data de aprovação: 22/06/2023

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz
Orientador - FEE/CAMTUC/UFPA

Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma
Co-orientador - FEE/CAMTUC/UFPA

Prof. Dr. Ewerton Ramos Granhen
Avaliador Interno - FEE/CAMTUC/UFPA

Prof. Eng. Vitor da Silva Jorge
Avaliador Interno - FEE/CAMTUC/UFPA

TUCURUÍ

2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUI

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC) Nº 6 / 2023 - CTUCU (11.16)

Nº do Protocolo: 23073.044886/2023-40

Tucuruí-PA, 22 de junho de 2023.

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE UM MULTÍMETRO DE BANCADA PARA MEDIÇÃO EM CIRCUITOS ELÉTRICOS DE BAIXA POTÊNCIA

DISCENTE: TAYANA LIMA DA SILVA

MATRÍCULA: 201533940004

#	BANCA EXAMINADORA	CONDIÇÃO
1	Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz	Orientador
2	Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma	Co-orientador
3	Prof. Dr. Ewerton Ramos Granhen	Membro
4	Prof. Eng. Vitor da Silva Jorge	Membro

Data da Defesa: 22/06/2023	Hora Início: 9:00hrs	Hora Término: 9:45hrs
-----------------------------------	-----------------------------	------------------------------

Trabalho Escrito (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3	Examinador 4
Formatação	9,50	9,50	9,00	9,50
Linguagem (gramática e semântica)	9,00	8,00	9,00	9,50
Conteúdo técnico	9,00	9,00	9,50	9,50
Defesa Oral (0 a 10 pontos por critério)	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3	Examinador 4
Sequência lógica de apresentação	8,00	9,50	8,50	9,00
Administração do tempo	8,00	8,50	8,00	8,50
Expressão oral	7,00	8,00	8,00	9,00
Domínio do tema	6,00	8,00	8,50	9,50
Média por examinador	8,07	8,64	8,64	9,21
Média Final	8,64			
Conceito Final	BOM			

(Assinado digitalmente em 23/06/2023 08:52)
ANDRE FELIPE SOUZA DA CRUZ
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
CTUCU (11.16)
Matrícula: ###531#4

(Assinado digitalmente em 22/06/2023 12:14)
EWERTON RAMOS GRANHEN
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
CTUCU (11.16)
Matrícula: ###081#9

(Assinado digitalmente em 22/06/2023 13:36)
RAFAEL SUZUKI BAYMA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
NDAE (11.16.16)
Matrícula: ###466#0

(Assinado digitalmente em 22/06/2023 12:05)
VITOR DA SILVA JORGE
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR-SUBSTITUTO
CTUCU (11.16)
Matrícula: ###232#8

Para verificar a autenticidade deste documento entre em
<https://sipac.ufpa.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **6**, ano: **2023**,
tipo: **ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)**, data de emissão:
22/06/2023 e o código de verificação: **4def829372**

À minha mãe, que deu o primeiro passo para o início dessa jornada. E à minha irmã amada, a maior incentivadora das realizações dos meus sonhos.

"Só se pode alcançar um grande êxito quando
nos mantemos fiéis a nós mesmos."
(Friedrich Nietzsche).

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um protótipo multímetro de bancada para medição e testes de circuitos elétricos de baixa potência. A motivação para o desenvolvimento do protótipo surgiu como uma necessidade de amenizar a falta de instrumentos de medição no laboratório de circuitos elétricos e eletrônicos da Faculdade de Engenharia Elétrica, Campus Tucuruí da UFPA. O projeto do multímetro de bancada foi desenvolvido utilizando de circuitos de condicionamento de sinais elétricos, chave seletora para ajustar as escalas de medição, sensores de corrente baseados em efeito Hall, resistores de precisão, display LCD e microcontrolador atmega328p para processamento das informações. Foram realizadas simulações no software Proteus 8.9, e neste foram efetuadas medições de resistência, corrente CC, tensão CC e potência. A partir das simulações, foi proposto um projeto de circuito impresso que poderá ser fabricado para replicação do multímetro de bancada.

Palavras-chave: Multímetro de bancada; Instrumentação; Circuitos de condicionamento; Arduino.

ABSTRACT

In this work we present the development of a benchtop multimeter prototype for measuring and testing low-power electrical circuits. The motivation for developing the prototype emerged as a need to alleviate the lack of measuring instruments in the laboratory of electrical and electronic circuits at the Faculty of Electrical Engineering, Campus Tucuruí, UFPA. The bench multimeter project was developed using electrical signal conditioning circuits, selector switch to adjust the measurement scales, current sensors based on Hall effect, precision resistors, LCD display and atmega328p microcontroller for information processing. Simulations were performed in the Proteus 8.9 software, and measurements of resistance, DC current, DC voltage and power were performed. From the simulations, a printed circuit board project was proposed that could be manufactured to replicate the bench multimeter.

Keywords: Bench multimeter; Instrumentation; Conditioning circuits; Arduino.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de voltímetros: (a) Voltímetro analógico; (b) Voltímetro digital.	16
Figura 2 – Galvanômetro: (a) Esquemático; (b) Tipo ferro móvel; (c) Tipo bobina móvel.	21
Figura 3 – Tipos de multímetros: (a) Multímetro analógico; (b) Multímetro digital.	22
Figura 4 – Voltímetro ligado em paralelo com a carga.	23
Figura 5 – (a) Representação de um voltímetro construído com um galvanômetro, (b) Esquema de um voltímetro analógico com escalas; (c) Esquema de escalas modificada.	24
Figura 6 – Diagrama de blocos de um voltímetro digital.	25
Figura 7 – Circuito do conversor AD de rampa dupla.	26
Figura 8 – Amperímetro conectado em série com $R1$	26
Figura 9 – (a) Amperímetro analógico; (b) Amperímetro analógico multi escalas.	26
Figura 10 – Alicata amperímetro.	28
Figura 11 – Resistores comerciais de acordo com a potência.	29
Figura 12 – Código de cores dos resistores.	29
Figura 13 – Medição de resistência.	30
Figura 14 – (a) Ohmímetro analógico; (b) Ohmímetro com diferentes escalas.	30
Figura 15 – Esquema de medição do ohmímetro analógico.	31
Figura 16 – Medição de potência.	32
Figura 17 – (a) Wattímetro analógico; (b) Wattímetro digital.	32
Figura 18 – Visão da placa de desenvolvimento Arduino Uno.	34
Figura 19 – Tela de comando da IDE do Arduino.	35
Figura 20 – Diagrama de blocos descrevendo a operação e dinâmica do multímetro.	38
Figura 21 – Mensagem de boas-vindas do multímetro digital.	38
Figura 22 – Botões de seleção e menu do multímetro digital.	39
Figura 23 – (a) Circuito do display LCD; (b) Circuito dos botões de navegação.	50
Figura 24 – Circuito do voltímetro.	51
Figura 25 – (a) Circuito do amperímetro; (b) Circuito ACS712.	53
Figura 26 – Circuito do ohmímetro.	54
Figura 27 – Upload do arquivo .hex produzido pela IDE do arduino.	55
Figura 28 – Simulação completa do Circuito do multímetro de bancada simulado no Proteus.	56
Figura 29 – Projeto da PCB produzido na plataforma online EasyEDA.	57
Figura 30 – PCB projetada: (a) Visão superior; (b) Visão inferior.	57
Figura 31 – Medição de tensão: (a) 3V; (b) 10V; (c) 100V.	58
Figura 32 – Medição de corrente: (a) $-10A$; (b) $10A$	60

Figura 33 – Medição de resistência: (a) 500Ω ; (b) $5k\Omega$; (c) $50k\Omega$; (d) $500k\Omega$	61
Figura 34 – Medição de potência: (a) $30W$; (b) $100W$; (c) $1kW$	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fator de proporcionalidade circuito ACS712 com diferentes faixas de corrente.	53
Tabela 2 – Teste do voltímetro: valores medidos, valores teóricos e erro percentual.	59
Tabela 3 – Teste do amperímetro: valores medidos, valores teóricos e erro percentual.	60
Tabela 4 – Teste do ohmímetro: valores medidos, valores teóricos e erro percentual.	62
Tabela 5 – Teste do voltímetro: valores medidos, valores teóricos e erro percentual.	63
Tabela 6 – Custo de Materiais.	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Modelos de Placas Arduino e suas características.	34
Quadro 2 – Bibliotecas padrões do Arduino.	36
Quadro 3 – Código para configuração de bibliotecas e declaração de variáveis	39
Quadro 4 – Código de inicialização dos pinos e mensagem de boas-vindas.	40
Quadro 5 – Código de declaração da função submenu.	41
Quadro 6 – Código de declaração da função para leitura dos botões de navegação. . . .	41
Quadro 7 – Código do loop de algoritmo de controle.	42
Quadro 8 – Código da função de seleção do menu.	42
Quadro 9 – Código que define as estruturas condicionais para leitura de tensão. . . .	43
Quadro 10 – Código que define as estruturas condicionais para leitura de corrente. . . .	45
Quadro 11 – Código que define as estruturas condicionais para leitura de resistência - parte 1.	46
Quadro 12 – Código que define as estruturas condicionais para leitura de resistência - parte 2.	47
Quadro 13 – Código que define as estruturas condicionais para leitura de resistência - parte 3.	48
Quadro 14 – Código que define as estruturas condicionais para leitura de potência. . . .	49
Quadro 15 – Resumo dos sinais elétricos na escolha de escalas do ohmímetro.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Analógico Digital
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
TC	Transformador de Corrente
DDP	Diferença de Potencial
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	CONCEITOS DE INSTRUMENTAÇÃO E MEDIDAS ELÉ- TRICAS	19
2.1	Conceitos de Instrumentação	19
2.2	Instrumentos de Medição	20
2.3	O Voltímetro CC	23
2.3.1	Voltímetro Analógico	23
2.3.2	Voltímetro Digital	25
2.4	O Amperímetro CC	25
2.4.1	Amperímetro Analógico	26
2.4.2	Amperímetro Digital	27
2.4.3	Alicate Amperímetro	27
2.5	O Ohmímetro	28
2.6	O Wattímetro	31
2.7	O Microcontrolador Arduíno	33
2.7.1	Aspectos da placa do microcontrolador Arduino	33
2.7.2	Software IDE Arduino	34
2.7.3	Bibliotecas de suporte para a placa Arduino	35
3	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO MULTÍMETRO DE BANCADA	37
3.1	Descrição do Projeto	37
3.2	Lógica de Programação e Interface do Multímetro	38
3.3	Descrição dos Circuitos	50
3.3.1	Circuito de condicionamento e seleção de escalas do voltímetro	51
3.3.2	Circuito de medição de corrente do amperímetro	52
3.3.3	Circuito de condicionamento e seleção de escalas do ohmímetro	53
3.3.4	Medição de potência a partir do voltímetro e amperímetro	55
3.4	Projeto da PCB do Multímetro de Bancada	55
4	SIMULAÇÕES DE MEDIÇÃO NO SOFTWARE PROTEUS	58
4.1	Testes do Voltímetro	58
4.2	Testes do Amperímetro	59
4.3	Testes do Ohmímetro	60
4.4	Testes do Wattímetro	61

4.5	Orçamento Financeiro do Protótipo	63
5	CONCLUSÃO	64
5.1	Considerações Finais	64
5.2	Trabalhos Futuros	64
	Referências	66
	ANEXO A – LINK’S PARA ACESSO DOS ARQUIVOS DO PROJETO	68
A.1	Link para acesso do código C++, arquivos de simulação no Proteus, e arquivos GRBL e GCODE	68

1 INTRODUÇÃO

As atividades práticas tem ganhado grande importância nas instituições de ensino uma vez que estas são essenciais na relação ensino aprendizagem. Segundo [Cardoso \(2014\)](#), as atividades práticas são grandes aliadas no momento de apresentar um assunto, reforça-lo e torna-lo mais significativo, podendo ser uma prática investigativa ou dirigida, ambas apresentam contribuição à aprendizagem. Em cursos de engenharia, ou técnico-profissionalizantes, as atividades experimentais de laboratório têm possibilitado experiências que se assemelham a muitas situações de campo, e dessa forma, contribuindo para elaboração e construção da experiência profissional embasada por conceitos fundamentais ([SILVA et al., 2015](#)).

O uso das atividades práticas promove maior interação entre professor e aluno, portanto é necessário o uso de diversos métodos para obter um bom desenvolvimento do processo ensino aprendizagem, realizando uma interação dos conteúdos estudados em sala de aula com experiências do cotidiano da vida do aluno e na elaboração de novos conhecimentos. Para a realização efetiva destas atividades práticas, torna-se necessário o uso de instrumentos adequados, tais como instrumentos de medição, bancadas, equipamentos de precisão, aquisição e processamento de dados (material permanente), além de materiais de consumo. Assim, nota-se a necessidade de um investimento expressivo para manter o funcionamento adequado das atividades práticas e de laboratório nas instituições de ensino ([LEITE; SILVA; VAZ, 2005](#)).

Em cursos de Engenharia Elétrica, Telecomunicações, Sistemas de Controle e Eletrônica, o principal instrumento de medição é o multímetro. Este equipamento é projetado para realizar medições elétricas de tensão, corrente, resistência, capacitância, frequência, testes de componentes semicondutores, entre outros ([NUNES, 2011](#)). Durante a vanguarda do surgimento da eletrônica, os instrumentos de medição mais utilizados eram analógicos, utilizando geralmente um galvanômetro para indicar as informações medidas (figura 1a), atualmente, destacam-se os instrumentos digitais, que apresentam a informação numérica em displays (figura 1b) ([WITTE, 2002](#)).

Figura 1 – Tipos de voltímetros: (a) Voltímetro analógico; (b) Voltímetro digital.



Fonte: Adaptado de ([SOUZA et al., 2020](#)).

Em uma aula experimental que envolva fenômenos elétricos, para utilização adequada de um multímetro por um discente, há necessidade de um treinamento para realizar as medições de corrente e tensão utilizando as conexões corretas do instrumento. Infelizmente muitos discentes realizam manipulações inadequadas do multímetro, o que acarreta em danos a esta ferramenta e aos equipamentos da bancada. Além disso, a maior parte destes instrumentos utilizam pilhas e baterias como forma de alimentação, e a falta de atenção faz com que muitos discentes esqueçam o instrumento ligado, o que leva ao descarregamento das unidades de energia (baterias e pilhas) (SANTOS et al., 2012).

As situações relatadas não são particulares, e foram evidenciadas também no Laboratório de Circuitos Elétricos e Eletrônicos da Faculdade de Engenharia Elétrica, Campus Tucuruí da UFPA. Tais problemas levaram a Faculdade passar por uma crise de instrumentos em um breve período entre 2016 a 2018. A operação adequada dos laboratórios necessita que alguns fatores sejam atendidos, tais como: números de equipamentos disponíveis, estado de conservação, processo de manutenção e estrutura física. O baixo número de equipamentos funcionais interferiu de forma relevante no funcionamento do laboratório de ensino.

Uma forma de mitigar tal situação seria a utilização de multímetros de bancada, energizados por fontes externas e possuindo um sistema de proteção mais robusto, o que possibilitaria a manutenção rápida do instrumento, e assim evitando diminuição no acervo de instrumentos do laboratório. Segundo Fabián (2017), a bancada didática é definida como uma ferramenta de auxílio para a realização de experimentos que possibilita ao operador variando seus parâmetros, familiarizando-se com os componentes e ao mesmo tempo verificando na prática a teoria visto em sala.

Neste trabalho, apresentamos o projeto de um protótipo multímetro de bancada para ser utilizado em aulas de ensino experimental no Laboratório de Circuitos Elétricos e Eletrônicos, da Universidade Federal do Pará – Campus Tucuruí. O projeto prevê um instrumento de bancada capaz de realizar medições das grandezas elétricas: tensão, corrente, resistência e potência, todas invariantes no tempo (CC). A motivação principal foi a contribuição para a melhoria dos laboratórios de ensino da FEE. O projeto do multímetro de bancada foi desenvolvido utilizando circuitos de condicionamento de sinais elétricos, chave seletora para ajustar as escalas de medição, sensores de corrente baseados em efeito Hall, resistores de precisão, display LCD e microcontrolador atmega328p para processamento e das informações. Em caso de fabricação deste protótipo, prevê-se um auxílio na continuidade da realização de aulas práticas no próprio ambiente acadêmico, gerando maior conhecimento e maior compreensão sobre o assunto tratado. Já a importância da construção desta bancada, a partir do projeto proposto, pode ser enxergada como uma motivação a mais para os alunos no estudo dos circuitos elétricos e as demais disciplinas que abrangem os estudos dos componentes elétricos.

Durante a pesquisa para a elaboração deste trabalho, foram obtidas informações a partir das referências bibliográficas relacionadas aos assuntos de circuitos elétricos e eletrônicos, instrumentação de baixa potência e sinais elétricos. Destas referências, destacamos o livro "INSTRUMENTAÇÃO E FUNDAMENTOS DE MEDIDAS" dos autores BALBINOT e BRUSAMARELLO (2010). Deste obtivemos informações referentes aos circuitos elétricos e o funcionamento de cada componente, o que contribuiu de forma significativa para o desenvolvimento do projeto do protótipo de bancada didática.

O objetivo geral deste trabalho foi o desenvolvimento do projeto de um protótipo de multímetro de bancada didática. Os objetivos específicos são: propor uma revisão bibliográfica sobre a teoria de circuitos, instrumentação e medição; determinar os componentes de precisão utilizados no projeto; dimensionar o circuito principal que irá compor o projeto; definir as diretrizes gerais do projeto para que o protótipo seja montado em trabalhos futuros.

O trabalho está estruturado da seguinte forma:

- a) O capítulo 1 é introdutório, nele apresentamos a motivação para o desenvolvimento do projeto.
- b) No capítulo 2 apresentamos o referencial teórico necessário para embasar o projeto.
- c) No capítulo 3 apresentamos as partes funcionais do projeto desenvolvido no software Proteus 8.9. Além disso, apresentamos o projeto da placa do circuito principal do multímetro de bancada, as conexões, chaves, displays e carcaça do protótipo.
- d) O capítulo 4 apresenta os resultados das simulações, os testes de resistência, tensão, corrente e potência utilizando o multímetro proposto.
- e) A demais temos as considerações, as referências bibliográficas e os arquivos do projeto no anexo A.

2 CONCEITOS DE INSTRUMENTAÇÃO E MEDIDAS ELÉTRICAS

Neste capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica sobre a teoria de sinais, medidas elétricas e conceitos de instrumentação, assuntos que embasaram o desenvolvimento do projeto de multímetro de bancada. No final do capítulo também abordamos as características do microcontrolador atmega328p, embarcado na plataforma Arduino, sendo o sistema de processamento dos sinais e controle utilizado no projeto.

2.1 Conceitos de Instrumentação

A instrumentação é o conjunto de técnicas e instrumentos utilizados para observar, medir, registrar, controlar e atuar nos fenômenos físicos, a mesma desenvolve técnicas para adequação dos instrumentos de medição (VIANA, 1999). A instrumentação é a base do processo experimental que vem se desenvolvendo cada vez mais e para isso o operador tem que está familiarizado com os seus princípios básicos assim como a sua utilização. Para iniciar um procedimento é preciso conhecer o processo e estimar as incertezas das medidas toleráveis de cada medição.

Para a obtenção do conhecimento durante a investigação científica é preciso elaborar um método científico que crie um padrão no desenvolvimento da pesquisa para que o cientista formule uma teoria para o fenômeno observado. O método elaborado deve compreender a formação do conhecimento, realização dos experimentos e sua avaliação. As grandezas físicas são as variáveis diretas e indiretas a serem medidas durante o processo experimental podendo ser classificadas de acordo com as suas características físicas, para medir tais grandezas depende de alguns fatores como custo, tempo, incerteza entre outros. O objetivo principal em uma medição é obter o valor mais real possível de uma determinada grandeza.

As grandezas físicas possuem unidades de medidas que tem por função padronizar os resultados obtidos durante a medição. São modelos definidos para medir comprimento, massa, tempo, corrente elétrica, temperatura termodinâmica, quantidade de matéria e intensidade luminosa, suas unidades correspondentes são metro, quilograma, segundos, ampere, kelvin, mol e candela. O padrão de cada grandeza é definido pelo Sistema Internacional de Unidades (SI), baseado no sistema métrico decimal (SANTOS et al., 2012). Para realizar uma boa medição, o experimentalista precisa conhecer os fenômenos físicos relacionados as grandezas a serem medidas. Os métodos de medição seguem uma ordem lógica para a execução de cada experimento por meio de operações descritas especificadamente, usadas na execução de medições particulares de acordo com o método estabelecido.

As grandezas fundamentais em eletricidade são tensão, corrente, resistência e potência. A tensão elétrica é a diferença de potencial entre dois pontos. Sua unidade de medida é o volt. A tensão indica o trabalho responsável por ordenar as cargas elétricas por um meio condutor, a mesma pode ser definida em tensão contínua (CC) que se origina de um campo elétrico constante e tensão alternada (AC), cuja origem é um campo elétrico alternado. Já a corrente elétrica é o movimento ordenado das cargas livres em um meio condutor, esta, se origina por meio de uma tensão aplicada entre dois pontos desse condutor. Sua unidade de medida é o ampere. O sentido convencional da corrente elétrica é igual ao sentido do campo elétrico no interior do condutor, ou seja, a corrente sai do polo positivo para o negativo e assim como a tensão, a mesma se define como corrente contínua, cujo o sentido se mantém constante e corrente alternada, onde o sentido varia alternadamente (SILVA et al., 2015).

Outras duas grandezas, em destaque, são a resistência elétrica, que é a medida de oposição à passagem da corrente elétrica em um condutor, e a potência elétrica, que é um indicativo da quantidade de conversão de energia realizado em um período de tempo.

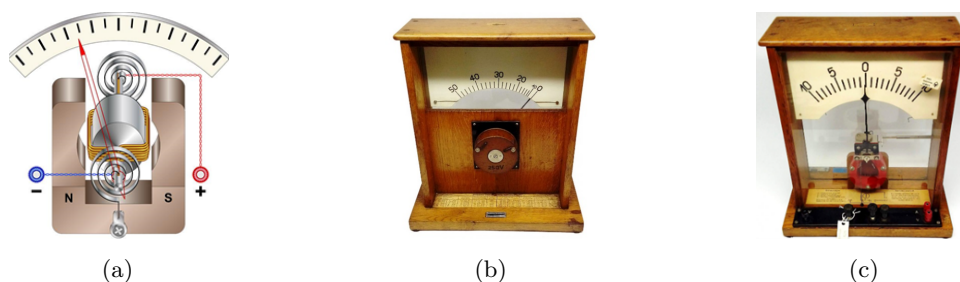
Para as medições das variáveis físicas, a informação é transmitida e processada de forma elétrica. Os sensores e os transdutores tem um papel de suma importância nos dispositivos de medição. O sensor é um dispositivo sensível a um fenômeno como a luz, temperatura, entre outros. O processo de sensoriamento é a transmissão da informação com conversão de energia, o que reflete diretamente no sinal de saída, podendo ser negativo ou positivo. Os mesmos são classificados em passivos ou ativos. O sensor passivo necessita apenas de um estímulo externo para sua operação, o próprio sensor o converte em sinal de saída. O sensor ativo necessita de uma fonte de energia para sua operação, o sinal de excitação é convertido pelo sensor em sinal de saída. O transdutor por sua vez, é um conversor de energia, converte uma forma de energia em outra (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

2.2 Instrumentos de Medição

Os primeiros instrumentos utilizados para realizar medidas elétricas tem como princípio de funcionamento o galvanômetro. O galvanômetro de ferro móvel consiste em duas barras paralelas imersas em um campo magnético gerado por uma bobina. Uma das barras é fixa enquanto a outra móvel é acoplada a uma mola exercendo uma força no sentido contrário à força magnética. A parte de ferro móvel é vinculada a um ponteiro que gira na frente de uma escala graduada, sobre a qual desloca-se um ponteiro fixado a placa móvel (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

A figura 2a mostra o esquemático de um galvanômetro de ferro móvel, enquanto a figura 2b mostra um galvanômetro de ferro móvel prático.

Figura 2 – Galvanômetro: (a) Esquemático; (b) Tipo ferro móvel; (c) Tipo bobina móvel.



Fonte: (LUZ, 2020) e (SILVESTRIN, 2020).

O galvanômetro de bobina móvel (figura 2c) utiliza um ímã permanente, os polos do ímã são montados em conjunto com uma bobina que gira em torno de um eixo e de uma mola cuja função é se opor ao movimento da bobina. Quando a corrente passa pela bobina um novo campo eletromagnético surge causando uma interação entre as forças ocasionada pelo ímã permanente e a corrente imersa. Desta forma, a força resultante faz com que a bobina se movimente assim que a força da mola é vencida, o que torna o movimento do ponteiro proporcional a intensidade da corrente (MORALES, 2011). Para medições em circuitos de corrente alternada, por exemplo, mudando o sentido da corrente muda-se também a direção da força e conseqüentemente o sentido do ponteiro. Para isso usa-se retificadores de meia onda e onda completa para que o valor médio do sinal alternado seja diferente de zero.

Em essência, um galvanômetro é basicamente um transdutor de corrente elétrica em movimento angular. Esse funcionamento básico foi o que permitiu a construção dos primeiros medidores de grandezas elétricas, a partir da junção de um galvanômetro e um circuito de condicionamento para realizar a medição coerente de uma grandeza elétrica. O ohmímetro, o voltímetro e o amperímetro são exemplos de instrumentos de medição que foram construídos utilizando o galvanômetro (MORALES, 2011). Com a junção destes medidores temos o multímetro analógico, mostrado na figura 3a, um instrumento capaz de realizar as medidas de tensão, corrente e resistência contínua ou alternada, em diversos níveis, a partir de uma simples escolha de escala por meio de uma chave de seleção.

Com o passar dos anos, os multímetros analógicos foram substituídos pelos multímetros digitais, figura 3b. A característica básica dos instrumentos digitais é a conversão dos sinais analógicos de entrada em dados digitais. O conversor analógico-digital (A/D) é conectado a um circuito eletrônico e a uma unidade de visualização display que pode ser de LED ou LCD. Os visores de leds são semicondutores que emitem luz quando percorrido por corrente elétrica, já o display de cristal líquido é constituído de duas lâminas possuindo entre as mesmas a solução de cristal líquido, assim as moléculas se alinham sob a ação da corrente elétrica impedindo a passagem de luz (FLOYD, 2009).

Figura 3 – Tipos de multímetros: (a) Multímetro analógico; (b) Multímetro digital.



Fonte: Acervo de figuras do Google Imagens.

A resolução dos instrumentos digitais é dada em função do número de dígitos ou contagens do seu display. Um instrumento com 3 dígitos completos representa uma grandeza 999 com resolução de 1 unidade. Como consequência da resolução dos medidores digitais a exatidão informa o maior erro possível de uma medição, sendo expresso através do percentual de leitura do instrumento e aplicado sobre a leitura do display. Podemos citar vantagens e desvantagens quando comparamos multímetros digitais e analógicos:

- a) Multímetros digitais mostram o valor medido em números com ou sem casas decimais dependendo da precisão, enquanto nos multímetros analógicos as escalas de leituras são em seu painel frontal, porém não são tão precisas e apresentam limitações na quantidade de escalas de leitura.
- b) Os multímetros digitais possuem maior isolação de entrada (alta impedância), interferindo pouco nas leituras e proporcionando uma probabilidade menor de danificar o equipamento devido a um erro. Nos multímetros analógicos a impedância de entrada é definida pelo circuito de condicionamento, sendo diferente pra cada escala.

Algumas desvantagens:

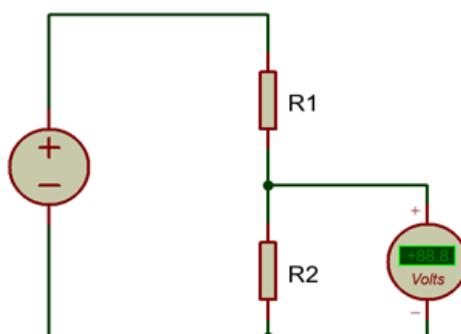
- a) Como todo circuito baseado em leituras digitais, o multímetro precisa de um intervalo de tempo entre uma conversão analógica/digital e a seguinte, o que provoca um efeito indesejável. A velocidade de resposta na maior parte das vezes é mais lenta que a velocidade do cérebro humano, provocando a sensação de que os números não param.
- b) Em circuitos com grandezas que variam muito rapidamente e continuamente, torna-se impossível de efetuar leituras com multímetros digitais, exigindo a utilização de um multímetro analógico.

Seja digital ou analógica, de forma objetiva, o estudo da instrumentação eletrônica destina-se a aplicação e técnicas para medição das grandezas elétricas. O multímetro digital ganha grande destaque por reunir as funções de outros quatro medidores: voltímetro, amperímetro, ohmímetro e wattímetro.

2.3 O Voltímetro CC

O voltímetro é um instrumento destinado a realizar medição direta da diferença de potencial (ddp) ou tensão elétrica entre dois pontos em um circuito elétrico, sendo a unidade da tensão elétrica o volt (V). A principal característica do voltímetro é a sua alta resistência de entrada, que garante que a medição de tensão seja realizada, idealmente, sem interferir com as correntes elétricas do circuito. Na figura 4 é mostrado um esquema de conexão do voltímetro, em paralelo com o resistor R_2 , o objetivo é medir a queda de tensão sobre R_2 , no circuito divisor de tensão.

Figura 4 – Voltímetro ligado em paralelo com a carga.



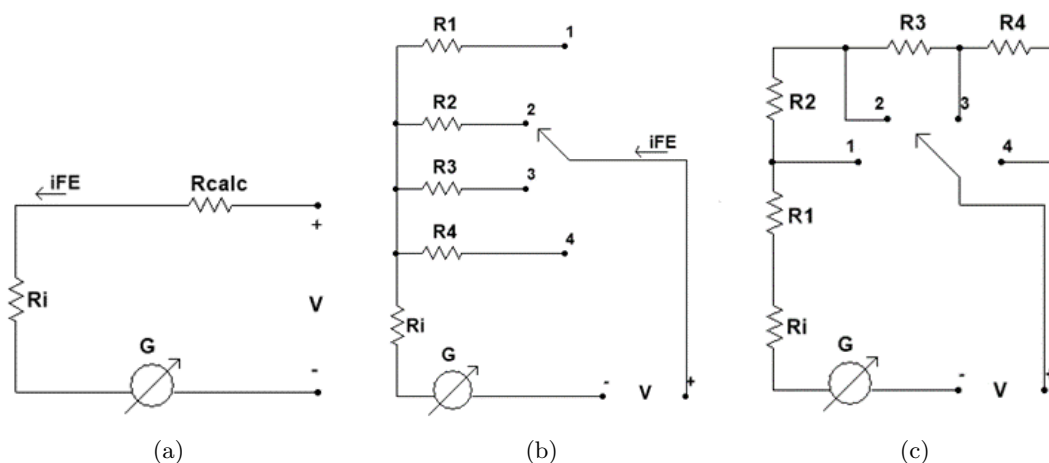
Fonte: Próprio Autor.

Como é mostrado na figura 4, para realizar a medição de tensão, o voltímetro deve ser conectado em paralelo com o circuito nos pontos em que a medição será realizada. A corrente drenada para o voltímetro será praticamente nula, mas suficiente para que seja executada a medição de tensão.

2.3.1 Voltímetro Analógico

O voltímetro analógico é construído pela associação em série entre um galvanômetro, um circuito resistivo de condicionamento (figura 5a). A tensão aplicada se divide entre os resistores e o galvanômetro na razão direta entre as suas resistências. Assim, a tensão máxima suportada pelo instrumento se dá em função do resistor e das características elétricas do galvanômetro, como resistência interna do galvanômetro, resistência de escala (calculada), fundo de escala e corrente de fundo (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010). Em um instrumento de medida, fundo de escala é o valor máximo que ele pode medir sem ser danificado.

Figura 5 – (a) Representação de um voltímetro construído com um galvanômetro, (b) Esquema de um voltímetro analógico com escalas; (c) Esquema de escalas modificada.



Fonte: Adaptado de Balbinot e Brusamarello (2010).

De acordo com a figura 5a, conhecendo o galvanômetro e o fundo de escala da tensão a medir, pode-se determinar o valor da resistência R_{calc} a ligar em série. A figura 5a também nos mostra que no voltímetro analógico, a escala pode ser modificada alterando o valor da resistência em série, logo um instrumento com várias escalas pode ser implementado adicionando resistências que podem ser selecionadas por meio de uma chave seletora, conforme mostrado na figura 5b. Assim, substituindo R_{calc} por uma das resistências da escala, de forma que $R_{calc} = R_{escala} = R_1, R_2, R_3$ ou R_4 , o movimento do galvanômetro será aproximadamente linear à corrente de fundo. Conforme mostrado na equação (1).

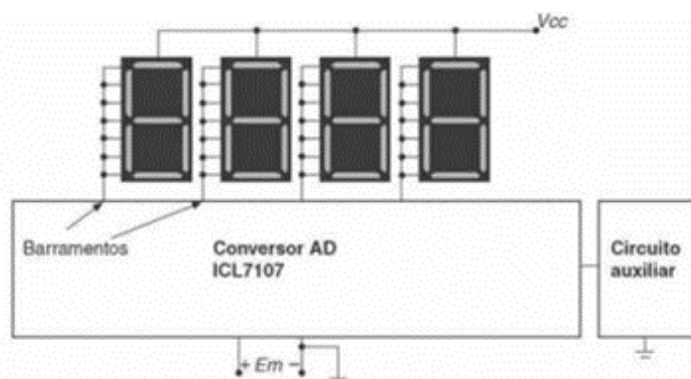
$$i_{FE} = \frac{V}{R_i + R_{escala}} \quad (1)$$

Como o ajuste de escala ocorre apenas pela seleção das resistências calculadas, e de forma que elas aumentam em sequência, podemos utilizar deste artifício para propor um circuito de condicionamento com resistores combinados, como mostrado na figura 5c. Podemos notar que as resistências que determinam as escalas são associadas em série, de forma que, o cálculo das mesmas levam em consideração a resistência equivalente nas escalas desejadas. Por meio da corrente necessária para o desvio máximo do galvanômetro, podemos definir um parâmetro denominado sensibilidade, sendo um indicador de qualidade do voltímetro analógico que é fornecida em Ω/V , este parâmetro é fornecido no painel dos instrumentos comerciais, quanto maior a sensibilidade maior a qualidade do instrumento. A incerteza na medição geralmente é fornecida no painel do fabricante em termos de porcentagem no fundo da escala, é importante sempre verificar o manual do fabricante, uma vez que o erro nas medidas varia de acordo com o parâmetro a ser medido (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

2.3.2 Voltímetro Digital

Os detalhes de construção do voltímetro digital dependem unicamente de um conversor analógico digital e um display de visualização, que pode ser de cristal líquido (LDC) ou de led. A figura 6 mostra um esquema de um diagrama de blocos de um voltímetro digital que possui saída codificada para um display de sete segmentos.

Figura 6 – Diagrama de blocos de um voltímetro digital.



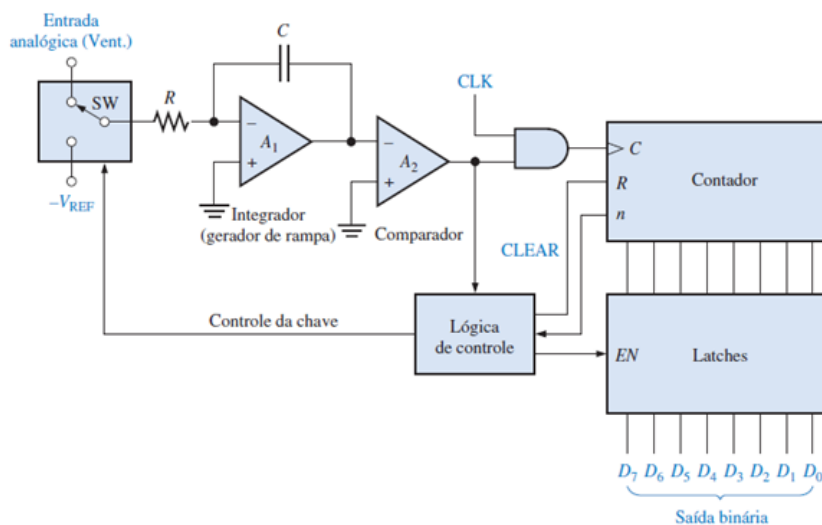
Fonte: (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

Semelhante ao voltímetro analógico, o voltímetro digital possui um circuito de escalas ligadas a um divisor de tensão, o que permite uma redução do nível de tensão medida a uma tensão proporcional a ser processada após passar por um conversor AD. Em geral um voltímetro digital não necessita de altas velocidades de leitura e de atualização do display, mas sim de precisão. Os três tipos básicos de conversores AD são o conversor AD Flash, característico por sua velocidade de operação, conversor AD de rampa dupla, característico por utilizar um circuito integrador, e o conversor AD SAR (Registrador de aproximação sucessiva), que utiliza um comparador e um registrador de deslocamento especial (FLOYD, 2009). Na prática, o conversor AD do tipo dupla rampa ou integrador é o mais utilizado na construção do voltímetro digital (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010). A figura 7 mostra o conversor AD de rampa dupla (FLOYD, 2009).

2.4 O Amperímetro CC

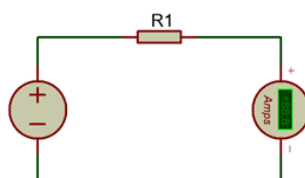
A corrente elétrica pode ser definida como sendo o fluxo ordenado de elétrons por meio de um condutor, sua unidade de medida é o ampère (A). Da mesma forma que a tensão, a corrente elétrica pode ser classificada em corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA), desde que esta é produzida pela aplicação de uma tensão. O amperímetro é um instrumento utilizado para medir corrente em um circuito elétrico. Para medir a corrente é preciso conectar o equipamento em série com a parte do circuito que se deseja medir a intensidade da corrente, como mostrado no esquema da figura 8.

Figura 7 – Circuito do conversor AD de rampa dupla.



Fonte: (FLOYD, 2009)

Figura 8 – Amperímetro conectado em série com $R1$.

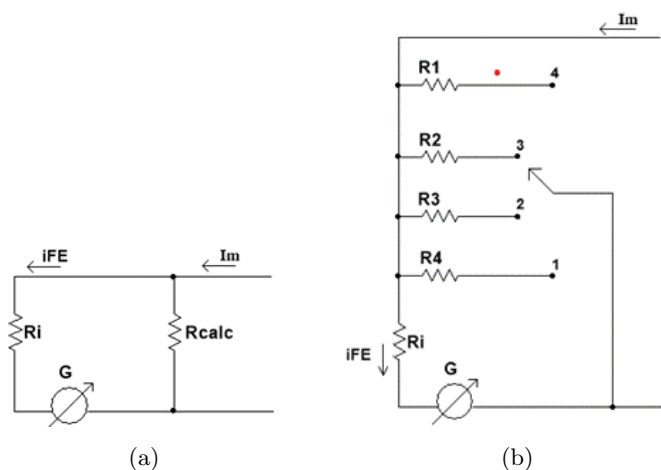


Fonte: Autoria própria

2.4.1 Amperímetro Analógico

Um amperímetro analógico pode ser construído a partir de um galvanômetro ligado em paralelo com uma resistência. A corrente máxima suportada pelo instrumento é determinada em função do valor da resistência, juntamente com as características internas do galvanômetro (resistência interna, fundo de escala de corrente). A figura 9a mostra o circuito básico de um amperímetro analógico.

Figura 9 – (a) Amperímetro analógico; (b) Amperímetro analógico multi escalas.



Fonte: Adaptado de Balbinot e Brusamarello (2010).

No circuito da Fig. 9a, a partir das informações do galvanômetro e do fundo de escala a medir, pode-se determinar o valor da resistência a ligar em paralelo (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010). Os instrumentos comerciais costumam ter diferentes escalas, como demonstrado na figura 9b. Neste caso, de acordo com a equação (2), a corrente através do galvanômetro será calculada a partir do divisor de corrente, alimentado a partir da corrente medida:

$$i_{FE} = \frac{R_{escala}}{R_i + R_{escala}} i_{medida} \quad (2)$$

Um amperímetro analógico com várias escalas pode ser construído adicionando resistores em paralelo, que podem ser selecionadas por uma chave seletora. A resistência de entrada do amperímetro deve ser baixa, desta forma a corrente necessária para deslocar o ponteiro é desviada do processo em que a medida está sendo tomada, com o mínimo de queda de tensão entre os terminais do amperímetro (FILHO, 1980).

2.4.2 Amperímetro Digital

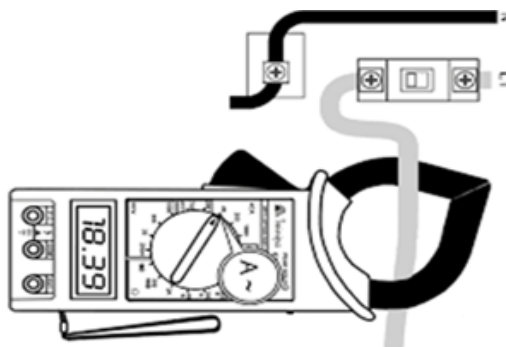
A exemplo do voltímetro digital, a construção do amperímetro digital depende exclusivamente do conversor analógico digital e de um display de visualização, que pode ser de LCD ou de leds. A diferença é que o sinal de corrente deve ser convertido em sinal de tensão por um circuito intermediário. O circuito condicionador pode ser simples como um resistor e também pode ser implementado de outras formas, utilizando Amplificadores Operacionais, por exemplo.

Alguns tipos de sensores são utilizados para detectar a corrente elétrica em ramos de circuitos eletrônicos, utilizando por exemplo, sensores de alta precisão é possível obter os melhores resultados, um deles que podemos destacar são os sensores de efeito hall (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010). O sensor de efeito hall é capaz de transformar uma forma de energia em outra, o qual varia sua tensão de saída quando exposto a um campo magnético. Esse sensor é um transdutor linear que requer um circuito para o processamento do sinal de saída, podendo ser utilizado na medição desde CC a dezenas de kHz. O seu funcionamento se dá quando um feixe de partículas carregadas passa através de um campo magnético, as forças atuam sobre as partículas e então o feixe é defletido. As principais vantagens do sensor de efeito hall são a versatilidade, baixo custo, confiabilidade e facilidade de utilização. A principal desvantagem desse sensor é sua dependência da temperatura.

2.4.3 Alicates Amperímetro

O alicate amperímetro (figura 10) se caracteriza por proporcionar uma medida sem contato com o circuito, o que é útil quando é necessário realizar uma medida com isolamento elétrico, pois não é necessário interromper o circuito para efetuar a medição, denominada não invasiva.

Figura 10 – Alicate amperímetro.



Fonte: (<https://www.eletopecas.com/home>)

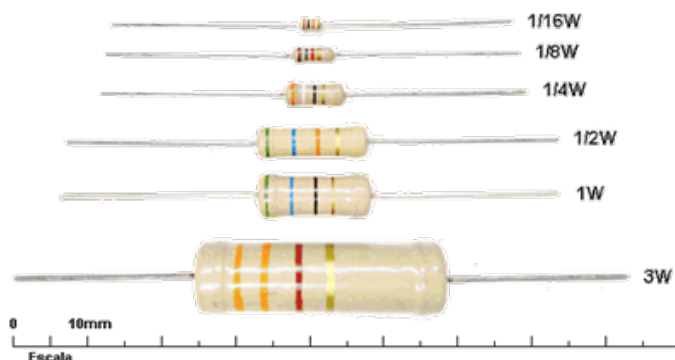
O alicate do amperímetro é construído para enlaçar um condutor externo, de forma que o alicate age como uma bobina condutora no secundário de um transformador de corrente (TC), e o condutor externo equivale a bobina do primário. A corrente induzida na bobina do alicate, a partir do campo magnético produzido pelo condutor externo, é enviada para um galvanômetro e mostrada em uma escala graduada em instrumentos analógicos, ou é convertida em uma tensão que é processada, para então ser mostrada em um display digital (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

2.5 O Ohmímetro

A resistência elétrica de um corpo material é a capacidade de se opor ao fluxo de corrente elétrica a partir de uma tensão elétrica aplicada, definida como a razão entre tensão e corrente, como descrito pela lei de ohm $R = V/I$ (ALEXANDER; SADIKU, 2013). Para efetuar a medida da resistência elétrica, entre dois pontos de um circuito, utilizamos um instrumento denominado ohmímetro. O resistor é o componente eletrônico que é fabricado para possuir um valor de resistência elétrica específico, estes componentes exercem um papel fundamental nos circuitos eletrônicos. Além de se opor a passagem de corrente elétrica, os resistores também se destacam por transformar energia elétrica em energia térmica por meio do efeito joule (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

Existem limitações físicas para a corrente que pode fluir através de um resistor, em geral, a corrente máxima é definida por $I = P/R^2$, onde P é a potência máxima que o resistor é capaz de dissipar. Os resistores comerciais, utilizados na microeletrônica, possuem potências nominais de 1/2 watt (0,5W), 1/4 de watt (0,25W), 1/8 watt, 1W, 2W, 5W, 10W e 20W. Em geral quanto maior o resistor maior a sua potência, como demonstrado na figura 11. Os resistores possuem uma ampla variedade de modelos e características específicas em relação a sua resistência, dentre eles podemos destacar os resistores de filme de carbono, resistores de alta potência, metálico e termistores. Os mais utilizados são os resistores de carbono por apresentar baixo custo em relação aos demais, e pela eficiência do carbono quanto a resistência.

Figura 11 – Resistores comerciais de acordo com a potência.



Fonte: (<https://www.eletopecas.com/home>)

Tanto o resistor de filme de carbono e o metálico apresentam uma sequência de cores em torno de si, uma forma de determinar sua resistência é através do código de cores, cada cor representa um algarismo (LOPES et al., 2020). As faixas de cores descritas no corpo dos resistores correspondem a uma sequência específica, que indica a resistência elétrica do resistor, geralmente, esta sequência apresenta quatro faixas de cores. Existem resistores de até seis faixas de cores, estes são denominados resistores de maior precisão. A figura 12 mostra o código de cores dos resistores comerciais.

Figura 12 – Código de cores dos resistores.

Cor	1ª Faixa	2ª Faixa	3ª Faixa	Multiplicador	Tolerância	Coef. de Temperatura
Preto	0	0	0	x 1 Ω		
Marrom	1	1	1	x 10 Ω	+/- 1%	100 PPM/°C
Vermelho	2	2	2	x 100 Ω	+/- 2%	50 PPM/°C
Laranja	3	3	3	x 1K Ω		15 PPM/°C
Amarelo	4	4	4	x 10K Ω		25 PPM/°C
Verde	5	5	5	x 100K Ω	+/- 0,5%	
Azul	6	6	6	x 1M Ω	+/- 0,25%	10 PPM/°C
Violeta	7	7	7	x 10M Ω	+/- 0,1%	5 PPM/°C
Cinza	8	8	8		+/- 0,05%	
Branco	9	9	9			1PPM/°C
Dourado				x .1 Ω	+/- 5%	
Prateado				x .01 Ω	+/- 10%	

Fonte: (<https://www.casadoresistor.com.br/>)

A leitura é realizada a partir da primeira faixa que estiver mais próxima de um dos terminais do resistor.

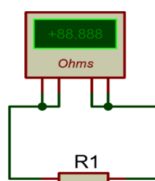
- a) Para o resistor de quatro faixas, determina-se a resistência do resistor da seguinte maneira: 1º e 2º faixas de cores correspondem aos dois primeiros dígitos, a 3ª faixa indica o multiplicador, e a 4ª faixa indica a faixa de tolerância (erro máximo da resistência do resistor comparada a nominal).

- b) Resistores de cinco faixas: 1º, 2º e 3º faixas de cores correspondem aos dois primeiros dígitos, a 4ª faixa indica o multiplicador, e a 5ª faixa indica a faixa de tolerância.
- c) Resistores de seis faixas: 1º, 2º e 3º faixas de cores correspondem aos dois primeiros dígitos, a 4ª faixa indica o multiplicador, a 5ª faixa indica a faixa de tolerância, e a 6ª faixa indica o coeficiente de temperatura.

Para realizar a medição de resistência elétrica em um resistor, precisamos desacoplá-lo de qualquer circuito onde o mesmo esteja ligado, pois a resistência elétrica do circuito irá interferir com o resistor. Durante a medição, através dos terminais do ohmímetro, aplicamos uma tensão sobre o resistor (tensão produzida pela bateria do instrumento), e por fim verifica-se uma corrente elétrica que flui através do resistor, alterando o estado do galvanômetro.

O esquema de ligação de medição de resistência utilizando o ohmímetro é demonstrado na figura 13.

Figura 13 – Medição de resistência.

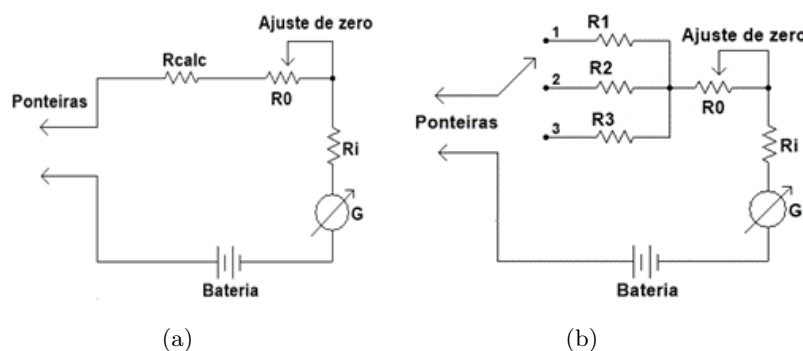


Fonte: Autoria própria.

O ohmímetro possui internamente uma fonte de energia responsável por fornecer uma corrente ao componente cuja resistência está sendo medida, em geral, trata-se de um par de pilhas em série (3V) ou uma bateria de 9V. Em medidores digitais esta é a mesma unidade de energia responsável por energizar o conversor AD, display e led's.

A figura 14a mostra o circuito básico de um ohmímetro analógico.

Figura 14 – (a) Ohmímetro analógico; (b) Ohmímetro com diferentes escalas.



Fonte: Adaptado de Balbinot e Brusamarello (2010).

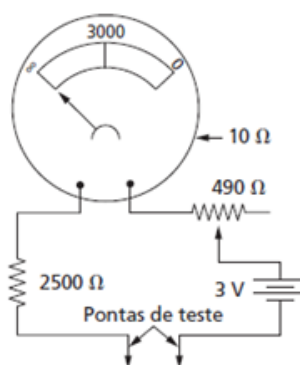
Neste caso o instrumento deve ser calibrado de forma que indique o fundo de escala quando os terminais estiverem em circuito aberto, ou em curto circuito. Ao curto-circuitar os terminais do ohmímetro, a corrente através do galvanômetro deve ser máxima, e, portanto, este deve se deslocar ao máximo para indicar resistência 0Ω . Como o deslocamento do galvanômetro depende do nível da tensão da bateria interna, é comum os ohmímetros apresentarem um potenciômetro em série para ajustar e calibrar a corrente de curto circuito (valor mínimo de resistência com ajuste de zero), de maneira a garantir maior precisão na medição de resistência (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

Assim como o voltímetro e o amperímetro, o ohmímetro pode ser projetado para ter escalas diferentes de medição (Fig. 14b), desta forma, a corrente que passa através do galvanômetro pode ser ajustada a partir da escolha adequada do resistor de escala, como na equação (3).

$$i_{FE} = \frac{V_{bateria}}{R_{medida} + R_i + R_{ajuste} + R_{escala}} \quad (3)$$

A partir da equação (3) podemos perceber que a corrente de fundo que passa através do galvanômetro é inversamente proporcional à resistência medida, e portanto, o painel graduado da escala de medição deverá ser invertido e não linear. Um exemplo de painel de medição de um ohmímetro é demonstrado na figura 15.

Figura 15 – Esquema de medição do ohmímetro analógico.



Fonte: Adaptado de Balbinot e Brusamarello (2010).

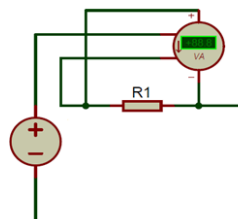
Note, portanto, a partir da figura 15 que quando as pontas de prova estão em um circuito aberto, a corrente através do medidor será zero, indicando resistência infinita no painel. No entanto, ao medir um curto circuito, a corrente será máxima, provocando máximo deslocamento no galvanômetro, e então indicando resistência zero no painel do ohmímetro.

2.6 O Wattímetro

A potência pode ser definida como o trabalho realizado pela corrente elétrica em um intervalo de tempo. O Wattímetro é o instrumento de medição responsável por medir

a potência elétrica fornecida ou dissipada por um elemento de circuito. O equipamento possui quatro terminais de medição, sua conexão é realizada da maneira em que dois dos seus terminais estejam em paralelo com o elemento medindo tensão e os terminais restantes estejam em série medindo corrente, como indicado na figura 16. O wattímetro deve medir a corrente sem desvio de fluxo de corrente e a corrente por sua vez não deve introduzir queda de tensão em seus terminais (BARBOSA, 2016).

Figura 16 – Medição de potência.



Fonte: Autoria própria.

Basicamente existem dois tipos de wattímetro, o eletrodinâmico e o eletrônico. O wattímetro eletrodinâmico é composto por um galvanômetro de bobina móvel e por um par de enrolamentos, sendo um de tensão e outro de corrente. Quando a corrente elétrica flui entre as bobinas de corrente ocorre um campo magnético produzindo um torque entre as bobinas, este torque desvia o ponteiro que indica a medida de potência em uma escala graduada. As bobinas de corrente possuem uma impedância baixa e as bobinas de tensão impedância alta (GERMANO et al., 2019).

O wattímetro eletrônico ou digital é constituído de multiplicadores digitais tais como, transdutores, circuitos de condicionamento e microcontroladores responsáveis pela aquisição e processamento dos valores temporais de tensão e corrente necessário para a obtenção da potência. Esses equipamentos ainda permitem obter resultados do cálculo de potência reativa e fator de potência (GERMANO et al., 2019). Na figura 17a é mostrado um wattímetro analógico, geralmente utilizado em painéis de comando industriais, enquanto a figura 17b mostra um wattímetro digital moderno.

Figura 17 – (a) Wattímetro analógico; (b) Wattímetro digital.



Fonte: Acervo de figuras do Google Imagens.

2.7 O Microcontrolador Arduíno

Os microcontroladores atuam como dispositivo chave no processamento de dados digitais em dispositivos eletrônicos. Atualmente, os microcontroladores comerciais têm demonstrado tamanho reduzido, custo benefício e ótimo desempenho. Estruturalmente, um microcontrolador é formado por uma placa de desenvolvimento que contém processador, memória, periféricos de entrada/saída e um microprocessador responsável por analisar as instruções e executar tarefas (BUKMAN, 2016).

Um dos tipos de microcontroladores mais estudados e utilizados na atualidade é o Arduino. Nesse tipo é usado um microcontrolador AVR, que é de baixo consumo de energia, fácil manuseio e alto nível de interação. O que fornece um exclusivo desempenho, eficiência no uso de energia e principalmente flexibilidade de projeto (BORGES et al., 2006).

O primeiro protótipo da placa Arduino idealizado por Massimo Banzi foi implementado com a ajuda de outros profissionais como o cientista sueco David Cuartielles e um aluno de Massimo, David Mellis, cujo trabalho se resumiu no desenvolvimento do código de programação da placa Arduino. Gianluca Martino desenvolveu métodos para a confecção de 200 placas a partir do modelo da primeira versão, já com o objetivo de fixar metas comerciais para a venda da plataforma (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013).

Devido a facilidade e simplicidade de confecção, o uso de placas Arduino de diferentes fabricantes foi crescendo, facilitando o processo de venda das placas Arduino da linha oficial, cujo número de unidades vendidas chega a 300 mil placas fornecidas por diversos distribuidores (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013). O grande diferencial desta ferramenta é que sua fonte é open source, conceito de software e hardware livres. Sendo assim, qualquer pessoa com conhecimento de programação pode adaptá-lo de acordo com a sua necessidade, sempre visando melhoria na aplicação do Arduino (THOMSEN, 2014).

2.7.1 Aspectos da placa do microcontrolador Arduino

Arduino é uma placa eletrônica de processamento de sinais analógicos ou digitais. Por ter a característica de código aberto, a placa Arduino pode ser usada tanto para projetos independentes de cunho interativo, como pode ser empregada em conjunto com outros programas (BANZI MASSIMO E SHILOH, 2022). Na figura 18 é mostrado o modelo da placa Arduino UNO. O chip ATMEGA tem 28 contatos onde 20 pinos podem ser tanto de saída como entrada. A placa Arduino funciona com uma frequência de clock de 16MHz e emprega três mecanismos de ajuste de temporização para o controle da frequência do pulso PWM (WARREN et al., 2011). No quadro 1 são descritos alguns modelos de placas Arduino e suas características.

Figura 18 – Visão da placa de desenvolvimento Arduino Uno.



Fonte: (FARINELLI, 2016).

Quadro 1 – Modelos de Placas Arduino e suas características.

	Arduino Mega 2560	Arduino Leonardo	Arduino Ethernet
Microcontrolador	ATmega2560	ATmega168	ATmega328
Tensão Operacional	5V	5V	5V
Tensão de entrada	7-12V	7-12V	7-12V
Pinos de Entrada/Saída Digital	54 (dos quais 15 fornecem saída PWM)	14 (dos quais 7 fornecem saída PWM)	14 (dos quais 4 fornecem saída PWM)
Entradas Analógicas	16	12	6
Memória Flash	256KB (8KB de memória RAM)	16KB (1KB de memória RAM)	32KB (2KB de memória RAM)
Velocidade de clock	16MHZ	16MHZ	16MHZ

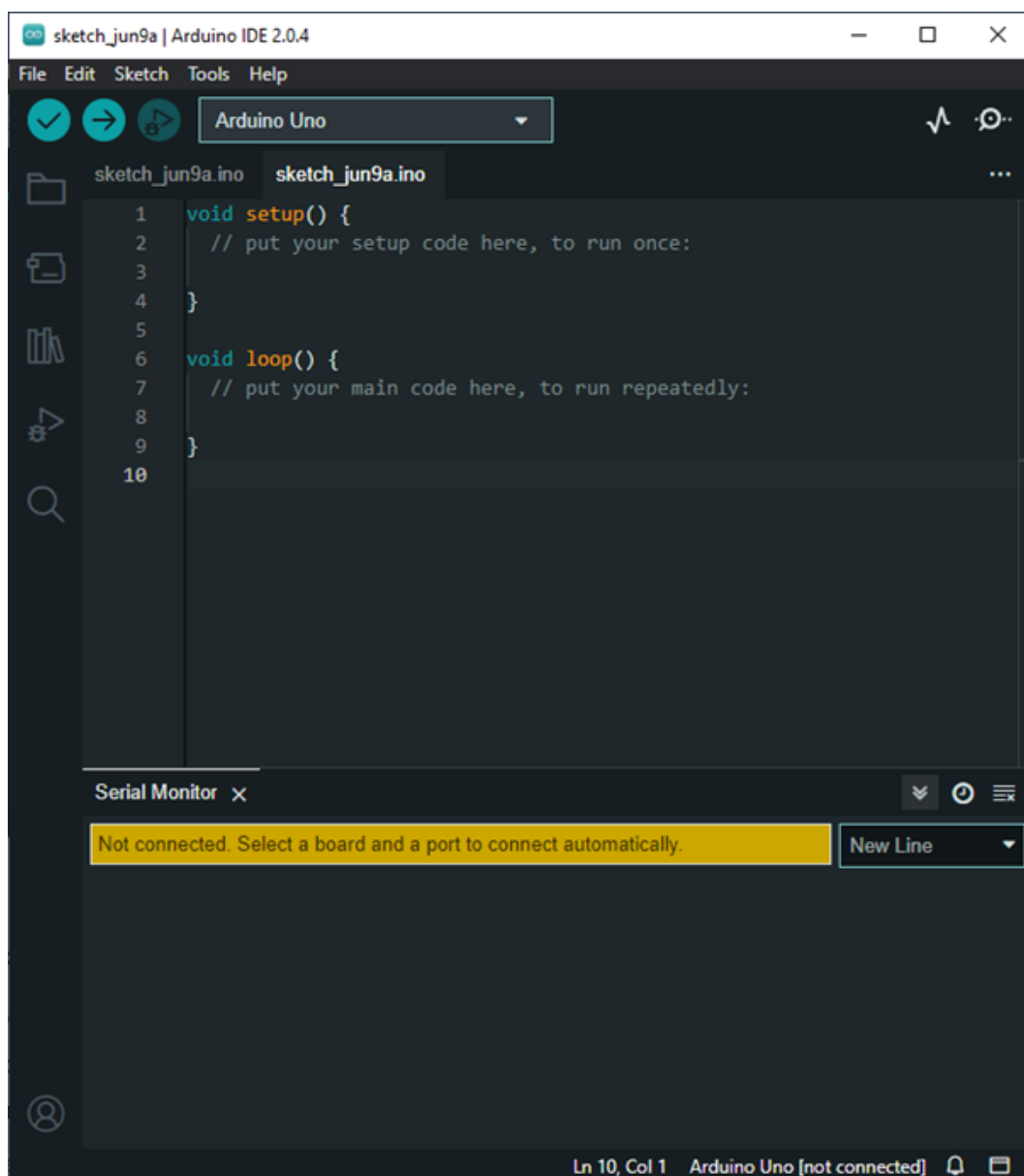
Fonte: Adaptado de (PURDUM; PURDUM, 2015).

2.7.2 Software IDE Arduino

O Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) é o espaço onde a placa Arduino é configurada e programada. Nesse software é registrado a estrutura sequencial do programa que a placa terá que ler e executar. Para a transferência do programa do computador para a placa, é necessário conectá-la através de um cabo USB. O gerenciador de aplicações já vem instalado na placa, possibilitando facilidade no processo de transferência das informações (MCROBERTS, 2013).

A sintaxe de programação do Arduino é basicamente C/C++, este possui funções simples para trabalhar com as portas do Arduino. Com a finalidade de fácil entendimento, programação e aplicação. As funções void setup() e void loop() são essenciais para o seu perfeito funcionamento. Na figura 19 é mostrada a tela de comando da IDE do Arduino.

Figura 19 – Tela de comando da IDE do Arduino.



Fonte: Autoria própria.

2.7.3 Bibliotecas de suporte para a placa Arduino

As bibliotecas são códigos pré-definidos que fornecem praticidade ao ambiente de programação da placa Arduino. Esses códigos ajudam a reduzir o esforço computacional de compilação e simplificam a configuração das linhas de códigos, economizando variáveis e alocações de memória.

Para fazer o uso frequente de algumas bibliotecas no IDE estas já estão disponíveis para o usuário, caso surja a necessidade de uma biblioteca personalizada para atender as especificações de projeto, existem uma grande quantidade de outros códigos e sub-rotinas para download na internet (MARGOLIS, 2012). No quadro 2 são mostrados alguns exemplos de bibliotecas usadas com mais recorrência na programação de placas Arduino.

Quadro 2 – Bibliotecas padrões do Arduino.

Nome da Biblioteca	Descrição
EEPROM	Leitura e escrita para armazenamento permanente.
Ethernet	Para conexão com a internet usando o Arduino Ethernet Shield.
Firmata	Para se comunicar com os aplicativos no computador utilizando um protocolo serial.
GSM	Para conectar a uma rede GRPS/GSM com o GSM Shield
LiquidCrystal	Para controlar telas de cristal líquido.
SD	Para ler e escrever em cartões SD
Servo	Para controlar servomotores
SPI	Para se comunicar com dispositivos que utilizam a Interface Periférica Serial.
Software Serial	Para comunicação serial em qualquer pino digital.
Stepper	Para controlar motores de passo.

Fonte: (MARGOLIS, 2012).

Por meio de um estudo da documentação da biblioteca, é possível efetuar sua adequação ao programa escrito no editor do IDE por meio da inclusão do código ao script principal. Essa adição de linhas de código causa conseqüentemente, um aumento do tamanho do programa no estágio de verificação do sketch, no entanto, o programa de compilação do Arduino utiliza apenas o código de biblioteca que realmente está em uso, eliminando o excesso de memória carregada durante a compilação (MARGOLIS, 2012).

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO MULTÍMETRO DE BANCADA

Neste capítulo apresentamos os detalhes do desenvolvimento do projeto do multímetro de bancada, que foi realizado levando em consideração as formas de funcionamento dos instrumentos de medições elétricas apresentados no capítulo 2. Os circuitos de condicionamento foram construídos a partir de divisores de tensão, sensores de efeito hall e chave seletora. O processamento das informações, coletadas durante o processo de medição, foi realizado utilizando uma plataforma Arduino UNO 238, onde fora desenvolvido o código e as rotinas de programação.

Ao fim do capítulo, são apresentados os projetos das placas eletrônicas, juntamente com os link's para compartilhamento dos arquivos GRBL e GCODE, para possível implementação prática do projeto.

3.1 Descrição do Projeto

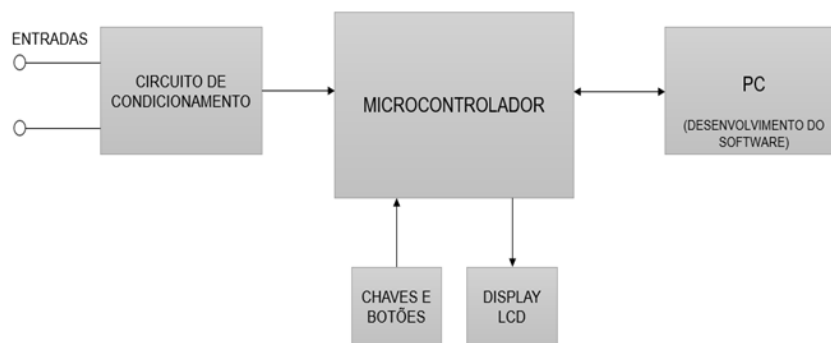
O projeto consiste no desenvolvimento de um multímetro digital para medições de grandezas elétricas (tensão, corrente e resistência) que, por meio do microcontrolador Arduino armazena, processa os dados adquiridos e envia para serem exibidos na tela do seu visualizador. A conversão dos sinais de analógico para digital é realizada pelo próprio conversor AD embutido na plataforma Arduino, assim, os sinais condicionados obtidos a partir das medições são enviados diretamente para processamento por meio das portas analógicas do microcontrolador.

A escolha do microcontrolador Arduino foi feita por ser uma placa eletrônica de baixo custo que permite construir sistemas eletrônicos desde os mais simples, até os mais complexos, com limitações relacionadas apenas a velocidade de processamento, além da facilidade de implementação e de um ambiente de programação eficaz. Outro recurso que favorece a escolha do microcontrolador é a conexão USB.

O multímetro faz uso dos circuitos de condicionamento, uma vez que as entradas do microcontrolador possuem limite de níveis de tensão que devem ser respeitados, caso contrário o dispositivo poderá ser danificado. As entradas analógicas e as entradas digitais do microcontrolador não devem ultrapassar +5 V, nem ficarem abaixo de 0 V, pois não se deve aplicar uma tensão negativa. A função do circuito de condicionamento é exatamente fazer com que sinais de entrada a serem medidos pelo multímetro estejam em níveis adequados às entradas analógicas e digitais do microcontrolador. O multímetro provem de conectores identificados, painel com display LCD, conexão USB para alteração do código implementado, chaves e botões de comando, incluindo chaves de seleção de faixas para a realização da mudança de escala de medição.

A figura 20 apresenta o diagrama em blocos do projeto de multímetro de bancada.

Figura 20 – Diagrama de blocos descrevendo a operação e dinâmica do multímetro.



Fonte: Autoria própria.

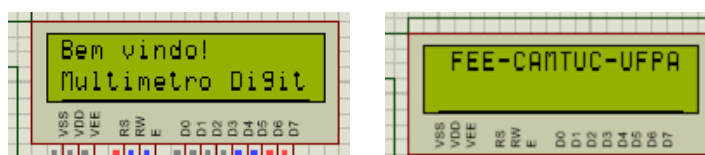
3.2 Lógica de Programação e Interface do Multímetro

A análise virtual do multímetro foi implementada com o software Proteus 8.9, o qual oferece um ambiente de simulação de circuitos eletrônicos através da ferramenta ISIS. Além da plataforma Arduino para a programação do sistema por meio da biblioteca Simulino, que contém modelos do microprocessador para simulação do Arduino no Proteus.

O Arduino é baseado na linguagem de programação C++, o código fonte do multímetro foi desenvolvido no ambiente integrado IDE do Arduino. Com a lógica de programação finalizada, foi selecionado o menu “arquivo” da IDE do Arduino e em seguida, na opção “preferências”, selecionou-se a opção “mostrar mensagens de saída” para compilação e carregamento. Posteriormente foi selecionada a entrada e o tipo de placa para a qual pretendia carregar o programa. Assim, ao clicar em compilar, a IDE do Arduino cria um arquivo de extensão .hex, que será utilizado para gravar o código no Simulino do Proteus e assim realizar o carregamento da simulação.

A parte inicial da programação na IDE do programa Arduino é definida pelas configurações de inicialização e definições das bibliotecas de suporte. Temos também a definição das variáveis responsáveis pela alocação da informação proveniente dos botões de seleção para a leitura das grandezas. Quando o multímetro é ligado, temos uma mensagem de boas-vindas apresentada no display lcd com as seguintes informações: "Bem-vindo, Multímetro Digital", em seguida, "FEE-CANTUC-UFPA", como mostrado na figura 21.

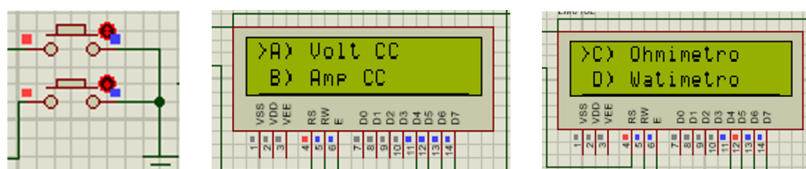
Figura 21 – Mensagem de boas-vindas do multímetro digital.



Fonte: Autoria própria.

O multímetro contém um menu interativo em formato de lista com as opções das grandezas a serem medidas. Para isso, foi utilizado dois botões de navegação, no qual um dos botões faz a listagem do menu e o outro botão tem a função de seleção para entrar no respectivo menu. Na figura 22 podemos ver os elementos de simulação dos botões, e no display virtual, o menu em formato de lista.

Figura 22 – Botões de seleção e menu do multímetro digital.



Fonte: Autoria própria.

Na primeira parte do código (quadro 3), foram declaradas as bibliotecas principais. Através da diretiva `#include` é indicado ao Arduino que será utilizada a biblioteca `Wire.h`, responsável por conter as informações necessárias para realizar a comunicação entre os dispositivos por meio do protocolo I2C. Em seguida, foi adicionada a biblioteca `LiquidCrystal_I2C` informando ao Arduino o tipo de LCD escolhido.

Quadro 3 – Código para configuração de bibliotecas e declaração de variáveis

```
//Declaração das bibliotecas:
#include <Wire.h> // Biblioteca utilizada para fazer a comunicação com o I2C
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Biblioteca utilizada para fazer a comunicação
//com o display 20x4
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); //Define o tipo do display LCD

//Declaração das variáveis Globais e os botões de comando;
#define menu 13 // Define o botão de Menu
#define enter 8 // Define o botão de Enter
// Definindo as funções para operar os botões de comando:
void readButts(); // Função para ler os botões
void list_menu(); // Função para listar o menu
void menu_select(); // Função para selecionar o menu
//Declarando as variáveis globais da Lista do MENU (Vetores)
int line[4] = {0,1,2,3}, //Posições das linhas das funções,de 0 a 3(4funções)
line_bk[4], // Vetor de backup, necessário para rotação das funções
index, menu_number = 1; //Variaveis usadas no menu de seleção
boolean menu_flag = 0, enter_flag = 0,sub_menu = 0; //Flags usadas no menu
```

Fonte: Autoria própria.

Na declaração das variáveis globais, foi definido os botões conectados aos pinos 13 e 8 do Arduino e, respectivamente, declaradas as funções de operação dos mesmos. Uma função é para ler os botões, outra para listar o menu, e a terceira função para selecionar o menu.

A estrutura do menu é baseada em quatro menus principais, então, foram declarados vetores utilizando a sintaxe line, com quatro elementos, com carregamento em 0, 1, 2,3 e um line para backup. Também indicamos uma variável que armazena o valor do menu atual iniciado em um, por meio de um index, menu_number. Por último, foi utilizado alguns flags para os botões e indicação do menu.

Na função void setup, mostrada no 4, os botões foram configurados como entrada, de resistência interna PULL UP do pino digital do Arduino, sendo acionados pelo modo INPUT_PULLUP. A comunicação serial com o display e seu funcionamento é realizado pelos comandos init e backlight que são específicos da biblioteca LiquidCrystal_I2C, para comunicação I2C. Com os comandos print e setCursor, configuramos a dinâmica do texto declarado no escopo, e enviamos ao display.

Quadro 4 – Código de inicialização dos pinos e mensagem de boas-vindas.

```
void setup() {
  // Teclas de comando:
  pinMode(menu, INPUT_PULLUP);
  pinMode(enter, INPUT_PULLUP);
  Serial.begin(9600);
  //-----
  // Iniciando o funcionamento do display:
  lcd.init(); // Serve para iniciar a comunicação com o display já conectado
  lcd.backlight(); // Serve para ligar a luz do display
  lcd.begin (16,3); // Inicia o display em colunas e linhas
  lcd.clear(); // Serve para limpar a tela do display
  //Texto de apresentação:
  lcd.setCursor(0,0); lcd.print("Bem vindo!           FEE-CAMTUC-UFPA");
  lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Multímetro Digital");
  delay(2500);
  for(int posi_LCD = 0; posi_LCD < 18; posi_LCD ++){
  {lcd.setCursor(0,0);lcd.scrollDisplayLeft();delay(100);} // delay: 500
  delay(750);
  lcd.clear(); // Serve para limpar a tela do display
  lcd.setCursor(0,0); lcd.print(">");} // Seta o cursor > na posição 0,0
```

Fonte: Autoria própria.

Na função void loop, mostrada no quadro 5, testamos o comando sub_menu, que é uma flag que se inicia em zero, declarada nas variáveis globais. Com isso conseguimos imprimir os menus na tela do display, no qual, o menu A representa o voltímetro CC, o menu B o amperímetro CC, o menu C o ohmímetro e o menu D representa o wattímetro. Por último chamamos a função readButts para leitura dos botões.

A função void readButts foi criada para executar a leitura dos botões de navegação, como mostrado no quadro 6. Ao pressionar e soltar o botão menu, é chamado o list menu, listando as opções na tela do display.

Quadro 5 – Código de declaração da função submenu.

```
void loop() {
// Indicação do Menu no display LCD:
digitalWrite(led_testeCC, LOW);
lcd.setCursor(0,0); lcd.print(">"); // Seta o cursor > na posição 0,0
if(!sub_menu)
{ lcd.setCursor(1,line[0]);
  lcd.print("A) Volt CC      ");
  lcd.setCursor(1,line[1]);
  lcd.print("B) Amp CC    ");
  lcd.setCursor(1,line[2]);
  lcd.print("C) Ohmimetro");
  lcd.setCursor(1,line[3]);
  lcd.print("D) Watimetro");
  }
readButts(); }
```

Fonte: Autoria própria.

Através do comando `menu_number`, sempre que o botão for pressionado, é adicionado uma variável a mais, indicando qual opção do menu será selecionada. Se a quantidade de opções apresentadas no menu for maior do que quatro, voltamos ao início do menu. Caso o botão seja pressionado e não identificar nenhuma grandeza retorna ao estado inicial zero. O botão enter, ao ser pressionado, chama a função `menu_Select`, o que inverte a flag declarada, tornando a função `if sub_Menu` falsa e assim não imprimir mais a lista do menu.

Quadro 6 – Código de declaração da função para leitura dos botões de navegação.

```
// Leitura dos botões para executar seleção do medidor no menu:
void readButts() {
int B = sizeof(line)/sizeof(line[0]); // Variavel com a dimensão do array line
if(!digitalRead(menu)) menu_flag = 0x01; // Lê o estado lógico da entrada 13
if(digitalRead(menu) && menu_flag) {
  menu_flag = 0x00; //zera a flag
  list_menu(); // Chama a função lista, para descer as opções no menu
  menu_number+=1;//Variavel de adição sempre que o botão menu for pressionado
  if(menu_number > B) menu_number = 1;
}
if(!digitalRead(enter)) enter_flag = 0x01;
if(digitalRead(enter) && enter_flag) {
  enter_flag = 0x00; //zera a flag
  //sub_menu = !sub_menu; // inverte o estado lógico da variável sub_menu
  menu_select(); } }
```

Fonte: Autoria própria.

A função `list_menu` é o algoritmo principal de controle do código. Sempre que pressionamos e soltamos a tecla menu, queremos trocar a opção do mesmo, então, para que os elementos dos vetores troquem de valores entre si, de forma circular, foi declarado um laço `for`. Para isso, criamos um `index` que recebe `i-1` e armazenamos em um vetor auxiliar, `line_bk`, o valor do vetor atual, `line[i]`. Logo, se `index` for menor do que zero, passamos a exibir o conteúdo `line_bk[i+A]`, algoritmo necessário para que o último valor do vetor não seja descartado e com isso não perder o primeiro menu. Enquanto `index` não for zero, a posição do menu é atualizada com a posição anterior, `line[i-1]`, e assim conseguimos realizar a troca de cada elemento do menu, como indicado na parte do código no quadro 7.

Quadro 7 – Código do loop de algoritmo de controle.

```
void list_menu() {
// Variavel com a dimensão do array line menos um
  int A = sizeof(line)/sizeof(line[0])-1;
// A congatem inicia com i=2, diminuindo de 1 em 1, enquanto i maior que -1;
  for(int i=A; i>-1; i--) {
    index = i-1; //Indice igual a i menos 1
    line_bk[i] = line[i]; //Salva o vetor line atual no line_backup
//Se o indice for <0, resetar o line para o line[inicial]
    if(index < 0) line[i] = line_bk[i+A];
// Desloca as colunas do vetor line, para fazer as funções subirem no display LCD
    else line[i] = line[i-1];
      }
  }
}
```

Fonte: Autoria própria.

A função `void menu_select` (quadro 8) permite realizar a operação do botão de seleção. Quando o botão `enter` é pressionado, utilizamos um `switch` para verificar qual o valor do `menu_number` e comparar a variável aos valores especificados nos comandos `case`. Assim, quando um comando `case` conter o mesmo valor ao da variável, o código para esse comando `case` é executado.

Quadro 8 – Código da função de seleção do menu.

```
void menu_select() {
  switch(menu_number){ .....
  .....}
}
```

Fonte: Autoria própria.

No case 1, mostrado no quadro 9, declaramos as condições para leitura de tensão. Inicialmente foi ajustado a variável `ii` igual a zero, sendo uma variável de entrada dos vetores, definidos no início do código. As variáveis `sensorValue` e `escalaValue`, são responsáveis por realizar as leituras das portas analógicas A0 e A1 do Arduino. Desta forma, foi inserido, uma escala para consulta da leitura de tensão, em que o sinal aplicado à porta A0 define a escala de medição do voltímetro.

Quadro 9 – Código que define as estruturas condicionais para leitura de tensão.

```
case 1:
do{
int ii=0;
int sensorValue = analogRead(A0); // Leitura da porta analógica do arduino A0
int escalaValue = analogRead(A1); // Leitura da porta analógica do arduino A1
if (escalaValue>400 && escalaValue<800 ) ii=1;
if (escalaValue>0 && escalaValue<400 ) ii=2;
//Serial.println(escalaValue); Serial.println(ii);
float voltage_A0 = sensorValue *Escala_tensao[ii]* (V_max_REF[ii] / 1023.0);

// Declaração da variável Tensão
// Imprimir no display LCD as informações de tensão
if (voltage_A0<Escala_tensao_inteira[ii]){
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);lcd.print("ESCALA");
lcd.setCursor(7, 0);lcd.print(Escala_tensao_inteira[ii]);
lcd.setCursor(10, 0);lcd.print("V");
lcd.setCursor(0, 1);lcd.print("Tensao:");
lcd.setCursor(9, 1);lcd.print(voltage_A0);
lcd.setCursor(15, 1);lcd.print("V");
delay(500);}
else{
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);lcd.print("ESCALA");
lcd.setCursor(7, 0);lcd.print(Escala_tensao_inteira[ii]);
lcd.setCursor(10, 0);lcd.print("V");
lcd.setCursor(0, 1);lcd.print("Mudar de Escala:");
delay(1500);
}

if (digitalRead(enter)==LOW){
lcd.setCursor(12, 0);lcd.print("Hold");
delay(10000);
}
}
while (digitalRead(menu));
lcd.clear(); // Serve para limpar a tela do display
lcd.setCursor(1,0); lcd.print("Voltar ao Menu");
delay(2000);
lcd.clear(); // Serve para limpar a tela do display
break;
```

O Arduino possui um conversor ADC com resolução de 1024, assim, conhecendo a tensão máxima de referência da escala, pode-se dividi-la por 1024, obtendo os passos de tensão de medição. Logo, para calcular o valor da tensão medida, basta multiplicar, o valor obtido pela relação entre, os valores das tensões lidos nas portas analógicas da entrada A1. Quando a tensão medida é menor que o valor de tensão máxima da escala, o voltímetro imprime o valor de tensão medido. Caso o valor de tensão medida não esteja dentro da escala selecionada, aparecerá na tela do display “Mudar escala”.

Quando o botão enter estiver em nível lógico baixo, é ativada a função Hold, travando a leitura na tela do display por dez segundos. Caso o botão menu seja pressionado, o valor digital é lido dentro do loop while, finaliza o case 1 por meio da função break, e então retorna o multímetro à função menu, após dois segundos.

No case 2, mostrado no quadro 10, têm-se as condições para leitura de corrente. Primeiro foi feito o ajuste da corrente de referência e criado um loop for que leva cem amostras de leitura analógica do sensor de efeito hall ACS712, onde é realizada a média aritmética das cem amostras. Isso foi necessário como método para ter uma melhor precisão.

Dentro desse loop, a leitura do sensor e o cálculo da corrente são feitos da seguinte forma: a entrada analógica analogRead(A0) leva o valor da tensão do sensor proporcional à corrente medida. Sabendo que a tensão de saída do sensor é no máximo 5V, então dividimos esse valor por 1023 para termos a resolução do conversor ADC. Esse valor é multiplicado pela leitura analógica do pino A2 e armazenado na variável de tensão. Para o cálculo da corrente, ajustamos o zero de referência, pois podemos ter correntes positivas e negativas. Isso ocorre da seguinte maneira: para correntes positivas, o sensor produz um sinal na porta A2 que varia de 2,5V a 5V; para correntes negativas, o sensor produz um sinal na porta A2 que varia de 0V a 2,5V. Sabendo que o sensor tem sensibilidade de 66mVA, então, dividimos o valor obtido pela sensibilidade, obtendo assim o valor atual.

Na segunda parte do código, temos um loop de consulta, perguntando se a medida realizada está dentro da faixa de leitura permitida pelo instrumento. Caso contrário, aparecerá na tela do display a informação “Sem leitura”. O valor mínimo de 100mA indica a margem de segurança que o instrumento pode medir. Se a corrente medida estiver dentro da faixa estabelecida, será impresso na tela do display, as informações da “Faixa” de -30A a 30A, corrente máxima que o sensor pode medir e o valor da mesma.

Novamente, quando o botão enter estiver em nível lógico baixo, é ativada a função Hold, travando a leitura na tela do display por dez segundos. Caso o botão menu seja pressionado, o valor digital é lido dentro do loop while, finaliza o case 2 por meio da função break, e então retorna o multímetro à função menu, após dois segundos. A parte do código que implementa o case 2 é mostrado no quadro 10.

Quadro 10 – Código que define as estruturas condicionais para leitura de corrente.

```
case 2:
do{
float corrente_SUM = 0;
// 100 amostras de leitura analógica do sensor ACS712 para maior precisão
for (int i = 0; i < NumAmostras; i++) {
voltage_A2 = analogRead(A2) * 5.0 / 1023.0;
// Valor da sensibilidade é de 66mV/A
corrente_SUM += (voltage_A2 - 2.4955) / Sensibilidadacc;
}
float corrente = (corrente_SUM / NumAmostras);
// Mostrar no serial monitor a corrente média calculada e o sinal de tensão em A1:
MostrarMedicao("SaidadoSensor: ", voltage_A1, " V");
// Imprimir no display LCD as informações de corrente:
if ( (corrente > -0.100) && (corrente < 0.100)) {
// Imprimir no LCD: Sem Leitura
lcd.clear();lcd.setCursor(2, 0); lcd.print("Sem leitura");
// Imprimir no LCD: Corrente 0A
lcd.setCursor(1, 1); lcd.print("Corrente 0A");
delay(500); }
else {
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);lcd.print("Faixa");
lcd.setCursor(6, 0);lcd.print("-30A a 30A");
lcd.setCursor(0, 1);lcd.print("Corrente:");
lcd.setCursor(9, 1);lcd.print(corrente);
lcd.setCursor(15, 1);lcd.print("A");
delay(500);
if (digitalRead(enter)==LOW){
lcd.setCursor(12, 0);lcd.print("Hold");
delay(10000);
}
} while (digitalRead(menu));
lcd.clear(); // Serve para limpar a tela do display
lcd.setCursor(1,0); lcd.print("Voltar ao Menu");
delay(2000);
lcd.clear(); // Serve para limpar a tela do display
break;
```

Fonte: Autoria própria.

No case 3 são apresentadas as condições para leitura de resistência elétrica. A medição de resistência elétrica pode ser realizada em quatro escalas: 2k, 20k, 200k e 2M. A leitura para cada escala se dá de forma semelhante, modificando apenas o valor da resistência, como é mostrado no código descrito em três partes, nos quadros de 11 a 13. A primeira escala declarada, foi para medir resistências de 0 a 2k, da seguinte forma: Dentro da condicional if declaramos o valor da escala de seleção e determinamos os pinos de referência como entrada e saída, estabelecendo o pino da resistência de 2k como OUTPUT e os demais INPUT para aplicar nos mesmos 5V ou alta impedância quando necessário.

Quadro 11 – Código que define as estruturas condicionais para leitura de resistência - parte 1.

```

case 3:
do{
  digitalWrite(led_testeCC, LOW);// Apagar o LED de teste de continuidade
//Escala de 2Kohm: -----
  if (digitalRead(Escala_2k)) {
pinMode(ch_2K,OUTPUT); pinMode(ch_20K,INPUT);
pinMode(ch_200K,INPUT); pinMode(ch_1M,INPUT);
digitalWrite(Apply_voltage, HIGH); digitalWrite(ch_2K, LOW);
// Cálculo da resistência a partir da leitura da entrada A3:
float R1 = 2; voltage_A3 = analogRead(A3);buffer = voltage_A3 * V_in;
float V_out = (buffer) / 1024.0; buffer = (V_in / V_out) - 1;
float R2 = R1 * buffer*1000; //1000 porque o expressamos em ohms
  // Imprimir a informação de leitura de resistência
  if (R2 <= 2000) {
    lcd.clear();// Limpar o display
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("ESCALA: 0 - 2K");
    lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Res= "); //Resistência lida
    lcd.setCursor(5,1); lcd.print(R2); //Resistência lida
    lcd.setCursor(11,1); lcd.print(" ohms");// Unidade
    delay(500); } else {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("ESCALA: 0 - 2K");
    lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Sem leitura de R");
    delay(500); }
  if (digitalRead(enter)==LOW){
    lcd.setCursor(12, 0);lcd.print("Hold");// Informa a função hold
    delay(10000); } }
//Escala de 20Kohm: -----
if (digitalRead(Escala_20k)) {
pinMode(ch_2K,INPUT); pinMode(ch_20K,OUTPUT);
pinMode(ch_200K,INPUT); pinMode(ch_1M,INPUT);
digitalWrite(Apply_voltage, HIGH); digitalWrite(ch_20K, LOW);
// Cálculo da resistência a partir da leitura da entrada A3:
float R1 = 20; voltage_A3 = analogRead(A3); buffer = voltage_A3 * V_in;
float V_out = (buffer) / 1024.0;buffer = (V_in / V_out) - 1;
float R2 = R1 * buffer;
  // Imprimir a informação de leitura de resistência
  if (R2 <= 20) {
    lcd.clear();// Limpar o display
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("ESCALA: 0 - 20K");
    lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Res= "); //Resistência lida
    lcd.setCursor(5,1); lcd.print(R2); //Resistência lida
    lcd.setCursor(11,1); lcd.print("Kohms");// Unidade
    delay(500); } else {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("ESCALA: 0 - 20K");
    lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Sem leitura de R")
    delay(500); }
  if (digitalRead(enter)==LOW){
    lcd.setCursor(12, 0);lcd.print("Hold");// Informa a função hold
    delay(10000); } }

```

Fonte: Autoria própria.

Quadro 12 – Código que define as estruturas condicionais para leitura de resistência - parte 2.

```

//Escala de 200Kohm: -----
if (digitalRead(Escala_200k)) {
pinMode(ch_2K,INPUT); pinMode(ch_20K,INPUT);
pinMode(ch_200K,OUTPUT); pinMode(ch_1M,INPUT);
digitalWrite(Apply_voltage, HIGH); digitalWrite(ch_200K, LOW);
// Cálculo da resistência a partir da leitura da entrada A3:
float R1 = 200; voltage_A3 = analogRead(A3); buffer = voltage_A3 * V_in;
float V_out = (buffer) / 1024.0; buffer = (V_in / V_out) - 1;
float R2 = R1 * buffer;
// Imprimir a informação de leitura de resistência
if (R2 <= 200) {
lcd.clear();// Limpar o display
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("ESCALA: 0 - 200K");
lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Res= "); //Resistência lida
lcd.setCursor(5,1); lcd.print(R2); //Resistência lida
lcd.setCursor(11,1); lcd.print("Kohms");// Unidade
delay(500); } else {
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("ESCALA: 0 - 200K");
lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Sem leitura de R");
delay(500); }
if (digitalRead(enter)==LOW){
lcd.setCursor(12, 0);lcd.print("Hold");// Informa a função hold
delay(10000); } }
//Escala de 2Mohm: -----
if (digitalRead(Escala_1M)) {
pinMode(ch_2K,INPUT); pinMode(ch_20K,INPUT);
pinMode(ch_200K,INPUT); pinMode(ch_1M,OUTPUT);
digitalWrite(Apply_voltage, HIGH); digitalWrite(ch_1M, LOW);
// Cálculo da resistência a partir da leitura da entrada A3:
float R1 = 1; voltage_A3 = analogRead(A3); buffer = voltage_A3 * V_in;
float V_out = (buffer) / 1024.0; buffer = (V_in / V_out) - 1;
float R2 = R1 * buffer;
// Imprimir a informação de leitura de resistência
if (R2 <= 2) {
lcd.clear();// Limpar o display
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("ESCALA: 0 - 2M");
lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Res= "); //Resistência lida
lcd.setCursor(5,1); lcd.print(R2); //Resistência lida
lcd.setCursor(11,1); lcd.print("Mohms");// Unidade
delay(500); } else {
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("ESCALA: 0 - 2M");
lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Sem leitura de R");
delay(500); }
if (digitalRead(enter)==LOW){
lcd.setCursor(12, 0);lcd.print("Hold");// Informa a função hold
delay(10000); } }

```

Fonte: Autoria própria.

Quadro 13 – Código que define as estruturas condicionais para leitura de resistência - parte 3.

```
// Teste de continuidade: -----
if (digitalRead(Escala_continuidade)) {
pinMode(ch_2K,OUTPUT); pinMode(ch_20K,OUTPUT);
pinMode(ch_200K,OUTPUT); pinMode(ch_1M,OUTPUT);
digitalWrite(Apply_voltage, HIGH);digitalWrite(ch_2K, LOW);
digitalWrite(ch_20K, LOW);digitalWrite(ch_200K, LOW);digitalWrite(ch_1M, LOW);
    voltage_A3 = analogRead(A3);
    lcd.clear(); // Serve para limpar a tela do display
    lcd.setCursor(0,0); lcd.print("Teste de cont.");
    if (voltage_A3>=1000 ){ lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Circuito fechado");
digitalWrite(led_testeCC, HIGH);}
    else { lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("Circuito aberto");
        digitalWrite(led_testeCC, LOW);}
        delay(500);          } }
while (digitalRead(menu));
    lcd.clear(); // Serve para limpar a tela do display
    lcd.setCursor(1,0); lcd.print("Voltar ao Menu");
    delay(2000);
    lcd.clear(); // Serve para limpar a tela do display
    digitalWrite(led_testeCC, LOW);
    break;
```

Fonte: Autoria própria.

O cálculo da resistência é feito a partir da entrada analógica A3 do Arduino. Após a declaração do valor de R_1 , é alocado um buffer de memória para medir V_{out} , que é a tensão de saída no ponto médio, por meio de um divisor de tensão. Conhecendo os parâmetros (R_1 , V_{in} , V_{out}), fica fácil de calcular a resistência do resistor em questão. Dentro deste mesmo loop, imprimimos a informação de leitura da resistência. Para o resistor de 2k vamos multiplicar o valor encontrado por mil, uma vez que estamos expressando valores em ohms. Assim, se o valor calculado de R_2 for menor ou igual dois mil, será impresso na tela do display as informações da escala que está sendo utilizada para medição e o valor da resistência encontrado, junto com a unidade de medida correspondente. Caso a resistência esteja fora da escala, então será impresso, “Sem leitura de R”. Com o botão enter em nível lógico baixo, chamamos a função “Hold”, que irá segurar a leitura na tela do display por dez segundos. Além das demais escalas, que seguem o mesmo padrão para medição, foi definida também uma escala para teste de continuidade.

O loop para teste de continuidade é iniciado atribuindo um valor ao pino digital digitalRead. Todos os demais pinos atribuídos aos valores utilizados para cálculo da resistência, passaram a ser pinos de entrada, OUTPUT. Uma tensão de 5V e em estado alto, é aplicada ao pino digital conectado ao resistor desconhecido e as resistências conhecidas são declaradas em nível lógico baixo. Com isso, se a tensão na porta analógica

A3 do Arduino for maior ou igual a 1000, é declarado como circuito fechado, e então o led acende indicando a continuidade. Em caso de leitura menor que 1000, o código considera o circuito aberto e nessa situação, o led de teste não acende. Caso o botão menu seja pressionado, o valor digital é lido dentro do loop while, finaliza o case 3 por meio da função break, e então retorna o multímetro à função menu, após dois segundos.

Para o case 4 foram declaradas as condições para leitura de potência. Para isso, utilizamos os cálculos de tensão e de corrente, como visto nos cases 1 e 2, em conjunto. A combinação dos códigos é mostrada no quadro 14. Com essas duas grandezas, conseguimos realizar o cálculo da potência, que é o produto da tensão com a corrente. É impresso no display as informações, “Potencia CC”, o valor encontrado e a unidade de medida “W”.

Quadro 14 – Código que define as estruturas condicionais para leitura de potência.

```
case 4:
do{
//Medição de tensão:
int ii=0;
int sensorValue = analogRead(A0); // Leitura da porta analógica do arduino A0
int escalaValue = analogRead(A1); // Leitura da porta analógica do arduino A1
if (escalaValue>400 && escalaValue<800 ) ii=1;
if (escalaValue>0 && escalaValue<400 ) ii=2;
//Serial.println(escalaValue); Serial.println(ii);
float voltage_A0 = sensorValue *Escala_tensao[ii]* (V_max_REF[ii] / 1023.0);
//Medição de corrente:
float corrente_SUM = 0;
for (int i = 0; i < NumAmostras; i++) {
// 100 amostras de leitura analógica do sensor ACS712 para maior precisão
voltage_A2 = analogRead(A2) * 5.0 / 1023.0;
corrente_SUM += (voltage_A2 - 2.4955) / Sensibilidadcc;}
// Valor da sensibilidade é de 66mV/A
float corrente = (corrente_SUM / NumAmostras);
// Cálculo da potência
float potencia = voltage_A0*corrente;
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);lcd.print("Potencia CC");
lcd.setCursor(0, 1);lcd.print("P = ");
lcd.setCursor(7, 1);lcd.print(potencia);
lcd.setCursor(15, 1);lcd.print("W");
delay(500);
if (digitalRead(enter)==LOW){
lcd.setCursor(12, 0);lcd.print("Hold");
delay(10000); } } while (digitalRead(menu));
lcd.clear(); // Serve para limpar a tela do display
lcd.setCursor(1,0); lcd.print("Voltar ao Menu");
delay(2000);
lcd.clear(); // Serve para limpar a tela do display
break;
```

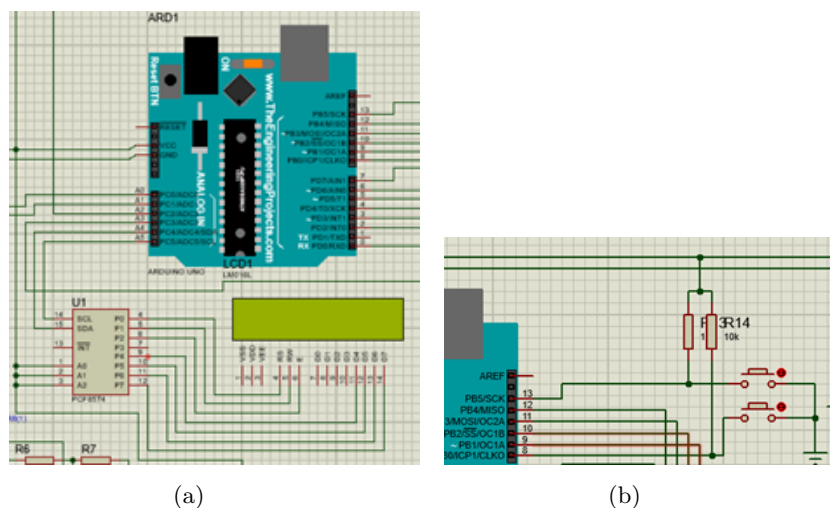
Fonte: Autoria própria.

Quando o botão enter estiver em nível lógico baixo, é ativada a função Hold, travando a leitura na tela do display por dez segundos. Caso o botão menu seja pressionado, o valor digital é lido dentro do loop while, finaliza o case 4 por meio da função break, e então retorna o multímetro à função menu, após dois segundos.

3.3 Descrição dos Circuitos

Para a montagem do circuito do display LCD, foi escolhido o módulo de comunicação I2C, com este componente é possível controlar o display utilizando apenas duas portas do Arduino. Sua principal função é simplificar as conexões e facilitar a utilização do display ao microcontrolador. O módulo deve ser acoplado ao display por meio da conexão de seus 16 pinos. O módulo I2C contém quatro pinos para conexão com o Arduino. Estes pinos são: GND, VCC, SDA e SCL. O pino SDA é o responsável pela transferência e recebimento de dados, este é conectado ao pino A4. Por sua vez, o pino SCL é usado para temporização, e é associado ao pino A5. O GND do módulo I2C é conectado ao pino GND do Arduino e o VCC é conectado ao 5V do Arduino, uma vez, que o componente opera com uma tensão de 5V. O módulo também conta com dois pinos para controle da luz de fundo do visor do display, que se encontram conectados por um jumper, por padrão. As conexões entre display, módulo I2C e Arduino no circuito de simulação no Proteus é mostrada na figura 23a.

Figura 23 – (a) Circuito do display LCD; (b) Circuito dos botões de navegação.



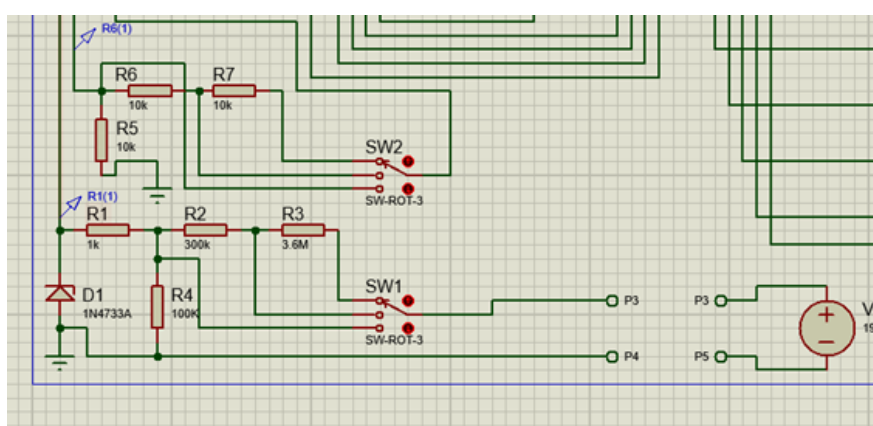
Fonte: Autoria própria.

Os botões de navegação foram configurados de forma simples. O botão menu, foi conectado à porta 13 do Arduino por meio de um circuito pull-up. O botão enter, foi conectado à porta 8, também por meio de um circuito pull-up. Os resistores do circuito pull-up foram escolhidos de maneira a garantir a menor corrente necessária apenas para ativação das portas de entrada do Arduino, como é mostrado na figura 23b.

3.3.1 Circuito de condicionamento e seleção de escalas do voltímetro

O princípio de desenvolvimento do circuito do voltímetro, foi elaborado por meio de um conjunto de divisores de tensão em cascata. O divisor de tensão constitui a impedância de entrada cuja a saída é a tensão que será aplicada ao pino analógico do Arduino. As entradas analógicas do Arduino podem medir até 5V, por isso, o divisor de tensão se encarrega de dividir a tensão de entrada e adaptá-la à janela de tensão que as entradas analógicas do Arduino podem ler. O mesmo fornece uma tensão ao pino do Arduino que é convertida em um sinal digital que pode ser processado pelo microcontrolador. Podemos verificar o circuito do voltímetro na figura 24.

Figura 24 – Circuito do voltímetro.



Fonte: Autoria própria.

A partir da mudança da chave SW1, é possível realizar a medição de tensão dentro de três faixas: 5V, 20V e 200V. No circuito da escala, controlado por SW2, há um circuito divisor de tensão formado por resistores de 10k em cascata. É importante destacar que, SW1 e SW2 são interligados mecanicamente em uma mesma chave de três posições. Enquanto a saída do circuito de condicionamento, controlado por SW1, é conectada a porta analógica A0, a saída do circuito de seleção, controlado por SW2, é conectada a porta analógica A1. No circuito, é o diodo zener o componente responsável por limitar a tensão na porta analógica A0 do Arduino. Assim, para projetar o circuito de condicionamento, basta correlacionar o valor máximo de leitura de tensão na escala com o a saída de 5V.

Analisando o circuito, temos que, no resistor de 1k, não passa corrente, uma vez que, não vai corrente para o Arduino (corrente suficientemente pequena na porta analógica do arduino). Por esse motivo, a tensão em cima do resistor R1 é zero, nos levando a afirmar que a saída do divisor de tensão no nós entre R1, R2 e R4, está virtualmente ligada, em potencial elétrico, à entrada analógica A0 do Arduino. Diferente de um voltímetro analógico, a medição de tensão será projetada pelo cálculo da tensão de saída do divisor de tensão na equação (4), e não de um divisor de corrente, como na equação (1).

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_4}{R_{escala} + R_4} \quad (4)$$

onde $R_{escala} = 0$ na escala de 5V, $R_{escala} = R_2$ na escala de 20V e $R_{escala} = R_2 + R_3$ na escala de 200V, escalas selecionadas por SW1. Ao mesmo tempo, temos que a tensão na porta analógica A1 será 5V na escala de 5V, 2,5V na escala de 20V e 1,67V na escala de 200V, escalas selecionadas por SW2. Vamos frisar mais uma vez que, os sinais lidos em A1 indicam ao Arduino em qual das três escalas o voltímetro deve atuar. Podemos determinar a resistência equivalente da escala simplesmente atribuindo $V_{out} = 5V, R_4 = 100k$, e então invertendo a equação (4), como é mostrado na equação (5).

$$R_{escala} = R_4 \left[\frac{V_{in}}{V_{out}} - 1 \right] \quad (5)$$

Assim, para a escala de $V_{(in,max)} = 5V$, $R_{escala} = 0\Omega$; para a escala de $V_{(in,max)} = 20V$, $R_{escala} = R_2 = 300k\Omega$; para a escala de $V_{(in,max)} = 200V$, $R_{escala} = R_2 + R_3 = 300k\Omega + 3,6M\Omega = 3,9M\Omega$. Mesmo na menor escala, a máxima corrente drenada pelo circuito de condicionamento é aproximadamente $50\mu A$. Por fim, com o objetivo de garantir que a tensão de saída do circuito de condicionamento não ultrapasse valores muito superiores a 5V, escolhe-se o diodo zener 1N4733, que tem especificação de 5,1V e 1W.

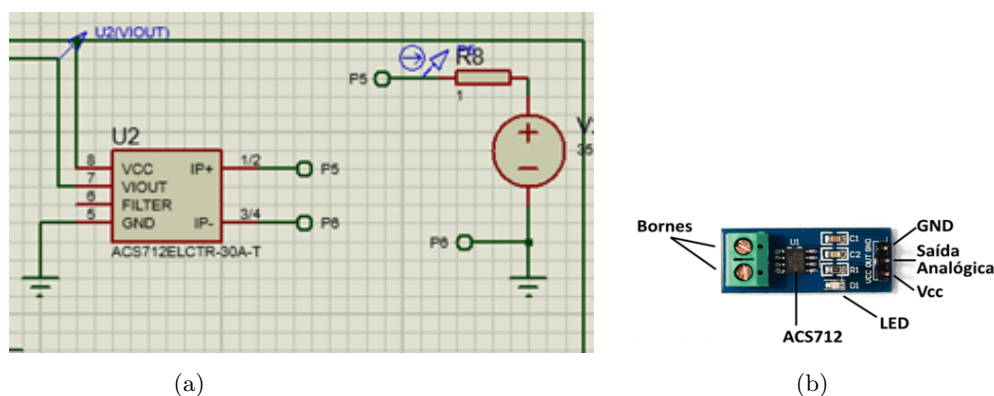
3.3.2 Circuito de medição de corrente do amperímetro

O circuito do amperímetro foi baseado no sensor de efeito hall. Ao usar o método de medição através do efeito hall, não é modificada a resistência interna do circuito, ou seja, o instrumento não apresenta uma carga que modifique seu funcionamento, nem a medição, uma vez que a corrente fluirá por meio de um condutor dentro do sensor, isolado do circuito de medição. O sensor escolhido para a construção do amperímetro foi o ACS712, este é um sensor de corrente alternada e contínua, porém, em nosso projeto queremos medir apenas corrente contínua. O objetivo é realizar medições com um erro o mais baixo possível, buscando melhor precisão e exatidão nas leituras de corrente.

Os módulos com ACS712 são fáceis de conectar, esta é uma de suas grandes vantagens. O ACS712 fornece uma saída de tensão proporcional a intensidade através do sensor. Logo, sua conexão foi realizada da seguinte forma: Foi conectado GND e VCC, respectivamente, ao GND e 5V do Arduino, e a saída do sensor é conectada a entrada analógica A2 do Arduino, como mostrado na figura 25a.

No circuito da figura 25a, a fonte em série com o resistor R_8 apenas indicam um circuito de teste, que serão conectados em série com as entradas P5 e P6 do amperímetro. No sensor ACS712, quando uma corrente elétrica flui próximo a superfície de seu CI principal, a magnitude do campo magnético gerado é identificada, sendo traduzida para um sinal de tensão. Na figura 25b é mostrado um módulo ASC712, suas principais conexões e os componentes eletrônicos embarcados.

Figura 25 – (a) Circuito do amperímetro; (b) Circuito ACS712.



Fonte: Autoria própria e (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013).

O sensor de corrente adotado mede magnitudes de corrente em uma faixa de -30A a 30A, operando como um transdutor para sinais de tensão de 0 a 5V, idealmente. Assim, quando o circuito de entrada está aberto (lendo corrente de 0A), o sinal de tensão medido é por volta de 2,5V. A resolução do dispositivo dependem do modelo do sensor, assim, a tabela 1 mostra os valores para sensores com faixas de 5A, 20A e 30A.

Tabela 1 – Fator de proporcionalidade circuito ACS712 com diferentes faixas de corrente.

Intensidade máxima	Sensibilidade	Tensão de saída	Resolução
$\pm 5A$	$185mV/A$	$1,575V$ a $3,425V$	$26mA$
$\pm 20A$	$100mV/A$	$0,500V$ a $4,500V$	$49mA$
$\pm 30A$	$66mV/A$	$0,520V$ a $4,480V$	$74mA$

Fonte: Adaptado de (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013)

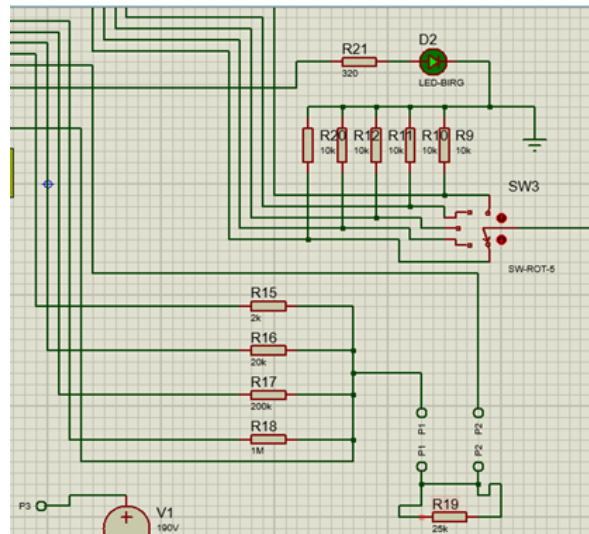
3.3.3 Circuito de condicionamento e seleção de escalas do ohmímetro

O hardware do ohmímetro é dividido em duas partes, circuito de condicionamento e circuito de seleção de escalas. O circuito de seleção de escalas é formado pelos resistores de $R_9, R_{10}, R_{11}, R_{12}$, e funcionam basicamente como pull-down, selecionando as escalas de $0 - 2k, 0 - 20k, 0 - 200k, 0 - 2M$, respectivamente, conectadas as entradas digitais 9, 10, 11 e 12, do Arduino.

Já o circuito de condicionamento foi projetado utilizando os resistores $R_{15}, R_{16}, R_{17}, R_{18}$, respectivamente conectados as entradas/saídas 3, 4, 5 e 6 digitais do Arduino, tendo um nó em comum conectada a porta analógica A3, responsável pela medição de tensão traduzida da medição de resistência, e em comum com o pino P1, que é o primeiro terminal do ohmímetro. O segundo terminal do ohmímetro, o pino P2 está conectada a saída digital 2 do Arduino.

A parte do circuito simulado, que implementa o ohmímetro é mostrado na figura 26. Neste também nota-se o circuito do teste de continuidade.

Figura 26 – Circuito do ohmímetro.



Fonte: Autoria própria.

A leitura de resistência é realizada da seguinte maneira, primeiramente, conecta-se a resistência de teste R_{teste} ($R_{19} = 25k$ na figura 26) aos terminais P1 e P2, em seguida, a saída digital 2 envia um sinal de nível ALTO=5V via pino P2. Como as entradas/saídas 3, 4, 5 e 6 estão em estado de alta-impedância, há excursão de tensão de 5V diretamente para a porta A3, assim, independente de R_{teste} o sinal em A3 é constante, e não há possibilidades de leitura de resistência. Contudo, ao selecionar uma das entradas/saídas 3, 4, 5 e 6 para nível baixo, há o efeito de um divisor de tensão, com saída em função de R_{teste} , sendo definida pela equação (6).

$$V_{out} = 5 \frac{R_{escala}}{R_{escala} + R_{teste}} \quad (6)$$

A partir do código programado, ao selecionar a escala de 2k por meio da chave SW3, fazendo que a porta 9 receba um sinal de nível ALTO, o Arduino mantém as entradas/saídas 4, 5 e 6 em alta impedância (HI - High impedance), e envia um sinal de nível baixo à saída 3, transformando $R_{escala} = R_{15} = 2k\Omega$ no resistor do divisor de tensão, permitindo a leitura de resistência dentro da faixa programada. O procedimento é semelhante quando selecionamos as outras escalas, e é resumido no quadro 15.

A partir da equação (6) é possível mostrar que a resistência de teste é uma função não linear, e inversa da tensão de saída do divisor de tensão, como é mostrado em (7).

$$R_{teste} = R_{escala} \left[\frac{5}{V_{out}} - 1 \right] \quad (7)$$

Quando $V_{out} \rightarrow 5V$, $R_{teste} = 0$, indicando curto circuito nos terminais do ohmímetro em qualquer escala, e quando $V_{out} \rightarrow 0V$, $R_{teste} = \infty$, indicando um circuito aberto nos terminais do ohmímetro. Por fim, ao escolher a entrada digital 7 por meio de SW3, o multímetro é configurado para operar na medição de teste de continuidade, como foi relatado na parte 3 do código de case 3 (quadro 13).

Quadro 15 – Resumo dos sinais elétricos na escolha de escalas do ohmímetro.

Escala de SW3	Porta que recebe o nível ALTO	Porta que produz saída de nível alto	Portas entrada/saída				R_{escala}
			3	4	5	6	
0-2k	9	2	0V	HI	HI	HI	$R_{15} = 2k\Omega$
0-20k	10	2	HI	0V	HI	HI	$R_{16} = 20k\Omega$
0-200k	11	2	HI	HI	0V	HI	$R_{17} = 200k\Omega$
0-2M	12	2	HI	HI	HI	0V	$R_{18} = 1M\Omega$

Fonte: Autoria própria.

3.3.4 Medição de potência a partir do voltímetro e amperímetro

Para o cálculo da potência elétrica, basta relacionar as grandezas de tensão e corrente medidos pelos circuitos do amperímetro e do voltímetro, respectivamente. Assim, podemos calcular a potência CC pela simples implementação no case 4 do código a equação (8).

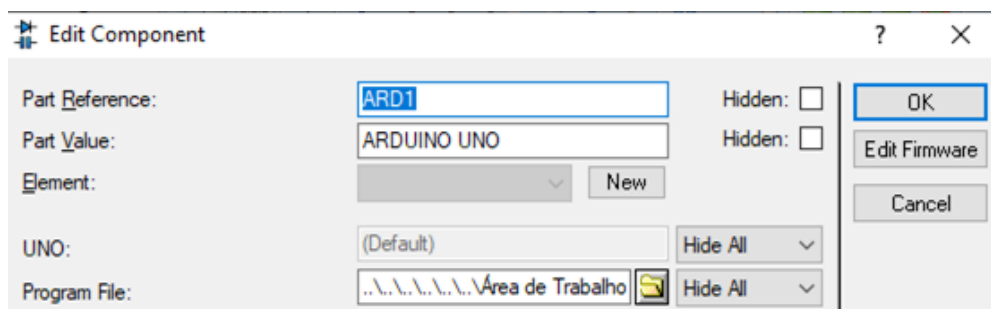
$$P_{CC} = V_{CC}I_{CC} \quad (8)$$

No amperímetro, conforme variamos a tensão no sensor ACS712, lemos o valor da corrente na faixa de -30A a 30A. Já no voltímetro, com a aplicação do divisor de tensão, torna-se possível medir tensões nas faixas 5V, 20V e 200V. Com isso, é possível indicar os dados de potência CC do circuito, com valores até 150W, 600W e 6kW.

3.4 Projeto da PCB do Multímetro de Bancada

Para a simulação do circuito, no ambiente virtual do software Proteus, utilizou-se um arquivo .hex, obtido a partir do processo de compilação do código fonte em C++ na IDE do Arduino. O arquivo .hex é gerado na pasta "AppData\\Local\\Temp\\". O nome do arquivo pode ser encontrado no próprio painel da IDE no momento da compilação ou do upload, assim, o arquivo gerado pode ser então copiado e colado na linha "Program File" do microcontrolador, vinculado ao Proteus. Ao clicar duas vezes sobre o simulino (versão virtual do arduino no proteus), basta definir o caminho para o arquivo .hex anteriormente separado, como é indicado na figura 27.

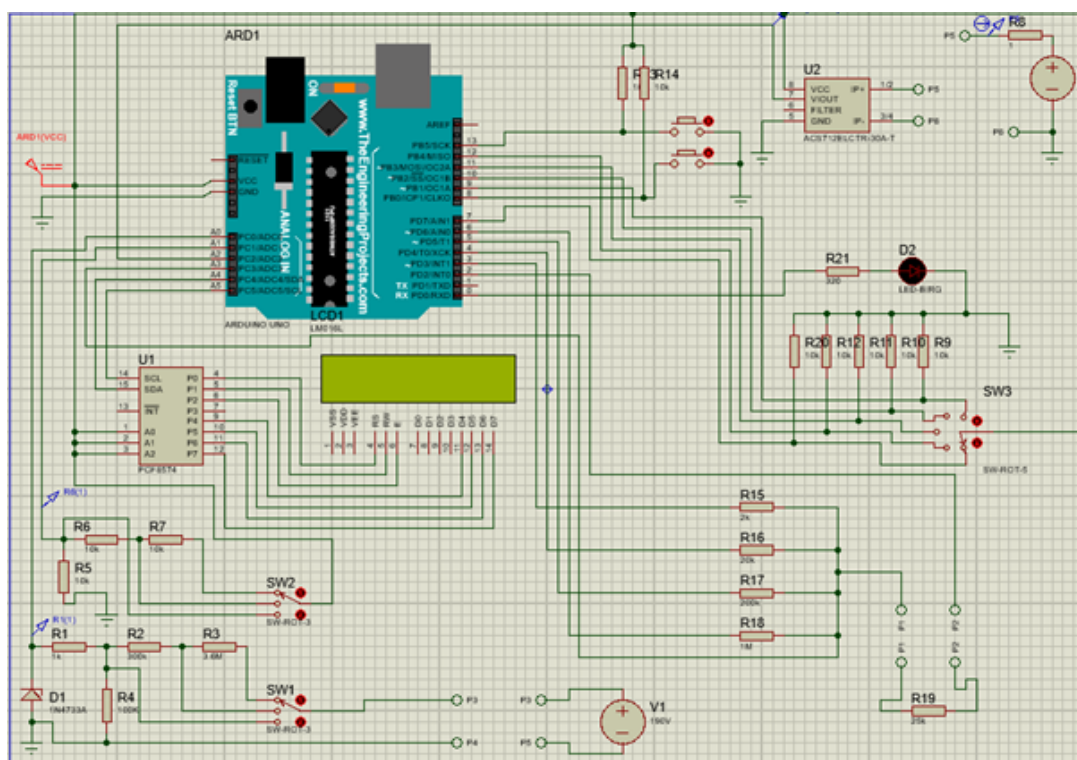
Figura 27 – Upload do arquivo .hex produzido pela IDE do arduino.



Fonte: Autoria própria.

Na figura 28, é apresentada a configuração completa do circuito eletrônico implementado no software Proteus, acoplado a plataforma Arduino. O mesmo, reportou resultados esperados, de acordo com o que foi projetado. Por meio dos botões de seleção foi possível identificar os medidores para realização das simulações. Também foi inserido ao circuito, fontes de tensão ajustáveis, gerador de sinal DC, pontas de provas de tensão e de corrente. O que contribuiu de forma significativa para melhoria do circuito, facilitando as leituras durante as medições.

Figura 28 – Simulação completa do Circuito do multímetro de bancada simulado no Proteus.

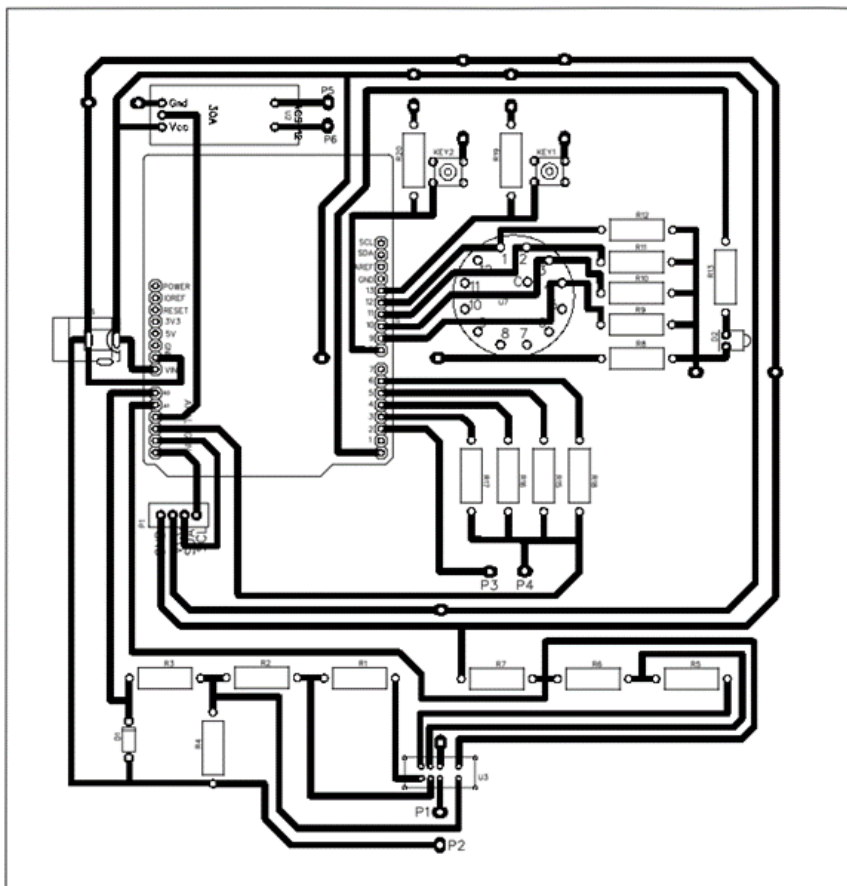


Fonte: Autoria própria.

Utilizando o Software EasyEDA PCB Desing, foi desenhado o layout da placa de circuito impresso. Nela aparecem todos os componentes e conectores usados por meio das ferramentas disponibilizadas pelo programa. O circuito, é alimentado por uma fonte externa, todos os componentes operam com uma tensão de 5V. O layout final da PCB é mostrado na figura 29. Na figura 30 mostramos uma visão prévia superior, e inferior, da PCB projetada.

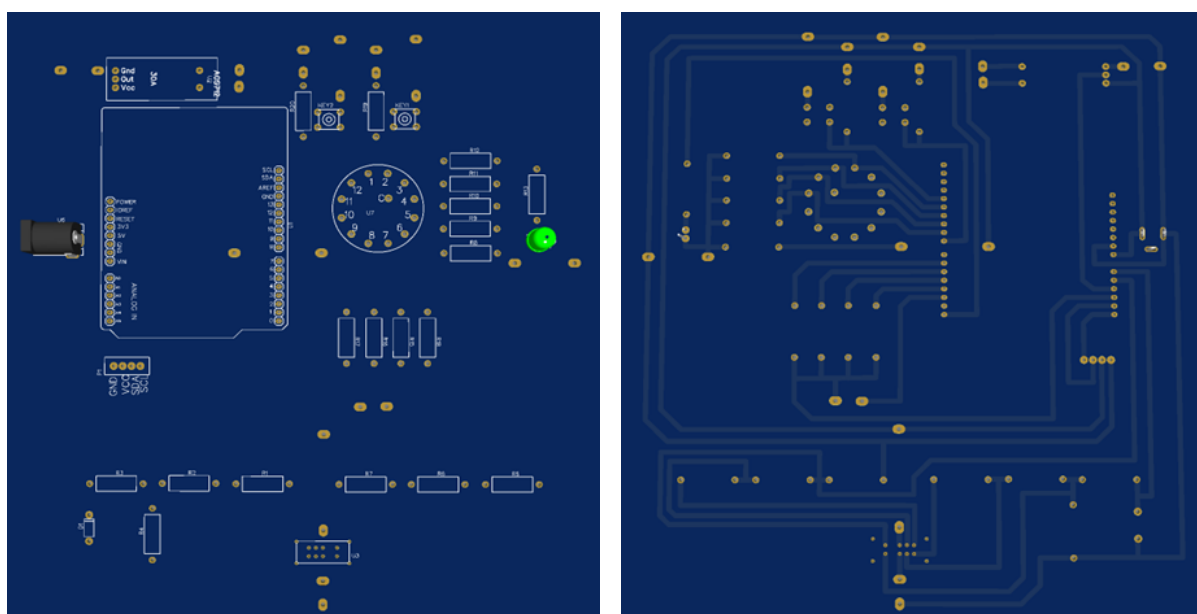
Para uma possível implementação prática do projeto, o circuito deve ser revisado e se for o caso, deve-se realizar mudanças no mesmo, de forma a atender melhor sua aplicação. Em função disso, estão disponíveis no anexo os links para acesso dos arquivos GRBL e GCODE.

Figura 29 – Projeto da PCB produzido na plataforma online EasyEDA.



Fonte: Autoria própria.

Figura 30 – PCB projetada: (a) Visão superior; (b) Visão inferior.



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria.

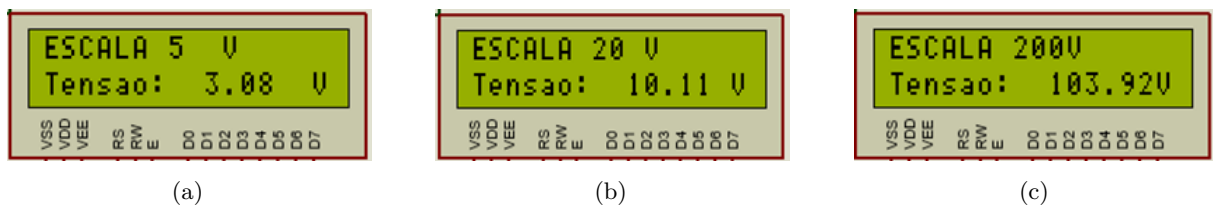
4 SIMULAÇÕES DE MEDIÇÃO NO SOFTWARE PROTEUS

No presente capítulo são apresentados os resultados do projeto desenvolvido com base nas especificações definidas nas etapas de elaboração. Com o uso do software Proteus foram realizados testes de medições para validar o circuito, a fim de comparar as leituras obtidas com os valores projetados. E por fim, calculou-se o erro percentual de medição para todos os casos.

4.1 Testes do Voltímetro

Com o uso do circuito desenvolvido, foi utilizado uma fonte ajustável V1 no voltímetro, para criar diferentes níveis de tensão para teste. Os testes foram aplicados as três escalas do voltímetro. A primeira escala para medição foi de 5V, na qual, variou-se a fonte de tensão para 1V, 2V, 3V, 4V e 5V. Os valores medidos foram coletados no momento da simulação. O objetivo seria comparar os valores experimentais com os valores teóricos. Na figura 31 é mostrado o valor de medição para tensão de 3V, na simulação do programa Proteus obteve-se uma leitura de $V=3,08V$.

Figura 31 – Medição de tensão: (a) 3V; (b) 10V; (c) 100V.



Fonte: Autoria própria.

Para a escala de 20V, foram realizados testes com valores de tesões de 5V, 10V, 15V e 20V. Os valores medidos também foram coletados no momento da simulação, tendo êxito em seu funcionamento. Na figura 31b, podemos verificar o valor de medição para tensão de 10V, obtivemos um valor de $V=10,11V$, bem próximo ao valor teórico.

Na escala de 200V, os testes foram feitos com valores de tensões de 1V, 50V, 100V, 150V e 200V. Na figura 31c, é apresentado o valor de leitura de tensão para uma faixa de 100V. Nesse caso, o valor apresentado se mostrou com uma discrepância um pouco acima das medidas anteriores.

Todos os valores de tensão obtidos durante a simulação, estão organizados na tabela 2. Nela podemos ver os valores de tensão medidos e comparar com os valores teóricos em questão. Foi calculado o erro relativo percentual para cada medida tendo como base, os valores apresentados.

Tabela 2 – Teste do voltímetro: valores medidos, valores teóricos e erro percentual.

Escala de 5V			Escala de 20V			Escala 200V		
V	V	Erro	V	V	Erro	V	V	Erro
[teórico]	[medido]	[%]	[teórico]	[medido]	[%]	[teórico]	[medido]	[%]
1V	1.05V	5%	1V	1.04V	4%	1V	1.14V	14%
2V	2.06V	3%	5V	5.08V	1,6%	50V	51.96V	3,92%
3V	3.08V	2,7%	10V	10.11V	1,1%	100V	103.92V	3,92%
4V	4.09V	2,25%	15V	15.13V	0,86%	150V	155.69V	3,8%
5V	-	-	20V	19.63V	1,85%	200V	190.59V	4,7%

Fonte: Autoria própria.

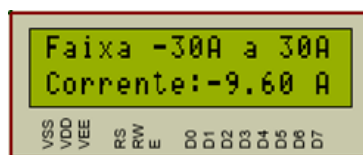
Como podemos observar a partir da tabela 2, todos os valores de erro relativo, se mostram bem próximos aos valores reais, porém, as especificações do erro são dadas sem tomar um valor exato, pois varia aproximadamente entre 0,85% a 5%, dependendo do valor de tensão aplicada para leitura e da escala de seleção. O percentual de maior erro (14%), ocorreu para tensão de 1V na escala de 200V, isso ocorreu devido a tensão está fora da escala de leitura. A melhor precisão ocorre em valores médios da escala, abaixo de 2%.

4.2 Testes do Amperímetro

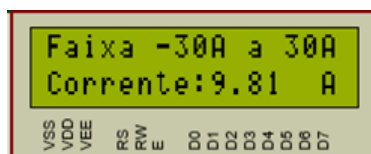
Para a realização dos testes do amperímetro, utilizamos uma fonte de tensão ajustável V2 em série com uma resistência, formando assim, um circuito fechado para que o sensor ACS712 consiga fazer a leitura de corrente, de acordo com a tensão e resistência aplicada no circuito do mesmo. Como o sensor efetua leituras de correntes positivas e negativas, então foi aplicado valores de tensão para V2 de -25V, -15V, -10V, 0V, 10V, 15V e 20V. No momento da simulação foram anotados os dados de corrente medida, corrente real e também os dados de tensão que vai para a porta A2 do Arduino.

Na leitura de correntes negativas, ao aplicar uma tensão de -25V no circuito, a tensão que vai para o microcontrolador é de 0,85V. Para -15V, identificou-se um valor de tensão de 1,51V na porta A2. Quando V2 foi ajustada para -10V, identificamos 1,84V na porta A2. Para leituras de correntes positivas, ao ajustar V2 com 0V, tivemos uma tensão de saída de 2,49V. Para 10V, houve 3,15V. Já para V2 igual a 15V, anotou-se 3,48V na saída e por fim, V2 igual a 20V, anotou-se 3,81 na porta A2. Isso nos mostra que, quando uma corrente elétrica passar pelos terminais do sensor, há uma alteração na tensão de saída. Será crescente para valores de correntes positivas e decrescente para correntes negativas, sempre operando dentro da faixa de 0,52V a 4,58V, que é a tensão de saída do sensor de $\pm 30A$.

No momento da simulação foram capturados os valores de corrente com V2 igual a -10V e 10V, sendo mostrado na figura 32. Todas as leituras de correntes positivas e negativas foram anotadas, como podemos ver na tabela 3. Também foi calculado o erro relativo percentual para cada medida.

Figura 32 – Medição de corrente: (a) $-10A$; (b) $10A$.

(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

Como indicado na tabela 3, os valores de correntes experimentais se mostraram bem próximos aos valores reais. O que identifica êxito no circuito para leitura de corrente. O erro percentual variou-se de 1,7% a 3,12%. Para correntes negativas, o erro calculado foi maior, na casa de 3%. Já para correntes positivas o erro se mostrou menor, variando entre 1% a 2%. Quando foi ajustado a fonte V2 para 0V, houve uma corrente de 0.10A passando pelo sensor.

Tabela 3 – Teste do amperímetro: valores medidos, valores teóricos e erro percentual.

V2	- 25V	- 15V	- 10V	0V	10V	15V	20V
I/A [teórico]	- 24,97A	-14,98A	-9,98A	0A	9,98A	14,98A	19,97A
I/A [medido]	-24,18A	-14,49A	-9,60A	0.10A	9,81A	14,69A	19,51A
E [%]	3,12%	3,27%	3,8%	-	1,7%	1,93%	2,3%

Fonte: Autoria própria.

4.3 Testes do Ohmímetro

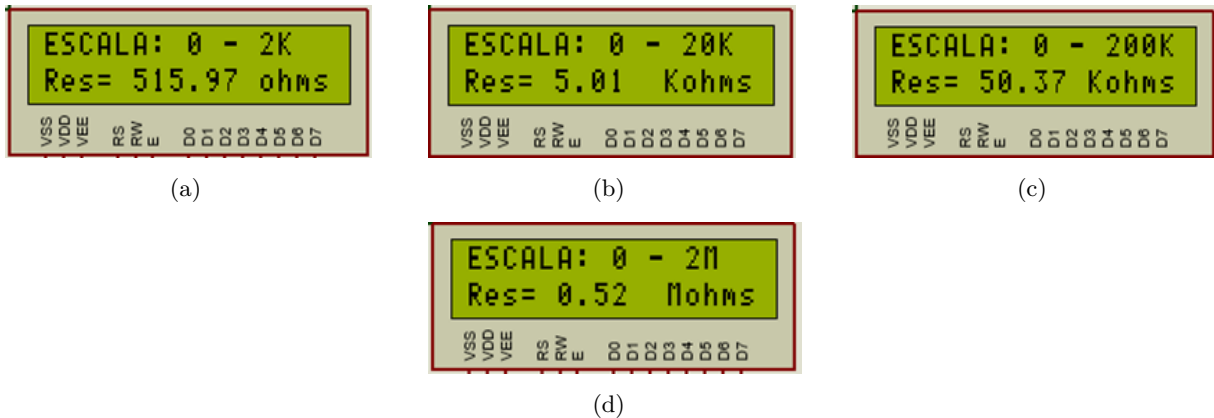
Para os testes no ohmímetro, foi estabelecido para cada faixa da escala, valores de resistências para simulação. Assim, variou-se R_{19} , que no circuito representa a resistência desconhecida. A primeira escala de teste é para a faixa de até 2k. Atribui-se à mesma, resistências de $R_{19} = 0\Omega$, $R_{19} = 500\Omega$ e $R_{19} = 1,5k\Omega$. Os valores lidos foram anotados para comparação com os valores reais. Durante as medições, notou-se que, para a resistência de 0Ω , não ocorreu leitura. As demais, mantiveram-se próximas aos valores teóricos, ao medir uma resistência de 500Ω , o ohmímetro leu $515,97\Omega$, já para $1,5k\Omega$, obteve-se um resultado de $1,011k\Omega$. Isso implica que, quanto mais perto a resistência estiver do valor da escala, maior é a precisão da leitura. A figura 33a indica a medição de resistência para $R_{19} = 500\Omega$.

O mesmo procedimento foi atribuído para realizar testes na escala de 20k. Por sua vez, foi atribuído $R_{19} = 0\Omega$, $R_{19} = 5k\Omega$ e $R_{19} = 15k\Omega$. Inicialmente, não houve

leitura para a resistência de 0Ω . Ao modificar as resistências para $5k\Omega$ e $15k\Omega$, o medidor apresentou resultados bastante satisfatórios comparados aos valores reais. Tendo $R_{19} = 5k\Omega$, tivemos uma leitura de $5.01k\Omega$ e tendo $R_{19} = 15k\Omega$, obteve-se um resultado de $15,01k\Omega$. Apresentando assim, um bom desempenho nas leituras de escala média.

Na figura 33b, é possível verificar o resultado para $R_{19} = 5k\Omega$

Figura 33 – Medição de resistência: (a) 500Ω ; (b) $5k\Omega$; (c) $50k\Omega$; (d) $500k\Omega$.



Fonte: Autoria própria.

Na escala de 200k, foi definido $R_{19} = 0\Omega$, $R_{19} = 50k\Omega$ e $R_{19} = 150k\Omega$. Novamente quando a resistência é 0Ω , não é possível efetuar nenhuma leitura. Ao atribuir $R_{19} = 50k\Omega$, foi medido $50,37k\Omega$, um valor bem parecido com o real. E por último, quando $R_{19} = 150k\Omega$, o resultado apresentou o valor $151,29k\Omega$, com uma variação um pouco maior, porém próximo ao valor teórico. A última escala de teste foi para 2M, nesta escala, as medições obtidas também corresponderam ao que foi projetado. As mesmas, operou com resistências de $R_{19} = 0\Omega$, $R_{19} = 0,5M\Omega$ e $R_{19} = 1,5M\Omega$. A resistência de 0Ω não apresentou leitura. Já a resistência de $R_{19} = 0,5M\Omega$ mediu $0,52M\Omega$ e a resistência de $R_{19} = 1,5M\Omega$, exibiu uma leitura de $1,56M\Omega$. Os resultados para $R_{19} = 50k\Omega$ na escala de 200k, e o resultado para $R_{19} = 500k\Omega$ na escala de 2M, são mostrados, respectivamente, nas figuras 33c e 33d.

Na tabela 4 são apresentados os resultados numéricos levantados nas simulações de medição de resistência elétrica, valores esperados, valores medidos e o erro percentual. De acordo com os dados levantados, verificou-se que erro percentual para leitura das resistências, sofreu uma variação de 0,06% a 4%. O erro maior ocorreu na escala de 2M, com ambas as medidas apresentando 4%. Já para as resistências de escalas menores e médias de 2k, 20k e 200k, o erro foi menor do que 1%. O que ohmímetro apresentou um bom desempenho do ohmímetro.

4.4 Testes do Wattímetro

O wattímetro foi o último medidor a serem aplicados os testes de ensaio. Para realizar as leituras de potência, utilizou-se a relação de dados do voltímetro e do amperí-

Tabela 4 – Teste do ohmímetro: valores medidos, valores teóricos e erro percentual.

Escala de 2k			
R [teórico]	0Ω	500Ω	1.5kΩ
R [medido]	-	515,97 Ω	1.51kΩ
E [%]	-	3,19%	0,66%
Escala de 20k			
R [teórico]	0Ω	5kΩ	15kΩ
R [medido]	-	5.01kΩ	15.01kΩ
E [%]	-	0,2%	0,06%
Escala de 200k			
R [teórico]	0Ω	50kΩ	150kΩ
R [medido]	-	50,37k Ω	151,29k Ω
E [%]	-	0,74%	0,86%
Escala de 2M			
R [teórico]	0Ω	0.5MΩ	1.5MΩ
R [medido]	-	0.52MΩ	1.56MΩ
E [%]	-	4%	4%

Fonte: Autoria própria.

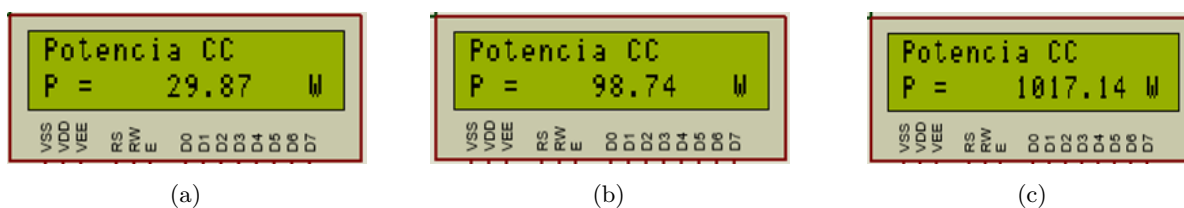
metro. Sendo assim, os testes ocorreram nas três escalas do voltímetro, especificado da seguinte forma: Para a escala de 5V, a tensão V1 foi ajustada para 3V e a fonte V2 do amperímetro, para 10V. Com isso, obteve a primeira medida da potência. Na escala de 20V, a fonte V1 foi ajustada para 10V e a fonte V2 continuou sendo 10V. Em seguida, na escala de 200V, ajustou-se a fonte V1 para 100V e V2 10V. A partir dos valores medidos, podemos calcular o erro percentual.

Primeiramente, colocando o voltímetro na escala de 5V, foi ajustado V1 para 3V, ao mesmo tempo que V2 foi ajustado para 10V, conectado em série com um resistor de 1Ω, produzindo assim uma corrente de 10A. Espera-se, portanto, uma dissipação de potência teórica de 30W. Na figura 34a é mostrada a medição de potência.

Ao usar o voltímetro na escala de 20V, foi ajustado V1 para 10V, ao mesmo tempo que V2 foi ajustado para 10V, conectado em série com um resistor de 1Ω, produzindo assim uma corrente de 10A. Espera-se, portanto, uma dissipação de potência teórica de 100W. Na figura 34b é mostrada a medição de potência. Por fim, ao usar o voltímetro na escala de 200V, foi ajustado V1 para 100V, ao mesmo tempo que V2 foi ajustado para 10V, conectado em série com um resistor de 1Ω, produzindo assim uma corrente de 10A. Espera-se, portanto, uma dissipação de potência teórica de 1000W. Na figura 34c é mostrada a medição de potência.

Na tabela 5, estão os dados das potências medidas, potências reais e o erro percentual. O erro percentual especificado variou de 0,66% a 1,71%. O maior erro (1,71%) foi identificado na maior escala do voltímetro. Conforme o valor da potência diminui de acordo com a escala, o erro percentual diminui, ficando abaixo de 1%.

Figura 34 – Medição de potência: (a) 30W; (b) 100W; (c) 1kW.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 – Teste do voltímetro: valores medidos, valores teóricos e erro percentual.

Potência (Tensão Esc. 5V)			Potência (Tensão Esc. 20V)			Potência (Tensão Esc. 200V)		
P [teórico]	P [medido]	Erro [%]	P [teórico]	P [medido]	Erro [%]	P [teórico]	P [medido]	Erro [%]
30W	29,8W	0,66%	100W	98,74W	1,26%	1000W	1017,14W	1,71%

Fonte: Autoria própria.

4.5 Orçamento Financeiro do Protótipo

Foi realizado um estudo de custo para o projeto. Na tabela 6, é possível verificar as quantidades dos componentes utilizados e seus valores unitários. Também é indicado o valor total, estimado, para implementação do mesmo.

Tabela 6 – Custo de Materiais.

Quantidade	Componentes	Preço Unitário
1	Arduino Uno 238	20,00
1	Módulo I2C	3,30
1	Display LCD	4,67
1	Chave hh - 3 Posições	4,40
1	Chave Rotativa - 12P	6,53
1	Diodo zener 1N4733A	0,59
1	Sensor ACS712/30A	4,30
1	Led Verde 5mm	1,89
1	Fonte de 5V	7,20
1	Conector Jack	2,70
2	Botões Push Button	3,90
9	Resistores de 10kΩ	0,71
2	Resistores de 1kΩ	0,71
1	Resistor de 100kΩ	0,71
1	Resistor de 300kΩ	0,71
1	Resistor de 3,6MΩ	0,89
1	Resistor de 320Ω	0,71
1	Resistor de 2kΩ	0,71
1	Resistor de 20kΩ	0,71
1	Resistor de 200kΩ	0,71
1	Resistor de 1MΩ	0,71
1	Par de Pontas de Provas	5,66
1	Placa de Fenolite	3,90
6	Conectores Bornes	3,26
1	Estanho para solda	5,17
	Valor Final	102,34

Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

O trabalho proposto consistiu no desenvolvimento de um protótipo de multímetro de bancada didática, para medição e testes de circuitos elétricos de baixa potência. As grandezas elétricas a serem medidas foram tensão, corrente, resistência e potência.

5.1 Considerações Finais

A escolha do microcontrolador Arduino foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho, pois o mesmo além de armazenar e processar os dados adquiridos vindo dos circuitos de condicionamentos, também os envia para serem exibidos na tela do visualizador, por meio das suas portas analógicas. Com o software Proteus, conseguimos realizar a análise virtual do multímetro. Assim, foi possível comparar os dados de leituras obtidos com os dados projetados. O esquemático do projeto e da placa de circuito impresso foram desenvolvidos no Software EasyEDA PCB Desing, utilizando as ferramentas e recursos abertos disponibilizados na plataforma.

Os objetivos específicos foram atingidos com êxito. O microcontrolador Arduino funcionou conforme o esperado. Através dele, do sensor de corrente de efeito Hall e dos demais itens usados para compor o circuito, foi possível medir com eficiência as principais grandezas elétricas em destaque no presente trabalho. O multímetro desenvolvido, apresentou resultados satisfatórios nos testes e comparado a um equipamento comercial, a taxa de erro percentual foi no máximo de 5 para medição de valores de tensão, o erro variou de 0,86 corrente, gerou um erro de 1,7% a 3,8%. Para as medições de resistência, o erro percentual variou entre 0,06% a 4% e por fim, a medição de potência apresentou um erro entre 0,66% a 1,71%. Os erros calculados estão dentro do aceitável, porém os estudos em relação a eles devem continuar para que seja possível diminuir mais ainda o erro de medição do instrumento.

5.2 Trabalhos Futuros

Para possíveis trabalhos futuros e implantação na prática do projeto proposto, é indicado realizar melhorias no protótipo. Um ponto principal é o estudo do erro percentual, de forma a melhorar a qualidade de leituras das medidas. Pode-se considerar também, mudanças no esquemático projetado, afim de que o mesmo possa chegar o mais próximo possível de um instrumento comercial, com custo acessível. E o estudo e dimensionamento de dispositivos de proteção e isolamento de componentes que compõem o multímetro de bancada.

As possibilidades de melhoria para este trabalho são diversas e abrem caminho para

que mais projetos possam ser desenvolvidos utilizando a plataforma Arduino. Novas ideias contribuem para expandir o conhecimento, beneficiando principalmente a comunidade acadêmica.

Referências

- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. *Fundamentos de circuitos elétricos*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. Citado na página 28.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. Instrumentação e fundamentos de medidas–vol. 1. *Rio De*, 2010. Citado 9 vezes nas páginas 20, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30 e 31.
- BANZI MASSIMO E SHILOH, M. *Introdução ao Arduino*. [S.l.]: Maker Media, Inc., 2022. Citado na página 33.
- BARBOSA, L. A. e. o. Wattímetro microprocessado. 2016. Citado na página 32.
- BORGES, G. A. et al. *Desenvolvimento com microcontroladores Atmel AVR*. [S.l.]: Brasília, 2006. Citado na página 33.
- BUKMAN, G. Desenvolvimento de um protótipo para segurança residencial de baixo custo. 2016. Citado na página 33.
- CARDOSO, F. D. S. *O uso de atividades práticas no ensino de ciências: na busca de melhores resultados no processo ensino aprendizagem*. Dissertação (B.S. thesis), 2014. Citado na página 16.
- EVANS, M.; NOBLE, J.; HOCHENBAUM, J. *Arduino em ação*. [S.l.]: Novatec Editora, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 53.
- FABIÁN, G. G. Desenvolvimento de bancada didática voltada ao estudo de sistemas pneumáticos. 2017. Citado na página 17.
- FARINELLI, F. A. *Desenvolvimento de um sistema embarcado de bordo para monitoramento de parâmetros via diagnóstico de rede CAN*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016. Citado na página 34.
- FILHO, S. M. Medição de energia elétrica. *Editora Universitária UFPE, Segunda edição, Recife*, 1980. Citado na página 27.
- FLOYD, T. *Sistemas digitais: fundamentos e aplicações*. [S.l.]: Bookman Editora, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 21, 25 e 26.
- GERMANO, V. H. d. S. et al. Desenvolvimento de um wattímetro trifásico microprocessado. Universidade Federal de Campina Grande, 2019. Citado na página 32.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física, 9ª edição. *Tradução de RS de Biasi, Rio de Janeiro*, 2012. Citado na página 28.
- LEITE, A. C. S.; SILVA, P. A. B.; VAZ, A. C. R. A importância das aulas práticas para alunos jovens e adultos: uma abordagem investigativa sobre a percepção dos alunos do proef ii. *Ensaio pesquisa em educação em ciências (belo horizonte)*, SciELO Brasil, v. 7, p. 166–181, 2005. Citado na página 16.
- LOPES, W. B. S. et al. Estudo de resistores ôhmicos e não-ôhmicos com uso de materiais de baixo custo. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2020. Citado na página 29.

- LUZ, C. R. *Galvanômetro de ferro móvel*. 2020. Citado na página 21.
- MARGOLIS, M. *Make an Arduino-controlled robot*. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2012. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- MCROBERTS, M. *Beginning arduino*. [S.l.]: Apress, 2013. Citado na página 34.
- MORALES, A. *Instrumentos analógicos de medição*. 2011. Citado na página 21.
- NUNES, D. R. Ferramentas e instrumentos de medidas elétricas. *Livros*, 2011. Citado na página 16.
- PURDUM, J.; PURDUM, J. Arduino c. *Beginning C for Arduino: Learn C Programming for the Arduino*, Springer, p. 23–44, 2015. Citado na página 34.
- SANTOS, P. R. d. F. S. et al. Sistema internacional de unidades si. INMETRO/CICMA/-SEPIN, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.
- SILVA, C. S. da et al. Os cursos da ufca e a importância das práticas em laboratório: Lacim. *Folha de Rosto*, v. 1, n. Especial, p. 20–30, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 20.
- SILVESTREIN, P. H. J. *Galvanômetro D'Arsonval*. 2020. Citado na página 21.
- SOUZA, R. W. d. et al. Uma sequência didática para o uso do multímetro como uma ferramenta na aprendizagem de medidas elétricas no ensino médio. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2020. Citado na página 16.
- THOMSEN, A. *O que é Arduino*. 2014. Citado na página 33.
- VIANA, U. B. Instrumentação básica ii: Vazão, temperatura e analítica. *SENAI/Compa*, 1999. Citado na página 19.
- WARREN, J.-D. et al. The basics. *Arduino Robotics*, Springer, p. 1–49, 2011. Citado na página 33.
- WITTE, R. A. *Instrumentos de teste eletrônico*. 2002. Citado na página 16.

ANEXO A – LINK’S PARA ACESSO DOS ARQUIVOS DO PROJETO

A.1 Link para acesso do código C++, arquivos de simulação no Proteus, e arquivos GRBL e GCODE

<<https://github.com/TayanaLimaa/C-digo-Fonte---Mult-metro-de-Bancada.git>>