

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS – *CAMPUS* BAMBUÍ
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Sandy Cristina Barros

**MULTIMEDIDOR DIDÁTICO DE BAIXO CUSTO PARA MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS**

BambuÍ – MG

2024

SANDY CRISTINA BARROS

MULTIMEDIDOR DIDÁTICO DE BAIXO CUSTO PARA MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia de Computação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Bambuí como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Francisco Heider Willy dos Santos

Bambuí – MG

2024

B277m Barros, Sandy Cristina.

Multimedidor didático de baixo custo para motores de indução trifásicos [manuscrito] / Sandy Cristina Barros. – 2024.

71 f. : il. ; color.

Orientador: Francisco Heider Willy dos Santos.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia da Computação) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Bambuí, 2024.

1. ESP32. 2. ACS712. 3. Motor de indução trifásico. 4. Sensor Hall. 5. Medição. I. Santos, Heider Willy dos. II. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Bambuí. II. Título.

CDD 621.46

Catálogo: João Batista Rodrigues – CRB6/2023

Sandy Cristina Barros

MULTIMEDIDOR DIDÁTICO DE BAIXO CUSTO PARA MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia de Computação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Bambuí como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Aprovado em: 17 de abril de 2024 pela banca examinadora:

Prof. Francisco Heider Willy dos Santos – IFMG – *Campus* Bambuí – (Orientador)

Prof. Carlos Renato Nollil – IFMG - *Campus* Bambuí Professor

Prof. Felipe Lopes de Melo Faria – IFMG - *Campus* Bambuí



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Heider Willy dos Santos, Professor**, em 17/04/2024, às 16:03, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Renato Nollil, Professor**, em 17/04/2024, às 16:04, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Lopes de Melo Faria, Professor**, em 17/04/2024, às 16:04, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **1904871** e o código CRC **F8C12894**.

RESUMO

Diante da crescente demanda por aparelhos didáticos fundamentais para a equalização e aplicação de conceitos ensinados em sala de aula, a criação de dispositivos de medição acessíveis torna-se essencial. No entanto, os custos elevados associados a esses equipamentos representam um obstáculo significativo para sua adoção em bancadas didáticas. Portanto, o intuito deste trabalho de conclusão de curso foi desenvolver um multimedidor para fins didáticos, que possa ser aplicado a motores de indução trifásicos e permita a análise das variáveis, por meio de interfaces de comunicação. Para isso, utilizaram-se componentes como ESP32, ACS712, circuitos retificadores e *display I2C*, *Python*. Os resultados obtidos dos parâmetros medidos, entre eles tensão, corrente nas três e fases e RPM, foram satisfatórios, visto que com componentes de baixo custo foi possível desenvolver uma ferramenta didática, que permitiu avaliar o motor em diferentes condições de operação.

Palavras-chave: ESP32, ACS712, motor de indução trifásico, Sensor Hall, medição

ABSTRACT

Given the growing demand for fundamental teaching devices for equalizing and applying concepts taught in the classroom, the creation of accessible measuring devices becomes essential. However, the high costs associated with this equipment represent a significant obstacle to their adoption in teaching benches. Therefore, the purpose of this course completion work was to develop a multimeter for teaching purposes that could be applied to three-phase induction motors and allow the analysis of variables through communication interfaces. For this we use components such as ESP32, ACS712, rectifier circuits and *display* I2C, *Python*. The results obtained from the measured parameters, including voltage, current in the three phases and RPM, were satisfactory, since with low-cost components it was possible to develop a teaching tool that evaluated the engine in different operating conditions.

Keywords: ESP32, ACS712, three-phase induction motor, Hall sensor, measurement

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Componentes do motor de indução trifásico.....	16
Figura 2: Defasagem do motor trifásico	16
Figura 3: Fechamento do MIT em estrela	18
Figura 4: Fechamento do MIT em triângulo	18
Figura 5: Influência de um campo magnético provocado por um ímã em um condutor.....	21
Figura 6: Funcionamento interno de um sensor de efeito Hall.....	22
Figura 7: Módulo sensor de corrente	24
Figura 8: Ciclo de um produto.....	31
Figura 9: Instalação do multimedidor, pela visão lateral do MIT	31
Figura 10: Instalação do multimedidor, pela visão frontal do MIT.....	32
Figura 11: Fluxograma do procedimento	32
Figura 12: Comunicação entre ESP32, sensores e interface	33
Figura 13: Placa de identificação do MIT utilizado	34
Figura 14: Ligação dos sensores de corrente nas fases	37
Figura 15: Esquemático ACS712 e ESP32.....	37
Figura 16: Valor lido no ADC do ESP32	38
Figura 17: Captura dos valores de máximo e mínimo.....	38
Figura 18: Sinal após aplicação do filtro de mediana.....	39
Figura 19: Esquemático do circuito de tensão.....	40
Figura 20: Tensão de entrada do circuito alimentado por fase 220V	41
Figura 21: Tensão de saída do circuito alimentado por fase 220V	41
Figura 22: Código da medição de tensão.....	42
Figura 23: Linearização da medição de tensão.....	42
Figura 24: Teste da distância de detecção do sensor Hall	43
Figura 25: Ambiente de teste.....	44
Figura 26: Onda de detecção do ímã pelo sensor Hall	45
Figura 27: Esquemático do circuito de condicionamento de sinal do sensor Hall	45
Figura 28: Função de interrupção e cálculo de RPM	46
Figura 29: Placa do circuito de potência	47
Figura 30: Placa do circuito do sensor Hall.....	47
Figura 31: Placa do ESP32 e display.....	48
Figura 32: Esquemático completo do circuito multimedidor	48

Figura 33: Fluxo da máquina de estados do display.....	49
Figura 34: Código da estrutura criada para a máquina de estados das telas.....	50
Figura 35: Fluxo da interface.....	51
Figura 36: Configuração de envio do servidor	52
Figura 37: Estrutura para receber dados do servidor	52
Figura 38: Animação do gráfico	53
Figura 39: Gráfico RPM	55
Figura 40: Placa de integração em bancada.....	59
Figura 41: Circuito de potência na caixa instalação do motor	59
Figura 42: Circuito de integração instalado próximo ao rotor	60
Figura 43: Implantação do circuito na caixa de proteção do rotor	60
Figura 44: Multimetro instalado na bancada didática do IFMG – <i>Campus Bambuí</i>	61
Figura 45: Tela inicial do multimetro.....	62
Figura 46: Interface gráfica	62
Figura 47: Gráfico dos valores simulados	63
Figura 48: Gráfico dos valores simulados	63
Figura 49: Gráfico dos valores simulados	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sensibilidade do sensor ACS712.....	24
Tabela 2: Tabela de requisitos funcionais e não funcionais	30
Tabela 3: Tabela de linearização	42
Tabela 4: Tabela de valores de RPM.....	54
Tabela 5: Tabela de valores medidos da tensão em Volt	55
Tabela 6: Tabela de valores medidos da corrente na ligação em estrela.....	56
Tabela 7: Tabela de valores medidos da corrente na ligação em triângulo.....	57
Tabela 8: Custo dos materiais.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IFMG – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais. IHM – Interface Humano computador.

RPM – Rotação por minuto.

MIT – Motor de indução trifásico. GND – *Grond*.

OUT – *Out*.

IDE – Ambiente de desenvolvimento integrado. IC – Componente integrado.

mA – Miliampère.

A – Amper.

V – Volts.

CF – Capacitor.

ADC – Conversor analógico-digital.

GPIO – General Purpose Input/Output.

PCB – Printed Circuit Board

VF – Tensão de fase.

VL – Tensão de linha.

SPI – *Serial Peripheral Interface*.

TX – *Transmit*. RX – *Receive*.

MISO – *Master In Slave Out*. MOSI – *Master Out Slave In*.

I2C – *Inter-Integrated Circuit*.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo Geral	12
1.2	Objetivos Específicos	13
1.3	Justificativa	13
1.4	Resultados Esperados	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Prática no Ensino	14
2.2	Motor de Indução Trifásico	15
2.3	Ligações do Motor de Indução Trifásico	17
2.4	Multimedidores	18
2.5	Processamento e Condicionamento de Sinais	19
2.6	Efeito Hall	20
2.6.1	<i>Sensor de Efeito Hall</i>	21
2.6.2	<i>Medição de Velocidade</i>	22
2.7	<i>Medições de Grandezas Elétricas</i>	23
2.7.1	<i>Medição de Corrente</i>	23
2.7.2	<i>Medição de Tensão</i>	25
2.8	Microcontrolador ESP32	26
2.9	Python	27
2.10	Comunicação Cliente e Servidor	27
2.11	Estado da Arte	28
3	METODOLOGIA	29
3.1	Definição da Pesquisa	29
3.2	Requisitos Funcionais e Não Funcionais	30
3.3	Solução Proposta e Concepção da Ideia	30
3.4	Especificações Nominais	33
3.5	Materiais	34
3.6	Bibliotecas	35
3.7	Ferramentas Computacionais	35
4	DESENVOLVIMENTO E PROCEDIMENTO	36
4.1	Medição de Corrente	36
4.2	Medição de Tensão	39

4.3	Medição de Velocidade.....	43
4.4	Placa de Integração do Protótipo	46
4.5	Telas do Display e Interface Gráfica.....	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1	Ensaio Elétrico	53
5.2	Ensaio Elétrico de Velocidade	54
5.3	Ensaio Elétrico de Tensão.....	55
5.4	Ensaio Elétrico com Sensor de Corrente.....	56
5.5	Custo-Benefício	57
5.6	Teste em Bancada e Instalação da Placa de Integração no Motor.....	58
5.7	Interfaces de Comunicação e Visualização	61
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
6.1	Trabalhos Futuros	64
7	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICE	70

1 INTRODUÇÃO

A prática laboratorial é essencial para consolidar a compreensão dos conceitos teóricos apresentados em sala de aula, dessa forma os alunos desenvolvem habilidades técnicas, estimulando a capacidade de resolução de problemas (MARINHO, 2018). Em relação ao ensino de eletricidade, é comum que os alunos não percebam completamente a relação direta entre conceitos físicos e o funcionamento de dispositivos eletrônicos do dia a dia, desse modo, professores enfrentam desafios ao encontrar maneiras que demonstrem a aplicação da teoria (BELLO, 2010).

Os motores de indução trifásico são equipamentos fundamentais para a operação das indústrias modernas, dada a sua ampla aplicação em diversas máquinas industriais, porém, os conceitos físicos e os fenômenos envolvidos não são facilmente compreendidos pelos estudantes de cursos técnicos e engenharia, devido à natureza abstrata desses conceitos, já que tais conceitos só podem ser verificados por meio de medição. A utilização de medidores de grandezas elétricas, nas instituições de ensino, pode simplificar a teoria que envolve os ensaios de motores elétricos. Neste contexto, destaca-se a importância da medição de parâmetros elétricos para que os alunos possam entender melhor os conceitos relacionados ao funcionamento de motores trifásicos de indução (VERISSIMO, 2019).

Segundo Steffen (2023), o alto custo dos equipamentos de medição industriais dificultam o acesso e a utilização nas práticas laboratoriais, já que os multimedidores encontrados comercialmente têm custo elevado e limitam a medição de parâmetros, sendo necessária a aquisição de vários equipamentos distintos para a realização de medições, como corrente elétrica, tensão, potência e velocidade.

Neste trabalho foi desenvolvido um multimedidor de grandezas, voltado para ambientes educacionais, especialmente projetado para motores de indução trifásicos. Foi elaborado para atender às demandas específicas de medição e monitoramento desses motores, para permitir visualizar grandezas relevantes para o funcionamento dos motores, facilitando assim a análises detalhadas e contribuindo para o aprimoramento do ensino e aprendizado.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral foi desenvolver um multimedidor para uso didático, que permita a análise de parâmetros elétricos de indução trifásico. O intuito era que o multimedidor fosse de baixo custo e exibisse em uma IHM (Interface Homem máquina) local as grandezas em tempo

real, como tensão e corrente nas três fases, e velocidade do motor, além de permitir a análise das formas de onda que serão exibidas através de um programa que se comunicará com o multimedidor, através de uma comunicação *WiFi*.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos incluíram:

- Projetar e implementar o hardware do multimedidor, que inclui a placa de integração com todos os componentes eletrônicos do multimedidor.
- Realizar a programação do microcontrolador, que realizará a medição das variáveis e controle da IHM local.
- Implementar o programa de interface gráfica, que se comunicará com o multimedidor.

1.3 Justificativa

É importante o uso de multimedidores nos laboratórios de ensino para que conteúdos teóricos, vistos em sala de aula, sejam melhor abstraídos pelos alunos em experimentos práticos com motores de indução trifásicos, contribuindo para uma educação de qualidade. No entanto, ao investir em medidores comerciais para motores de indução trifásicos podem ser encontradas complexidades de manuseio e custos elevados, portanto, o desenvolvimento de um multimedidor didático, de baixo custo, para motores de indução trifásicos, com interfaces de comunicação intuitivas, podem ser uma ferramenta de ajuda para o ensino.

Além disso, outra importância no desenvolvimento do trabalho é a contribuição para a pesquisa e inovação tecnológica na área de eletrotécnica e eletrônica, influenciando no desenvolvimento de novos produtos didáticos e soluções econômicas.

1.4 Resultados Esperados

O objetivo da pesquisa e construção da ferramenta foi alcançar um dispositivo capaz de realizar a medição de parâmetros de um motor de indução trifásico, utilizando componentes eletrônicos de baixo custo. Além disso, a construção de uma IHM em *display*, permitindo ao usuário visualizar as medidas coletadas pelos sensores em tempo real a fim de realizar análises

do desempenho do motor em diferentes condições de operação. Optou-se também para análises, criar que a interface gráfica, que será desenvolvida para computador, permita a análise de parâmetros por gráficos, que serão exibidos em tempo real, o que permitirá uma melhor exposição dos conceitos envolvidos.

Esperava-se disponibilizar o projeto gratuitamente e, nesse sentido, que fosse uma ferramenta de fácil reprodução, considerando que outras pessoas e instituições pudessem utilizá-la como recurso para o ensino. Dessa forma, o trabalho pretendeu atingir um dispositivo acessível, intuitivo e funcional. Além disso, pretendia-se aplicar a ferramenta no laboratório de Automação e Controle do IFMG – *Campus* Bambuí, para complementar a bancada didática já existente no local.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo abordou aspectos essenciais para o desenvolvimento do dispositivo de medição. Inicialmente, discutiu-se a importância da prática no ensino, especialmente na engenharia. Em seguida, explorou-se o papel dos motores de indução trifásicos na indústria e seus princípios de funcionamento. Posteriormente, foram apresentados os conceitos de multimedidores e modelos de medição, seguidos de discussões sobre processamento e condicionamento de sinais, destacando sua importância para garantir a qualidade das informações em sistemas de medição. Também foram abordados os sensores, baseados no efeito Hall, e o microcontrolador ESP32, essenciais para o desenvolvimento do multimedidor.

2.1 Prática no Ensino

A aula prática é o processo de tornar o aprendizado mais concreto, atrativo e visual, mas isso só é possível por meio de equipamentos e ferramentas que permitem a abstração e visualização do funcionamento de um determinado assunto. Portanto, o aperfeiçoamento e a criação de equipamentos de medição são necessários em assuntos didáticos de engenharia, para uma melhor qualidade de ensino (BAZZO, 2006).

Segundo Castro (2015), a prática no ensino é uma ferramenta poderosa para fornecer técnicas aos alunos, portanto, com ferramentas didáticas disponíveis em laboratórios o professor poderá utilizá-las para motivar e proporcionar maior conhecimentos aos alunos, unindo a teoria e a prática. Nesse sentido, Pekelman e Mello-Jr (2004) defendem que ambientes laboratoriais podem se tornar didáticos mesmo com poucos recursos financeiros, tudo depende

da importância e da relevância de um laboratório para a formação de um aluno, que, mesmo que seja construído com limitações, ainda oferece oportunidades de aprendizado prático.

De acordo com Donoso-Garcia, Cortizo e Morais (2008), as aulas de laboratório são fundamentais para a formação de estudantes de engenharia e cursos técnicos das áreas de eletricidade, pois o ensino puramente teórico, sem utilização demonstrações práticas, pode desmotivar os estudantes, levando-os a desenvolver conhecimentos rasos nas disciplinas ministradas (MARINHO, 2018). Portanto, é importante enfatizar que a prática no ensino, principalmente no ensino de engenharia, é necessária para que os alunos aprendam e desenvolvam habilidades através do compartilhamento e da troca de experiências em ambientes educacionais (CASTRO, 2015).

2.2 Motor de Indução Trifásico

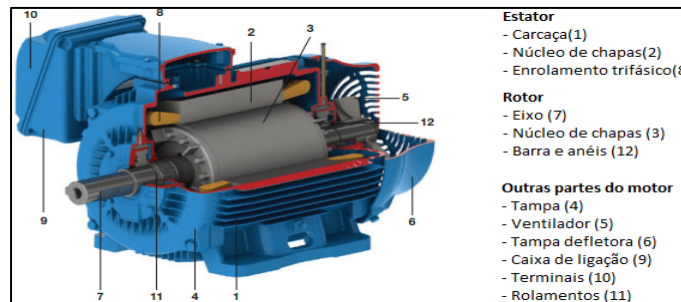
De acordo com Filippo Filho *et al.* (2013), na antiguidade, as formas de motores eram bastante diferentes das tecnologias atuais, eram utilizados engenheiros de tração animal, rodas d'água e força humana para produzir energia mecânica, que realizavam as tarefas e representavam um importante avanço nas atividades da época. Vale ressaltar que, em 1890, já eram encontrados motores a vapor, que desempenhavam um papel significativo para as demandas industriais da época, mas é a partir da década de 1990 que os motores de indução vêm sendo aprimorados e refinados para uso comercial.

O desenvolvimento do motor só foi possível a partir do princípio da indução magnética, estudado por M. Faraday, em 1831, que estabeleceu a variação do fluxo de elétrons por uma superfície condutora. A partir disso, em 1887, Nikola Tesla e Galileu Ferraris desenvolveram o primeiro motor de indução, que gerava um campo magnético rotativo com o uso de bobinas, esse campo permitia a geração de correntes alternadas defasadas em 90°. Não muito distante, em 1891, Mikhail Dolivo-Dobrovolski desenvolveu o primeiro motor de indução trifásico. Desde então, são amplamente utilizados para diversas aplicações, devido à sua robustez, baixo custo e eficiência, não é por acaso que representam grande parte do consumo de energia elétrica global (FILIPPO FILHO *et al.*, 2013).

A partir disso, o motor de indução do tipo trifásico (MIT) é um componente industrial para acionamentos, que transforma energia elétrica em energia mecânica, seu funcionamento gera um torque, a partir da interação entre um campo magnético rotativo e uma corrente elétrica induzida. Motores de indução baseiam-se em duas partes básicas, sendo elas o estator e o rotor. O estator é formado por núcleo de chapas e enrolamentos dentro da carcaça

do motor, que faz ser possível a formação do campo magnético, estes enrolamentos são alimentados por uma corrente alternada defasada em 120° . O rotor é localizado no meio do estator e é responsável pela transmissão da potência produzida, em motores trifásicos esse rotor pode ser rotor em gaiola de esquilo ou rotor bobinado, e é composto por eixo, núcleo de chapa, barras e anéis (MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 1: Componentes do motor de indução trifásico

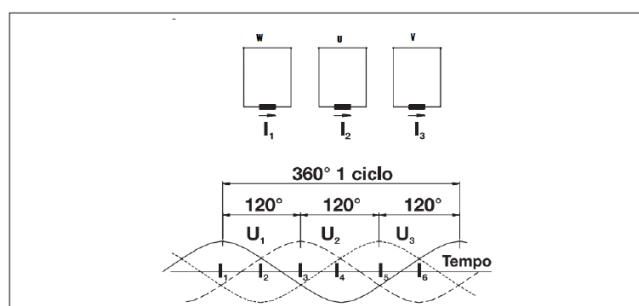


Fonte: Adaptado de: (WEG, 2023)

Na figura 1, foram destacados os principais componentes de um MIT e, a partir dela, pode ser visualizada a junção entre parte fixa (estator) e móvel (rotor), responsáveis por fazer com que seja possível obter o torque, que é a força necessária para que o motor gire em torno do seu eixo e mantenha-se em movimento. Os rolamentos presentes na figura são utilizados em motores para reduzir o atrito durante a rotação do eixo e as outras partes, usadas para um funcionamento adequado e para revestir rotor e estator (MAMEDE FILHO, 2013).

Um MIT possui três bobinas principais, que são os enrolamentos de fase alimentada por uma fonte de energia trifásica. Quando mencionado que o motor de indução trifásico é alimentado por uma corrente alternada defasada em 120° , significa que esses enrolamentos estão criando um deslocamento angular de 120° entre eles. O arranjo das fases elétricas é importante, pois, ao alimentar os enrolamentos de fase, é criada a rotação magnética no estator responsável pelo movimento do motor (WEG, 2023).

Figura 2: Defasagem do motor trifásico



Fonte: Adaptado de: (WEG, 2023)

A Figura 2 demonstra o que foi mencionado anteriormente, considerando que um ciclo completo é 360° , seja três bobinas nomeadas como W, U e V cada, as três estão separadas em um ângulo de 120° , de forma que a U está atrasada em relação a V e ambas atrasadas em relação a W (WEG, 2023).

Dentre os principais parâmetros elétricos em motores de indução trifásicos, estão a tensão e a corrente. Segundo Azevedo e Mendes (2008), essas grandezas são essenciais para avaliar o desempenho do MIT durante a partida do motor, pois, ao verificá-las, é possível garantir um funcionamento adequado e uma partida suave, sem que seja prejudicado o tempo de vida do equipamento ou a rede elétrica utilizada.

A tensão monitorada e a corrente são fundamentais, pois a corrente está sujeita às variações, dependendo da carga aplicada que está vindo da rede, e são geralmente analisadas durante a partida do motor elétrico. Por consequência, é sempre viável realizar medições precisas dessas grandezas para uma melhor segurança e confiança (MELO, 2004).

2.3 Ligações do Motor de Indução Trifásico

Segundo Filippo Filho *et al.* (2013), a maioria dos motores trifásicos é capaz de operar em duas configurações distintas, permitindo sua adaptação a diferentes sistemas de energia. A seleção da configuração adequada depende da tensão disponível localmente. Assim, para motores com três enrolamentos, as opções de configuração incluem a conexão em estrela ou em triângulo.

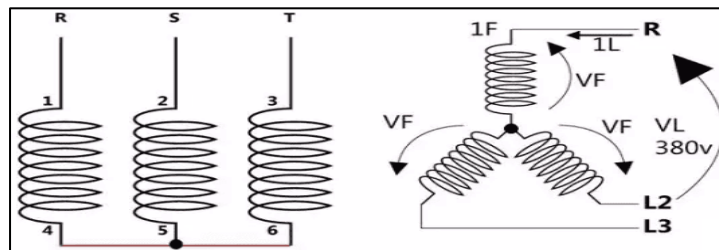
As diversas configurações de conexão do motor não apenas modificam a tensão, mas também influenciam a corrente, desempenhando um papel crucial na operação global do motor. Essas alterações têm impactos diretos em fatores essenciais como torque, potência e eficiência, conforme apontado por Filippo Filho (2013).

A partir disso, pode-se concluir que compreender as diferenças entre as conexões estrela e triângulo é essencial para garantir o desempenho adequado e seguro dos motores trifásicos, em uma variedade de aplicações industriais e comerciais, pois, ainda de acordo com Filippo Filho *et al.* (2013), na ligação em estrela, a tensão aplicada em cada enrolamento do motor é reduzida em relação à tensão de linha e na ligação em triângulo, a tensão aplicada em cada enrolamento do motor é igual à tensão de linha. Cada fase recebe a tensão de linha diretamente.

Como pode ser observado nas imagens 3, em sistemas estrela, cada enrolamento do motor é conectado diretamente a uma fase e ao ponto neutro, a tensão de fase (VF) é a tensão

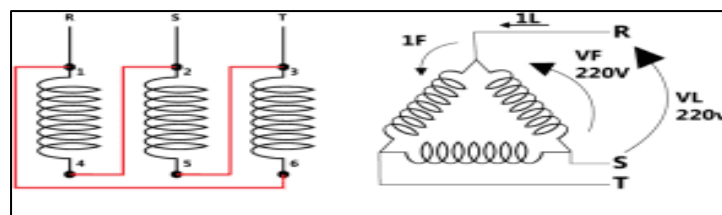
medida entre uma fase específica e o ponto neutro. A figura 4 mostra que cada enrolamento do motor conectado entre as fases, resulta em uma tensão de fase igual à tensão de linha (VL). A tensão de linha corresponde à tensão medida entre duas fases do sistema, sem envolver o ponto neutro. Na conexão em triângulo, a tensão de linha é a tensão aplicada diretamente entre os terminais das bobinas do motor (MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 3: Fechamento do MIT em estrela



Fonte: Adaptado de: (ELÉTRICA, 2024)

Figura 4: Fechamento do MIT em triângulo



Fonte: Adaptado de: (ELÉTRICA, 2024)

2.4 Multimeditores

No início, sistemas de medição eram utilizados a partir de unidades imaginárias, como palmos, polegadas, pés, mas, com o avanço da tecnologia, surgiram os instrumentos de medição que são desenvolvidos e aprimorados na atualidade. Sistema de medição são sistemas projetados para fornecer informações de valores, medidos para diferentes grandezas e aplicações. Geralmente, inclui componentes adicionais, como softwares e controladores que permitem a formação das informações úteis, opção de conexão com outros dispositivos e precisão para as grandezas de interesse. Esses sistemas tipicamente consistem em um conjunto de instrumentos de medição, que abarcam a utilização de indicadores e mostradores. Eles fornecem uma leitura na saída que apresenta o valor da grandeza medida e são comumente visualizados via *display* e outros dispositivos de visualização (TEIXEIRA, 2017).

Portanto, o multimetror é um modelo de sistema de medição que permite a verificação de variadas grandezas elétricas em um único dispositivo. Funciona como

instrumento amostrador, já que é geralmente composto por elementos visuais que exibem as grandezas simultaneamente, além disso, obtém capacidade de conexão e compartilhamento de informação com outros sistemas elétricos. Geralmente, o multimedidor é usado para informações, como tensão, corrente, energia reativa e ativa, entre outros dados que podem ser gravados e acessados para manutenções preditivas, gerenciamentos, monitoramentos e tomadas de decisões acerca dos mais diversos circuitos eletrônicos (LINHARES, 2017).

Segundo o autor Desiderio, Volanski e Schmiele (2017), os multimedidores são utilizados em motores elétricos para o monitoramento de parâmetros, como corrente, tensão, potência ativa, frequência, entre outros. Isso se mostra importante para compreender seu funcionamento, pois parâmetros como carga aplicada, tensão, corrente e velocidade estão diretamente relacionados ao seu desempenho e comportamento. De fato, o autor Steffen (2023) justifica que a manutenção dessas variáveis é essencial para garantir a eficiência energética do motor e para uma operação correta.

Dominar os métodos e as técnicas de medidas é fundamental para engenheiros e para técnicos que atuam nas áreas de instrumentação, portanto, os alunos dessas áreas devem ter práticas, com a utilização de ferramentas de medições, uma vez em que, para a realização de experimentos eficazes, é fundamental o uso de medidores e que o profissional possa realizar medidas precisas para a tomada de decisões, monitoramento e controle de equipamentos elétricos (TEIXEIRA, 2017).

Contudo, a partir das considerações apresentadas é importante a criação de multimedidores de baixo custo para o ensino, já que são ferramentas capazes de contribuir para o aprendizado sobre motores elétricos e análise de parâmetros de interesse.

2.5 Processamento e Condicionamento de Sinais

Condicionar um sinal significa dimensioná-lo para poder ser transmitido e processado de maneira adequada, na maioria das vezes, essa técnica é vista na amplificação e na atenuação em que é possível aumentar ou reduzir a amplitude da onda do sinal, fazendo com que ele seja ajustado para um valor adequado no circuito. O condicionamento é necessário para melhorar a qualidade do sinal, remover frequências indesejadas e na linearização que permite que um sinal de entrada seja proporcional a um sinal de saída, pois, ao utilizar sensores para a aquisição de dados em um microcontrolador, é necessária a utilização de técnicas que permitam que a placa de aquisição de dados interprete as informações captadas pelos sensores, já que os sinais obtidos deles não estão na mesma faixa de frequência (TEIXEIRA, 2017).

Para desprezar frequências indesejadas no circuito são utilizados filtros, que podem ser passivos, construídos com componentes, como resistores, indutores e capacitores, permitindo que apenas algumas frequências passem pelo circuito e filtros ativos, que são aqueles que também delimitam as frequências, porém utilizam componentes amplificadores operacionais e transistores (BOYLESTAD, 2012).

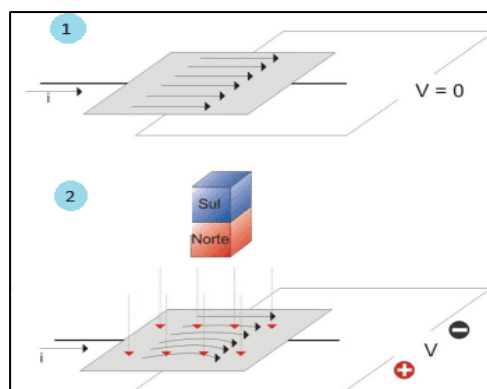
Um sinal analógico é uma forma de representação de informações, que variam no tempo entre um determinado intervalo, a partir de uma amplitude e uma frequência, diferentemente do sinal digital, composto por valores diversificados. Conversores A/D (analógico/digital) permitem a conversão desses sinais, que é feito quando é necessário o processamento, armazenamento e transmissão de dados (TEIXEIRA, 2017).

A utilização de condicionamento de sinais em multimedidores é importante, pois, segundo Belfort (2007), instrumentos de medição são compostos por sensores, circuitos condicionadores de sinais, conversores A/D e uma unidade de processamento. Os sensores em um multimedidor permitem medir as grandezas elétricas a partir de respostas geradas desses componentes, que, com o ajuste, amplificação e a aplicação de filtros nesse sinal elétrico, é possível fazer a conversão A/D, permitindo que a amplitude da onda esteja correspondente à leitura do microcontrolador, permitindo que esse sinal seja processado obtendo, assim, dados precisos. Devido a isso, o condicionamento de sinais é essencial para gerar sinais de qualidade e confiáveis para análises (BELFORT, 2007).

2.6 Efeito Hall

O efeito Hall foi investigado, em 1879, por Dr. Edwin Hall, que estudou a influência de um campo magnético externo sobre um condutor. A partir de um experimento, Edwin aproximou um ímã ao condutor e percebeu que a presença de um campo magnético resultava na separação das cargas previamente desordenadas, ao verificar isso, constatou que essa separação gerava uma diferença de potencial elétrico, perpendicular à corrente e ao campo magnético. O fenômeno ficou conhecido como efeito Hall e foi fundamental para a relação entre eletricidade e magnetismo e, na atualidade, é utilizado para aplicações práticas e para a criação de equipamentos de medição (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2020).

Figura 5: Influência de um campo magnético provocado por um ímã em um condutor



Fonte: Adaptado de: (PATSKO, 2006)

Na Figura 5, é possível observar que a corrente se dissipa uniformemente pelo condutor, na ilustração 1 da Figura, gerando uma tensão nula, enquanto, na ilustração 2, com a presença de um campo magnético gerado pelo polo norte do ímã, as correntes são movimentadas dentro do condutor, gerando uma diferença de potencial.

Em decorrência disso, compreender o efeito Hall é importante, pois, atualmente, componentes elétricos usam esse princípio para conseguir detectar e medir corrente elétrica para detectar presença de campo magnético, que pode ser utilizada para diversas aplicações, dentre elas posicionamento de objetos e velocidade em elementos em rotação. Nas próximas seções, serão abordados os sensores de efeito Hall comerciais e como podem ser aplicados na medição de velocidade (PATSKO, 2006).

2.6.1 Sensor de Efeito Hall

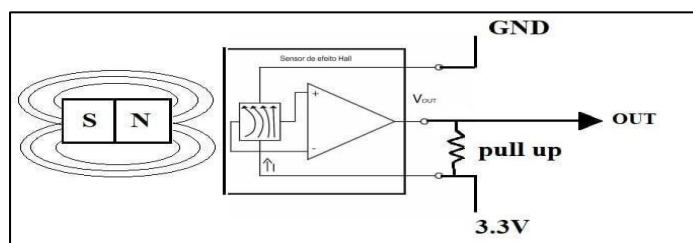
Desde a descoberta do efeito Hall, que é um fenômeno detectado a partir de um campo magnético, têm sido criados sensores comerciais para serem utilizados em instrumentação. Esses instrumentos têm a capacidade de detectar um campo magnético quando são ativados pela presença de um ímã, o que leva ao desvio dos elétrons em um condutor e à geração de uma tensão. Vale ressaltar que o sensor não é capaz de detectar magnetização em longas distâncias e os sensores unipolares só aceitam a polaridade norte do ímã. Portanto, é crucial posicionar corretamente o ímã e o sensor, para uma detecção precisa, permitindo, assim, a identificação da formação de um fluxo magnético, que resulta em um sinal de saída, influenciando diretamente o funcionamento do sensor (PATSKO, 2006).

Segundo Teixeira (2017), as características dos sensores de efeito Hall incluem a sensibilidade, tensão de saída, alimentação, corrente, entre outros, portanto é necessária a

consulta das especificações desses componentes. Um sensor, que permite detectar o campo magnético presente, disponível no mercado é OH44E que é do tipo unipolar, consoante as especificações o IC (componente integrado) é aplicado em campo de controle industrial para sensor de velocidade, contagem, entre outros. O sensor tem tensão de alimentação de 4 a 30V, o que o torna compatível com outros meios eletrônicos e também apresenta corrente de saída na faixa de 50 mA (ADRIROBOT, 2023).

Na figura 6, pode ser observado o funcionamento interno do sensor de efeito Hall, composto por um circuito saturador, que é um amplificador que satura a saída do sinal, e um resistor pull-up, utilizado para elevar a saída do sensor para uma tensão específica, fazendo com que o sinal sirva para detectar campos magnéticos (SCHWINGEL, 2022).

Figura 6: Funcionamento interno de um sensor de efeito Hall



Fonte: Adaptado de: (SCHWINGEL, 2022)

Em resumo, o funcionamento do sensor baseia-se no princípio de que, quando um campo magnético é gerado, o sinal digital é inicialmente elevado para 0 e, com o passar do tempo, ele se estabiliza em 1. Quando o sensor detecta um campo magnético, ele gera uma tensão na saída (out), a qual pode ser facilmente lida e armazenada por um microcontrolador Patsko (2006).

2.6.2 Medição de Velocidade

O efeito Hall pode ser aplicado para medir velocidade em motores de indução, através da medição do campo magnético resultante, que possibilita calcular a velocidade do motor e controlá-la de forma mais precisa. Além disso, o efeito Hall também é utilizado em diversas outras aplicações, como em sensores de posição, detecção de campos magnéticos e medição de correntes elétricas (RUPPEL; VIANA, 2013).

De acordo com Teixeira (2017), é possível medir a rotação de um objeto em movimento rotativo, utilizando sensores de efeito Hall adequadamente posicionados. Ao acoplar ímãs neste objeto rotativo, que por sua vez são fixados no eixo, é gerado um campo

magnético que, ao passar regularmente sobre o sensor, influencia diretamente a magnitude da tensão de saída, o que, por sua vez, afeta a polaridade do ímã.

De acordo com Filippo Filho *et al.* (2013), para determinar a velocidade de rotação do objeto, basta analisar com base na frequência do sinal (f) e na quantidade de polos do motor (p).

2.7 Medições de Grandezas Elétricas

Este tópico discutiu a base teórica da medição das grandezas elétricas, corrente e tensão, as quais foram selecionadas para que o multimedidor possa medi-las no motor de indução trifásico.

2.7.1 Medição de Corrente

Corrente elétrica é o fluxo de elétrons em um meio condutor e, de acordo com Steffen (2023), para realizar a medição desse fenômeno em motores de indução trifásicos, podem ser utilizados sensores de corrente em cada uma das três fases para, então, visualizar a corrente que flui sobre as fases do motor.

Como dito anteriormente, o efeito Hall é utilizado para criar componentes de medição de corrente elétrica. No mercado existem sensores evasivos, que permitem identificar a relação entre a corrente elétrica que passa através do condutor e a tensão de Hall gerada perpendicularmente a ela (SCHWINGEL, 2022).

Para isso, no mercado, existem diversos sensores para a aplicação, um de interesse é o ACS712, criado pela Allegro Microsystems. O sensor funciona por efeito Hall e mede a corrente partir do campo elétrico produzido pela corrente, o componente é adotado para a medição de corrente CA (corrente alternada) ou CC (corrente contínua), em até 30V, em variados sistemas de medição (MICROSYSTEMS, 2023).

Conforme a Microsystems (2023), o sensor ACS712 de baixo custo é do tipo invasivo, o que implica que o fio condutor deve ser diretamente acoplado a ele para a leitura. Este sensor utiliza um transdutor de efeito Hall, que permite detectar a corrente que flui através do fio, a partir da transformação de uma influência física em sinal elétrico. Comercialmente disponível em três modelos diferentes, para resoluções de 5A, 20A e 30A, é importante verificar a sensibilidade específica ao escolher o componente, pois essa sensibilidade influencia na variação e no estímulo do sensor. A sensibilidade é expressa em mV/A, indicando como o

sensor responde à corrente elétrica que passa por ele. Em relação aos resultados na leitura de corrente, um sensor com maior sensibilidade em mV/A será capaz de detectar correntes mais baixas com maior precisão, enquanto um sensor com menor sensibilidade será mais adequado para medição de correntes mais altas.

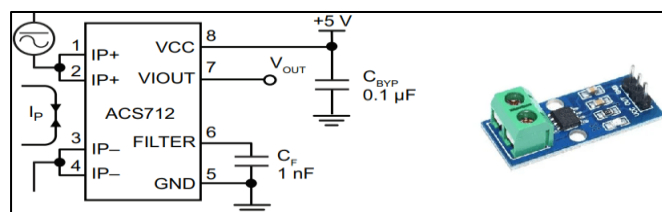
Tabela 1: Sensibilidade do sensor ACS712

Corrente	Sensibilidade
05A	158 mV/A
20A	100 mV/A
30A	66 mV/A

Fonte: Adaptado de: (MICROSYSTEMS, 2023)

A figura 7 demonstra as ligações do módulo sensor, ele é um componente integrado, que o torna mais fácil de aplicar. Ele apresenta em seu circuito, além do bone de fio para conexão evasiva do fio, um capacitor (CF) para eliminar ruído do sistema e a saída (Vout), que emitirá sinal analógico que pode ser lido e processado pelo microcontrolador, para a aquisição e calibração dos dados medidos (MICROSYSTEMS, 2023).

Figura 7: Módulo sensor de corrente



Fonte: Adaptado de: (MICROSYSTEMS, 2023)

Para medir corrente alternada em circuitos elétricos, é necessário ressaltar que ela é medida por meio da equação da corrente de pico, para determinar o valor máximo instantâneo da corrente, e da corrente eficaz, para representar a magnitude equivalente em corrente contínua, que produziria a mesma potência dissipada em uma carga resistiva (BOYLESTAD, 2012). Portanto, para uma onda senoidal, as seguintes equações 1 e 2 são utilizadas, em que I_{max} representa a corrente máxima detectada de uma onda:

Para corrente de pico:

$$I_{\text{eficaz}} = \frac{I_{\text{pico}}}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

Para corrente eficaz:

$$I_{\text{pico}} = \frac{I_{\text{máx}} - I_{\text{mín}}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

2.7.2 Medição de Tensão

Tensão elétrica é a diferença de potencial encontrada entre dois pontos, em um circuito elétrico, sendo medida em volts (V). Essa diferença de potencial é fundamental para o fluxo de corrente elétrica, proporcionando a energia necessária para que os elétrons se movam através do circuito (SADIKU; ALEXANDER; MUSA, 2014). Outro assunto que desempenha um papel importante nesse contexto é a tensão eficaz, que é a magnitude da corrente ou tensão alternada em um circuito, levando em consideração a magnitude e a frequência da onda (BOYLESTAD, 2012). Embora existam sensores de tensão disponíveis no mercado, neste trabalho, optou-se por desenvolver um circuito de medição de tensão, combinando práticas de eletrônica. A equação da tensão eficaz abordada por Boylestad (2012) na equação 3.

$$V_{\text{eficaz}} = \frac{V_{\text{pico}}}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

A medição da tensão elétrica pode ser realizada, utilizando transformadores e componentes retificadores, como demonstrado por Frangeto e Assis Mota (2013), que em seu trabalho desenvolveram um circuito elétrico capaz de medir tensão na rede elétrica de energia, utilizando divisores de tensão, transformadores e pontes retificadoras para desenvolver um sensor de tensão.

No mesmo sentido, os circuitos retificadores constituem-se em diodos semicondutores, que transformam a corrente alternada em corrente contínua. Após retificar a corrente, ela torna-se mais estável e adequada para medição. Isso é essencial, já que muitos dispositivos de medição e circuitos eletrônicos operam com corrente contínua. Uma vez convertida a corrente, é possível utilizar técnicas de medição direta para determinar a tensão elétrica Boylestad (2012).

Segundo Sadiku, Alexander e Musa (2014), os divisores de tensão são circuitos simples compostos por resistores conectados em série. Esses circuitos dividem a tensão total aplicada entre seus terminais, em proporções específicas, dependendo dos valores de resistência dos componentes.

Ainda de acordo com Teixeira (2017), esse princípio é utilizado em circuitos para

adaptar a faixa de tensão, medida à faixa de operação de um dispositivo específico, como um dispositivo de medição.

Em um contexto de medição de tensão elétrica, o condicionamento de sinais é crucial para garantir que o circuito possa armazenar carga elétrica e, conseqüentemente, energia potencial elétrica, utilizando capacitores, conforme abordado por Boylestad (2012) na seção 2.5.

2.8 Microcontrolador ESP32

Microcontroladores são módulos compostos por processador, memória e periféricos em um único chip, normalmente utilizados para aplicações em tempo real, em que é utilizado um programa para executar tarefas pré-definidas (MORAIS, 2023). O ESP32 é uma plataforma de prototipagem, criada em 2016, pela Espressif System, para proporcionar aos microcontroladores comerciais uma sólida capacidade de processamento, além de oferecer suporte a *Bluetooth* e *WiFi*. Amplamente empregado em projetos eletrônicos, Internet das Coisas (IoT) e sistemas embarcados, o ESP32 é reconhecido por seu desempenho e preço (SYSTEMS, 2023).

Ainda de acordo com o *datasheet* do componente, a linha de microcontroladores ESP são módulos de baixo custo e consumo de energia, que tem dois núcleos de CPU, com capacidade de processamento de 80 a 240 MHz, o que significa que o processador opera qualquer valor dentro dessa faixa de frequência de *clock*, permitindo que seja utilizada a frequência necessária, o que ajuda a reduzir o consumo de energia. Em questões de memória, o ESP32 tem uma memória interna de até 520 KB de RAM e memória flash, que permite o armazenamento de código e dados temporários, entre outros. Outra característica importante é que oferece possibilidade de interfaces de comunicação de periféricos, como I2C, UART e outras que possibilitam a comunicação do microcontrolador com sensores e atuadores externos e também possui sensor de efeito Hall interno. (SYSTEMS, 2023).

A ficha técnica, componente disponibilizado pela Espressif Systems, diz que a placa do microcontrolador contém as seguintes pinagens para utilização:

- Pinos analógicos, podem ser utilizados os pinos GPIO32 a GPIO39.
- Pinos digitais, podem ser utilizados a maioria de GPIO0 a GPIO39.
- Pinos ADC (conversor analógico-digital)
- Pinos de aterramento GND, pinos para alimentação do chip com capacidade de 12V e

pinos de integração para componentes integrados, com capacidade de 3,3V.

- Pinos de comunicação serial UART, RX, TX.
- Pinos para comunicação de protocolos SPI, MOSI, MISO e I2C.

Para a programação da placa ESP32, podem ser utilizadas as linguagens de programação C++, C, *Python*, entre outras. Essas linguagens são suportadas para o desenvolvimento de projetos embarcados e de IOT (ELETRÔNICA ÔMEGA, 2023). Conforme o guia de programação da Espressif de 2016, o ESP-IDF é o ambiente de programação oficial do ESP32. Diante disso, isso não impede que outras plataformas sejam utilizadas, como, por exemplo, a Arduino IDE, que possui uma interface simples, com suporte para integração da placa, a IDE platformIO que suporta várias placas e pode ser usado com uma extensão no VS code. Ambas as IDE's mencionadas podem ser usadas para depurar, compilar e descarregar o código para a placa (SUHANKO, 2023).

O microcontrolador mostra-se eficiente e de custo benefício comparado a outros microcontroladores do mercado, devido a seu preço, capacidade de processamento, comunicação *WiFi* com outros dispositivos e a quantidade de pinos para entradas analógicas e digitais (MORAIS, 2023).

2.9 Python

Python é uma linguagem de programação de alto nível, multiparadigma, multiplataforma e de sintaxe simplificada, o que a torna muito utilizada. Outra vantagem é que ela possui muitas bibliotecas disponíveis, inclusive bibliotecas que permitem a criação de interfaces gráficas (MENEZES, 2010).

De acordo com Python Software Foundation (2012), uma biblioteca disponível para a criação de interfaces com *Python* é a *Tkinter*, que fornece um kit de ferramentas para a criação de interfaces gráficas personalizadas e leves, que permite seleção de botões, visores e campos de preenchimento. *Python* também é utilizado para plotagem de gráficos, devido à quantidade de bibliotecas como a *Matplotlib*, que permite a criação de gráficos em 2D (MATPLOTLIB, 2012).

2.10 Comunicação Cliente e Servidor

Em redes de computadores, conforme apontado por Kurose e Ross (2013), as

aplicações de rede geralmente envolvem duas partes principais: o cliente e o servidor. O cliente inicia a comunicação com o servidor e solicita serviços e o servidor fornece os serviços solicitados ao cliente.

Para que o cliente e o servidor interajam entre si é utilizada a estrutura de *socket*. O *socket* é o ponto de extremidade de uma comunicação bidirecional entre dois programas em execução na rede e fornece um meio de comunicação entre processos. Essa estrutura está entre a camada de aplicação e a camada de transporte em modelos de rede, desempenhando um papel crucial na facilitação da comunicação entre aplicativos e na transferência eficiente de dados, através da rede. Na camada de aplicação, são utilizados protocolos para facilitar a comunicação entre clientes e servidores e a camada de transporte é responsável por transferir os serviços solicitados, realizando a conexão fim a fim, permitindo que os processos se entendam e troquem informações de maneira eficiente (KUROSE; ROSS, 2013).

2.11 Estado da Arte

O desenvolvimento de um analisador de parâmetros elétricos para motores de indução trifásicos foi apresentado no trabalho de Steffen (2023). Entre as principais contribuições deste trabalho, o autor enfatiza o desenvolvimento de uma solução de baixo custo para a medição, em tempo real, de grandezas elétricas em um MIT, como medição de corrente elétrica nas três fases, medição de tensão e medição de velocidade por um encoder, além disso, desenvolveu uma interface gráfica para exibição dos parâmetros no computador. Uma lacuna no estudo é que as grandezas que estão sendo medidas são apenas visualizadas por meio de uma interface no computador e, para analisar as formas de onda das informações que estão sendo captadas do motor, foi necessária a utilização de um osciloscópio.

Outro trabalho de interesse é o de Ferreira (2019), pois apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento em motores de indução trifásico, utilizando a plataforma Arduino. A pesquisa objetiva encontrar, nas medições, informações para prever o estado de conservação dos motores, contribui para o desenvolvimento do multimedidor a ser desenvolvido, uma vez que apresenta componentes de baixo custo para a análise de parâmetros em um MIT. Os resultados obtidos foram significativos e viabilizaram a utilização de um microcontrolador mais avançado para desenvolver análises com melhor conectividade. No entanto, uma limitação é que, para as análises preventivas e para o monitoramento dos gráficos, os dados devem ser salvos no editor de planilhas Excel, fazendo com que o processo de comunicação seja mais lento.

A partir dessas considerações, o projeto em questão irá permitir que o multimedidor seja usado, de forma didática, de modo que o professor poderá utilizá-lo para produzir aulas práticas, analisando as medidas, em tempo real, de um motor de indução trifásico, por meio de *display* e também por meio de gráficos, que serão exibidos em uma interface gráfica. Uma das vantagens em relação aos trabalhos apresentados, além do dispêndio de uso de um osciloscópio para a visualização de gráficos e da visualização dos parâmetros em *display* disponíveis para o usuário, é que permitirá uma melhor conectividade e praticidade no uso do multimedidor.

3 METODOLOGIA

Este capítulo aborda a metodologia adotada no trabalho, bem como a definição da pesquisa e a solução proposta, em busca de assegurar a replicabilidade do estudo e a robustez do multimedidor proposto para motores de indução trifásicos.

3.1 Definição da Pesquisa

A pesquisa realizada é de natureza aplicada, pois utilizou conhecimentos já validados para desenvolver um protótipo de medição didática, para o ensino de motores trifásicos. Quanto aos objetivos, é exploratória, pois, dentro desse contexto, passará por verificações, experimentos e testes, validando sua eficiência e eficácia. Será adotada uma abordagem quantitativa, pois, para a realização do estudo, serão mensuradas variáveis e resultados medidos pelo multimedidor. Por fim, obedece a uma pesquisa bibliográfica, já que se fundamenta em estudos e pesquisas pré-existentes, conforme referenciado por Gerhardt; Silveira (2009).

De acordo com Wazlawick (2009), autor que desenvolveu uma classificação de pesquisa para a área da computação, a proposta de pesquisa apresenta algo diferente, já que abordará a aplicação de um multimedidor de baixo custo para o ensino de motores de indução trifásicos.

O procedimento metodológico utilizado na pesquisa foi a metodologia de desenvolvimento de projetos dos autores Pahl, Beitz e Feldhusen (2007), que abrange desde a concepção do problema até a avaliação e seleção de soluções. Essa metodologia é amplamente reconhecida e aplicada em projetos de engenharia, oferecendo uma estrutura abrangente para orientar todas as etapas do processo de desenvolvimento.

3.2 Requisitos Funcionais e Não Funcionais

A etapa de requisitos foi realizada no laboratório de Automação e Controle, com o professor responsável pelo laboratório, visando requisitos de desenvolvimento, como instalação e espaço disponíveis para um melhor uso do dispositivo no IFMG – *Campus Bambuí*.

Tabela 2: Tabela de requisitos funcionais e não funcionais

Funcionais	Não funcionais
O multimedidor deve ser construído com componentes de fácil acesso e montagem, para tornar a sua produção e manutenção simples e econômica.	Utilização de acrílico para o desenvolvimento da caixa de proteção do motor, com o multimedidor integrado.
O multimedidor deve ser capaz de medir e exibir, em tempo real, as grandezas elétricas de um motor de indução trifásico, como tensão, corrente e velocidade.	Disponibilizar ao menos seis entradas analógicas e quatro entradas digitais. O microcontrolador escolhido, ESP32, atende os requisitos mínimos, e sua escolha implica na utilização da IDE do Arduino, para programar o microcontrolador.
Permitir seleção dos parâmetros por meio de uma IHM, implementada com <i>display</i> e botão para a seleção de parâmetros. Otimizando o uso de entradas digitais do microcontrolador.	Utilização do <i>display</i> com comunicação I2C, visando a utilização de apenas 4 fios para a comunicação, sendo 2 para entradas digitais, garantindo um melhor uso dos pinos do ESP32.
A placa de integração deve ser compacta, para permitir que seja facilmente instalada sobre o motor.	Os circuitos de integração, que envolvem os sensores de corrente e tensão, devem caber dentro da caixa de ligação do motor assim como a fonte de alimentação.
O multimedidor deve obter fonte de alimentação para ser ligado não apenas quando o motor estiver em funcionamento	A fonte de alimentação deve conter, no máximo, 8000 mA para conseguir alimentar o circuito completo.
Permitir o monitoramento dos parâmetros, através de uma interface gráfica.	Desenvolver uma interface gráfica na linguagem <i>Python</i> , que se comunicará com o multimedidor, através de uma comunicação WiFi.

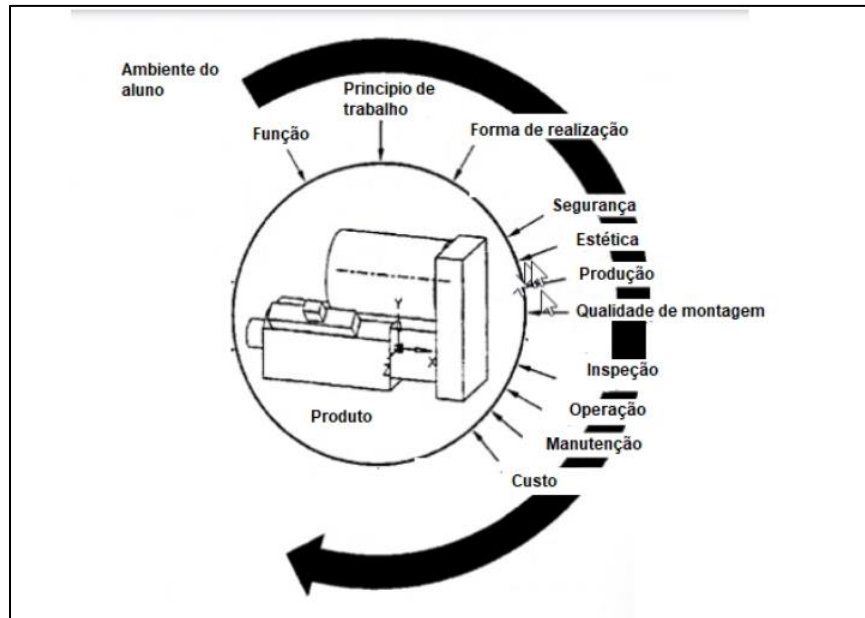
Fonte: Autor, 2023

3.3 Solução Proposta e Concepção da Ideia

Para a concepção do multimedidor, adotou-se um método fundamentado no ciclo de Pahl, Beitz e Feldhusen (2007), o qual estabelece as fases de desenvolvimento de um produto, conforme representado na Figura 8. O propósito central consiste em verificar se o design final, implementado nos testes em *protoboard*, atende aos requisitos estipulados por esse

ciclo, bem como os requisitos inerentes ao produto em desenvolvimento. A conformidade com esses parâmetros não apenas valida o produto resultante, mas também viabiliza a aplicação dele em um contexto específico, que é o ambiente do aluno.

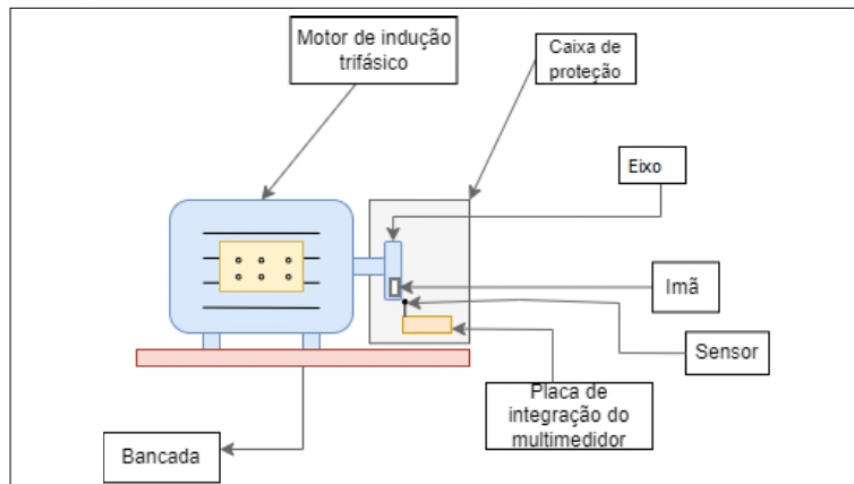
Figura 8: Ciclo de um produto



Fonte: Adaptado de: (PAHL; BEITZ; FELDHUSEN, 2007)

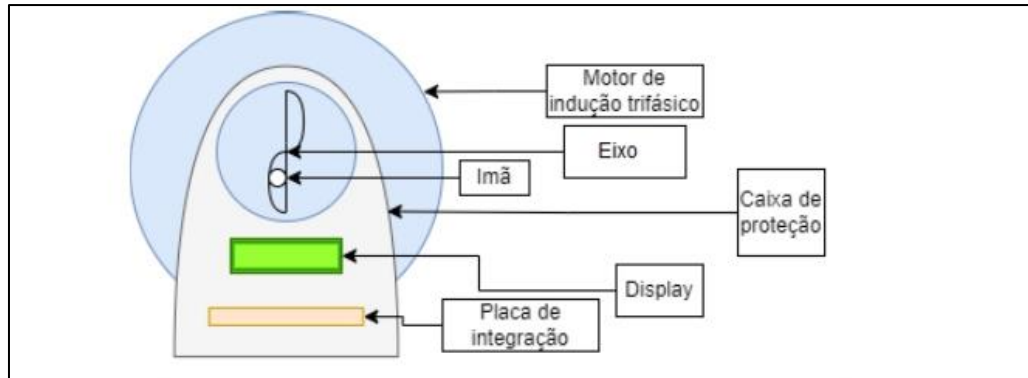
Para obter, no final, um produto de qualidade, em cada fase do projeto, foi necessário verificar as restrições necessárias para que o projeto cumpra todos os requisitos apresentados na seção 3.2. Foi feita uma proposta de instalação do multimetido nos motores da bancada didática do laboratório do IFMG – *Campus Bambuí* da seguinte forma:

Figura 9: Instalação do multimetido, pela visão lateral do MIT



Fonte: Autor, 2023

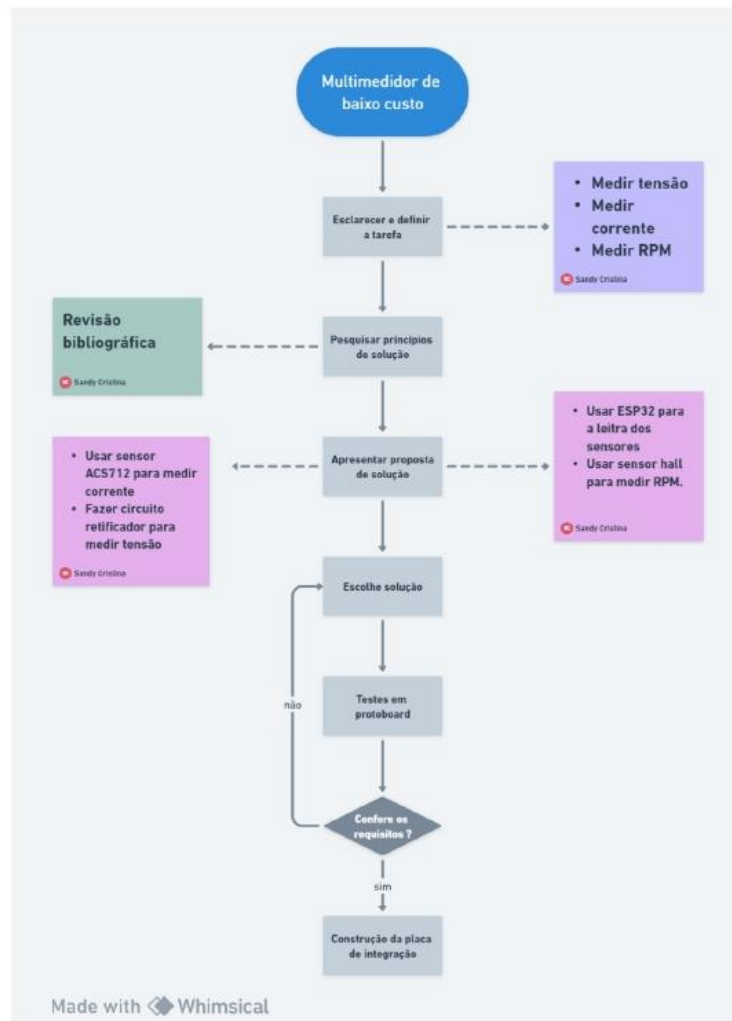
Figura 10: Instalação do multimetror, pela visão frontal do MIT



Fonte: Autor, 2023

O procedimento delineado nesta pesquisa estabelece que, após os testes realizados na *protoboard*, se a solução proposta atender aos requisitos do projeto, a placa de integração é montada para, então, proceder com a construção do protótipo. Veja no fluxo do processo:

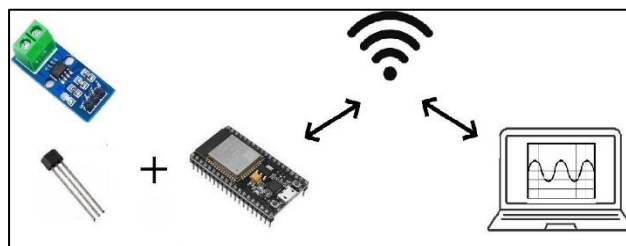
Figura 11: Fluxograma do procedimento



Fonte: Adaptado de: (PAHL; BEITZ; FELDHUSEN, 2007)

Ainda na fase inicial da concepção da ideia, vislumbrou-se a necessidade de desenvolver uma interface gráfica, capaz de comunicar-se com o ESP32, para mostrar gráficos em tempo real, como proposto nos requisitos na tabela 3.2. Nesse sentido, optou-se por adotar a seguinte abordagem, presente na figura, um cliente em *Python* envia uma requisição para um servidor que será o ESP32. Em resposta, o ESP32 envia os dados solicitados de volta ao cliente. A partir dessa comunicação cliente-servidor, o ESP32, realiza o envio de dados coletados dos sensores para a interface.

Figura 12: Comunicação entre ESP32, sensores e interface



Fonte: Autor, 2023

3.4 Especificações Nominais

Nesta etapa, realizou-se a aquisição dos parâmetros do circuito do MIT, visando identificar suas especificações nominais. Essas especificações são cruciais para a seleção dos sensores de corrente, comparação dos valores de velocidade e obtenção de informações essenciais para o desenvolvimento do multimedidor.

1. Motor de indução trifásico, do tipo rotor gaiola de esquilo w22.
2. A tensão máxima suportada é de 380V.
3. A corrente de pico é de, no máximo, 10A.
4. RPM é de 1710
5. Número de pólos: 4

Portanto, a placa de identificação do motor utilizado neste projeto é mostrada na Figura 13.

Figura 13: Placa de identificação do MIT utilizado



Fonte: Autor, 2023

3.5 Materiais

Os materiais utilizados foram:

- Motor de indução trifásico rotôr gaiola de esquilo w22, do IFMG – *Campus* Bambuí.
- Sensor de corrente ACS712, de baixo custo, adquirido pelo autor.
- Sensor Hall OH44E, de baixo custo, adquirido pelo autor.
- Microcontrolador ESP32-wroom, devido ao tamanho, baixo custo e quantidade de pinos para comunicação com sensores e *display*. Componente adquirido pelo autor.
- Componentes eletrônicos como resistores, diodos, ponte retificadora e capacitores para o circuito condicionamento de sinais. Esses equipamentos foram ofertados pelo IFMG - *Campus* Bambuí.
- *Display* I2C, utilizado devido à tecnologia de redução de pinos, componente adquirido pelo autor.
- Acrílico para a caixa de proteção, visto que o IFMG – *Campus* Bambuí possui máquinas a laser para fazer os cortes. O material foi disponibilizado pelo laboratório de eletrônica do IFMG *campus* Bambuí.
- Botão, adquirido pelo autor.
- Ímã de neodímio, adquirido pelo autor.

- Borne de fio, disponibilizado pelo laboratório de eletrônica do IFMG – *Campus Bambuí*.
- Fonte de 5volt para alimentar o circuito, disponibilizado pelo laboratório de eletrônica do IFMG – *Campus Bambuí*.

3.6 Bibliotecas

No software de medição implementado no microcontrolador, foram utilizadas as seguintes bibliotecas para as funcionalidades requeridas, tais como a *RunningMedian*, para calcular a mediana das leituras. Além disso, foram utilizadas as bibliotecas *Wire.h* e *LiquidCrystalI2C.h*, para suportar a comunicação I2C e a interface com o *display* LCD, respectivamente.

Para estabelecer a conexão entre o *Python* e o ESP32, foram adotadas as seguintes medidas de configuração: a biblioteca *WiFi.h* foi empregada para configurar o ESP32 com um servidor *WiFi*, viabilizando a conexão com a rede local do laboratório; a biblioteca *AsyncWebSocket* foi utilizada para permitir a comunicação bidirecional entre o ESP32 e o *Python*, possibilitando a troca de dados de forma assíncrona e eficiente.

No código em *Python*, foram utilizadas as bibliotecas *asyncio* e *websockets*, para implementar a comunicação assíncrona entre o servidor *Python* e o ESP32. *Matplotlib*, utilizada para gerar e exibir os gráficos de medição na interface gráfica e *matplotlib* e *tkinter*, empregadas para integrar os gráficos gerados pelo *Matplotlib* na interface gráfica, desenvolvida em *Tkinter* e, por fim, a biblioteca *customtkinter*, para criar elementos de interface gráfica customizados e estilizados.

3.7 Ferramentas Computacionais

O programa do microcontrolador foi desenvolvido, utilizando o paradigma estruturado na linguagem C. A escolha da Arduino IDE para a programação do microcontrolador deveu-se à sua interface intuitiva, simplicidade e à vasta quantidade de bibliotecas disponíveis para trabalhar com o ESP32.

Para a criação da interface gráfica, foi utilizada a linguagem de programação *Python*, no editor de texto *Visual Studio Code*, e foi adotado o paradigma de programação orientado a objetos. A escolha da linguagem foi devido à linguagem simplificada para

programar e a biblioteca *TKinter*, que possibilita criar interfaces.

Além disso, o circuito impresso da placa de integração foi projetado, utilizando o site *EasyEDA*, por sua acessibilidade e pela facilidade de uso e por ser uma ferramenta gratuita, disponível em qualquer navegador.

Por fim, para a programação da interface e para descarregar o código no ESP32, foi utilizado um notebook próprio do aluno, da marca Acer, modelo *Aspire5*, equipado com um processador Intel Core i5, da 8ª geração. Este dispositivo ofereceu o desempenho necessário para lidar com as demandas de desenvolvimento e programação do projeto.

4 DESENVOLVIMENTO E PROCEDIMENTO

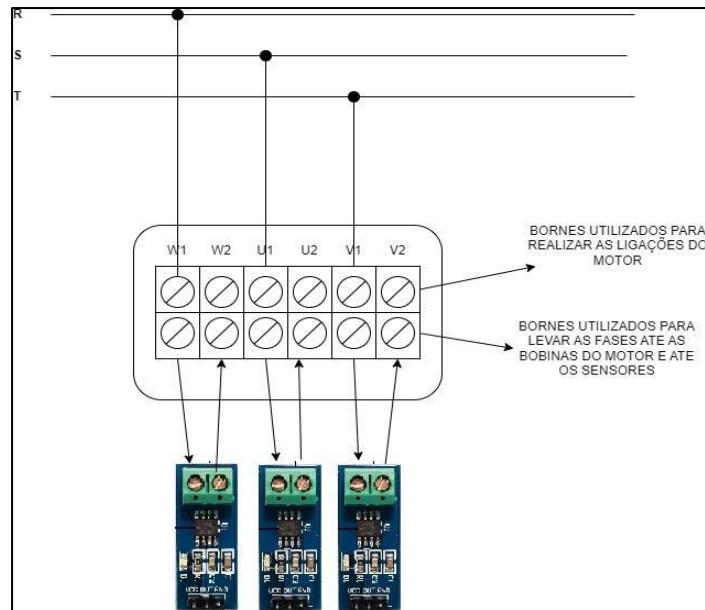
Este capítulo apresenta o procedimento e o desenvolvimento de um multimedidor, de baixo custo, para motores de indução trifásicos. O multimedidor desenvolvido é capaz de monitorar continuamente parâmetros como velocidade, tensão e corrente elétrica nas três fases que alimentam o motor. Para garantir o sucesso do sistema de medição, os sensores e os circuitos de condicionamento foram submetidos a testes em *protoboard* para passarem por um processo de avaliação e validação, antes de serem implantados na placa de integração, a fim de garantir as conexões corretas. Por fim, foram desenvolvidos testes em bancada e experimentos com o protótipo e com as interfaces de comunicação, para garantir e avaliar a eficácia do sistema de medição.

4.1 Medição de Corrente

O objetivo da medição de corrente alternada foi monitorar as três fases de alimentação do motor. Para isso, foram empregados três sensores de corrente ACS712, devido ao seu baixo custo e dimensões compactas. Foram utilizados dois sensores, com um valor máximo de corrente de 20A e um de 5A. Também foram utilizadas resoluções diferentes e analisar qual delas proporciona melhor precisão nas leituras.

Para a instalação dos sensores no motor, foi necessário ligar os componentes eletrônicos com a rede elétrica trifásica, isso foi feito, utilizando bornes para levar as fases da rede elétrica até os três sensores e também até as bobinas do motor, conforme ilustrado na figura 14.

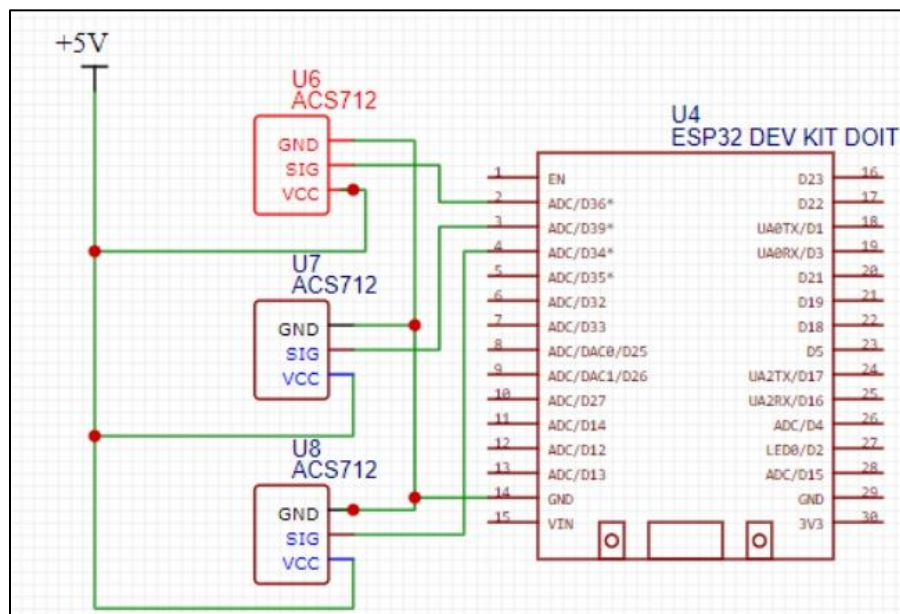
Figura 14: Ligação dos sensores de corrente nas fases



Fonte: Autor, 2023

Os sensores foram conectados aos pinos analógicos GPIO36, GPIO39 e GPIO34, que foram escolhidos para corresponder, respectivamente, às respostas capturadas das fases U, V e W. A ligação entre os sensores e o ESP32 pode ser observada no esquemático representado pela figura 15:

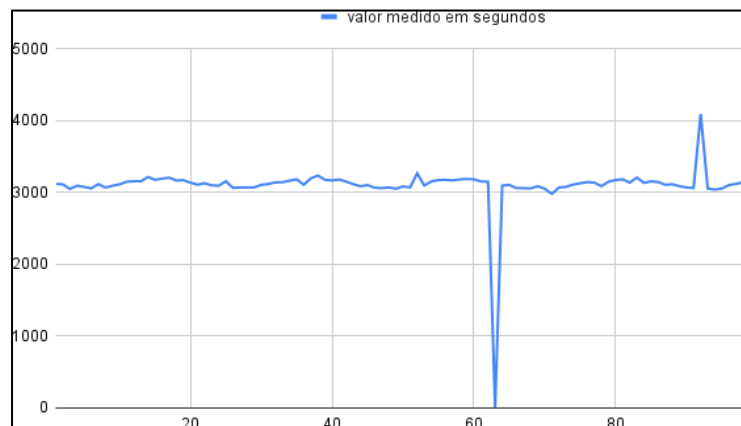
Figura 15: Esquemático ACS712 e ESP32



Fonte: Autor, 2023

Após realizar a conexão do circuito, foi implementado o código¹ no ESP32 para realizar a leitura de corrente. Inicialmente, foi realizada uma análise do sinal gerado pela fase e também foram encontrados os valores de máximo e mínimo. Com isso, foi possível viabilizar a medição e avaliação de uma onda senoidal. A Figura 16 mostra a onda do sinal gerado no pino analógico GPIO36 e a Figura 17 mostra a parte do código, onde se encontra esses valores de máximo e mínimo.

Figura 16: Valor lido no ADC do ESP32



Fonte: Autor, 2023

Figura 17: Captura dos valores de máximo e mínimo

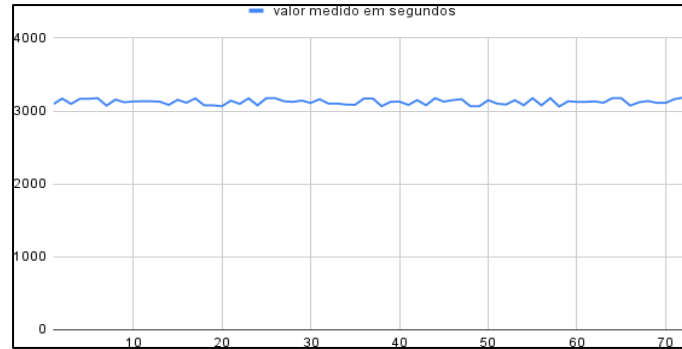
```
int sensorValue = analogRead(36);
// Atualiza os valores máximos e mínimos
if (sensorValue > maxTemp) {
    maxTemp = sensorValue;
}
if (sensorValue < minTemp) {
    minTemp = sensorValue;
}
```

Fonte: Autor, 2023

Na Figura 16, pode ser observado que o sinal analógico gerado pelo sensor apresentou irregularidades, o que poderia prejudicar a qualidade do resultado. Para solucionar esse problema, foi aplicado um filtro de mediana, com a utilização da biblioteca *RunningMedian*. Com a aplicação deste filtro, foi capaz de eliminar os valores discrepantes, conforme mostrado na Figura 18.

¹ <https://github.com/SandyCristina/Multimedidor>

Figura 18: Sinal após aplicação do filtro de mediana



Fonte: Autor, 2023

Como mostrado na Figura 18, os valores da onda giram em torno de 3000. Essa escala de valores corresponde à resolução de 12 bits do ESP32. Para converter esses valores para a escala real, foi necessário utilizar a equação 4.

$$tensaoPinCurrent = \frac{(maxValue - minValue) * 3,3}{4096} \quad (4)$$

O valor de 3,3 representa a tensão de referência do microcontrolador, em volts, e 4096 é o número máximo de valores que o conversor analógico-digital (ADC) pode representar, e os valores *maxValue* e *minValue* representam os valores de pico.

Para calcular a corrente eficaz da onda lida pelo sensor, foi utilizada a equação 5.

$$AmpsRMS_{RMS} = \frac{\frac{TensaoPIN}{2,5} * 0,707 * 1000}{Mv Amp} \quad (5)$$

O fator de 0.707 é utilizado para converter a amplitude da onda senoidal para o valor eficaz e 2,5 é o valor médio da tensão medida na saída do sensor, que foi medido usando um multímetro. O valor 1000 é necessário para converter a tensão para a escala de milivolts e, por fim, o valor mVAmp é correspondente a sensibilidade do sensor.

4.2 Medição de Tensão

Na medição de tensão, o objetivo foi elaborar um circuito capaz de monitorar a tensão de entrada correspondente à tensão de fase do motor de indução e reduzi-la para uma tensão menor na saída. Dessa forma, o ESP32 poderia realizar a leitura dos dados provenientes nos GPIO.

Portanto, foi desenvolvido um circuito para medir a tensão de linha, a qual é aplicada a cada bobina individual do estator, seja ela de 127V ou 220V. Dessa forma, torna-se

possível a leitura da tensão nas conexões em estrela e triângulo do motor.

O circuito implementado empregou um divisor de tensão, que diminui a tensão de entrada para um valor menor na saída, também foi utilizado um componente retificador que efetua a conversão da corrente alternada para corrente contínua, viabilizando sua leitura pelo ESP32. Também foi utilizado um capacitor de $100 \mu F$ e um resistor de $22 K\Omega$, que permitiu filtrar a tensão retificada de forma que não cause danos ao restante do circuito. Os valores desses componentes foram calculados de acordo com as especificações do circuito. Utilizando a equação 6, foi possível determinar os valores de saída do circuito.

$$V_{out} = \frac{REQ}{R1 + R2} * V_{in} \quad (6)$$

Sendo assim, o circuito consegue reduzir uma tensão de $127V$ para aproximadamente $1.6V$, como mostrado na equação 7.

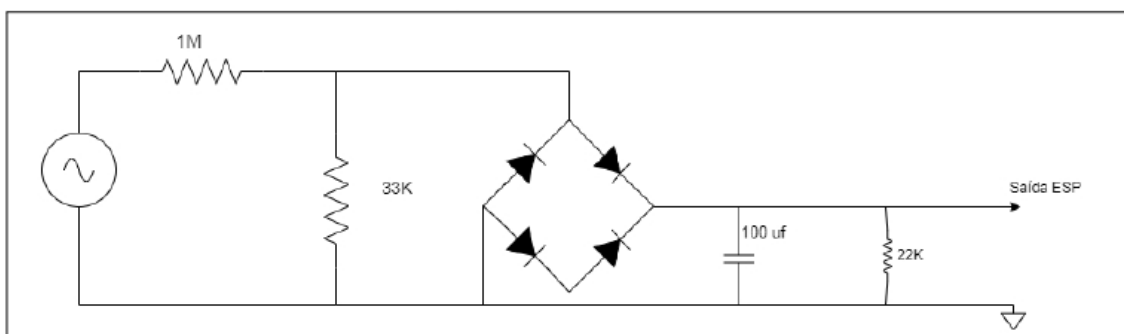
$$V_{out} = \frac{13.200\Omega}{1M\Omega + 13.2K\Omega} * 127V = 1.6V \quad (7)$$

Para uma tensão de $220V$, o circuito consegue reduzir esta tensão para aproximadamente $2,7V$, como mostrado na equação 8.

$$V_{out} = \frac{13.200\Omega}{1M\Omega + 13.2K\Omega} * 220V = 2,7V \quad (8)$$

A Figura 19 mostra o esquemático do circuito de medição de tensão.

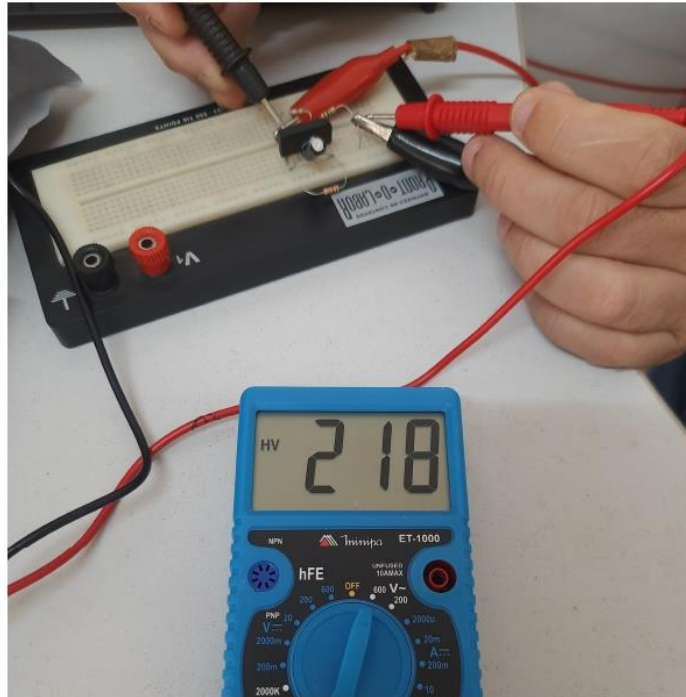
Figura 19: Esquemático do circuito de tensão



Fonte: Autor, 2023

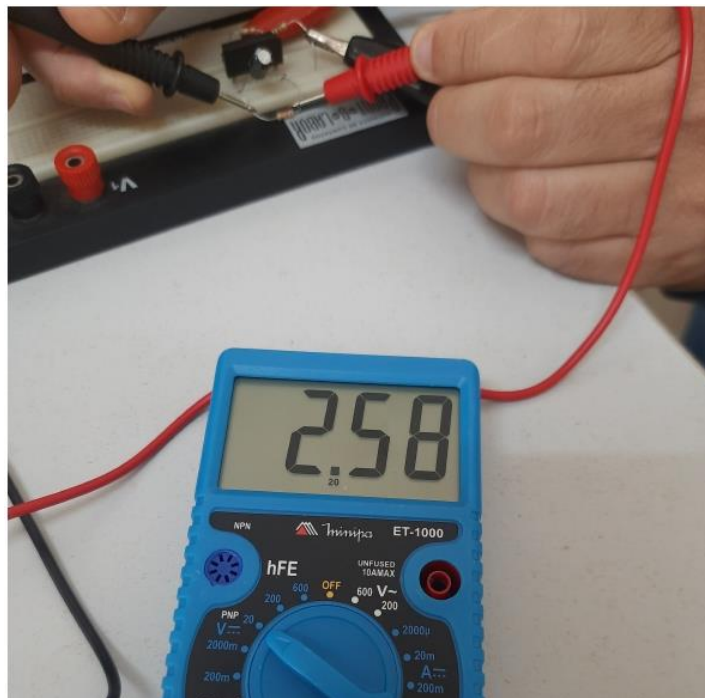
A Figura 20 apresenta a tensão de entrada e a Figura 21 mostra a tensão na saída do circuito.

Figura 20: Tensão de entrada do circuito alimentado por fase 220V



Fonte: Autor, 2023

Figura 21: Tensão de saída do circuito alimentado por fase 220V



Fonte: Autor, 2023

Após retificar o circuito e reduzir a tensão de entrada para um valor suportado pelo pino do ESP32, foi possível realizar a captura das informações pelo programa do microcontrolador. O código utilizado para realizar esta função é mostrado na figura 22.

Figura 22: Código da medição de tensão

```
float medTensao() {
  int sensorValue = analogRead(35);
  readingsT.add(sensorValue);
  float tensaoPin = (averageT * 3.3) / 4096;
```

Fonte: Autor, 2023

Nas primeiras medições, foram encontrados erros nas leituras devido a uma não linearidade no conversor analógico digital do microcontrolador, devido a isso, foi utilizado um potenciômetro para auxiliar a linearização, pois, utilizando o potenciômetro, foi possível encontrar a equação da reta que é utilizada para calibrar as medições, o que possibilitou a melhora da medição de tensão.

A tabela 3 mostra os valores simulados pelo potenciômetro para gerar as equações de reta.

Tabela 3: Tabela de linearização

Tensão de saída	ESP32-ADC	Tensão entrada
0V	0	0V
1.3V	1666	127V
2.6V	3251	220V
3.3V	4096	290V

Fonte: Autor, 2023

Após quebrar a tabela 3 em semirretas, foi possível encontrar a equação linear da reta e assim calibrar as medições, que antes eram não lineares. Isso foi tratado no código do microcontrolador, por meio de uma condição em que se verifica a tensão de saída e, assim, calibra o resultado para a tensão real medida, como mostrado na figura 23.

Figura 23: Linearização da medição de tensão

```
if (tensaoPin >= 1.10 && tensaoPin <= 1.99){
  ten=(96.35 * tensaoPin) + 7.11 - 15;
} else if (tensaoPin >= 2.0 && tensaoPin <= 2.99){
  ten = (95.5 * tensaoPin) + (-49.7);
} else {
  ten =0;
}
return ten; // Return the calculated value
```

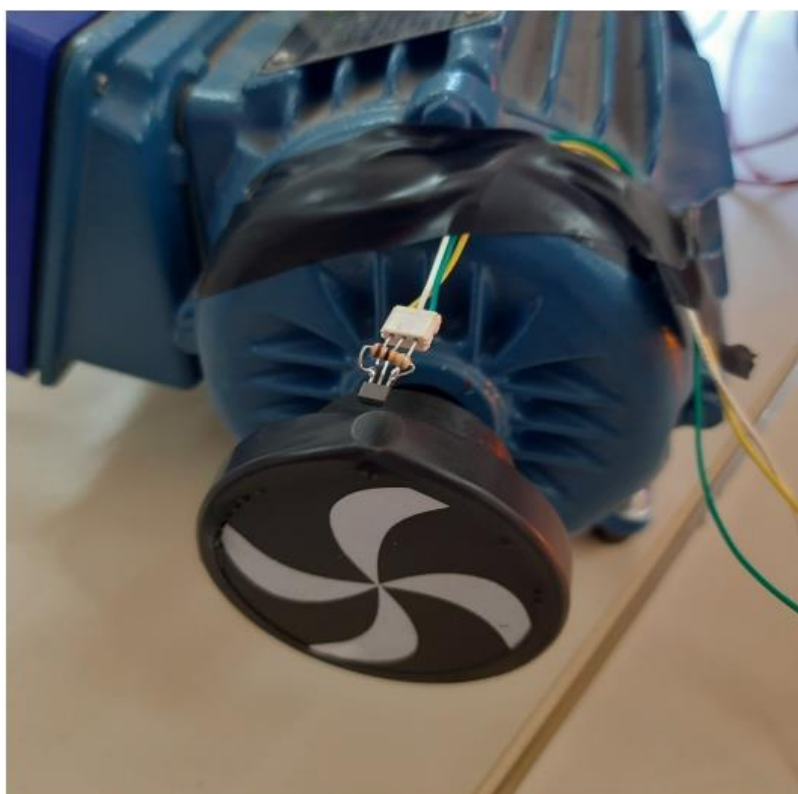
Fonte: Autor, 2023

4.3 Medição de Velocidade

O objetivo desta medição foi medir as rotações por minuto (RPM) de um motor de indução trifásico. Para isso, o componente escolhido foi o sensor magnético Hall, devido ao seu baixo custo e à sua capacidade. A sua operação baseia-se na detecção do campo magnético gerado por um ímã, portanto, para realizar a captura da rotação foi necessário posicionar um ímã de neodímio próximo ao rotor do motor, permitindo, assim, a medição conforme a quantidade de pulsos emitidos pelo sensor.

Optou-se por utilizar um sensor Hall externo, em contraposição ao sensor já integrado ao microcontrolador ESP32, pois isso permite que ele seja soldado em qualquer parte do medidor, maximizando a detecção do campo magnético gerado durante a rotação do motor. A Figura 24 mostra um teste com o sensor, para identificar a posição necessária para identificar um ímã preso ao rotor, que foi de um centímetro.

Figura 24: Teste da distância de detecção do sensor Hall

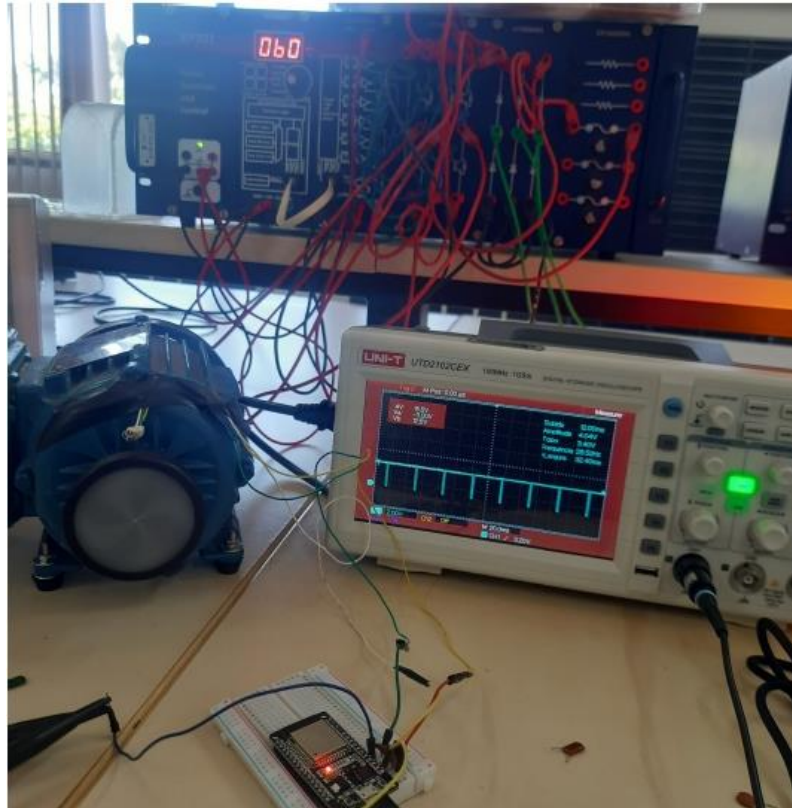


Fonte: Autor, 2023

Durante os testes realizados, visando aprimorar a precisão do sensor, foram empregados um inversor de frequência e um osciloscópio. Esses equipamentos possibilitaram

uma avaliação mais detalhada do desempenho do sensor em diferentes rotações, como mostrado na Figura 25.

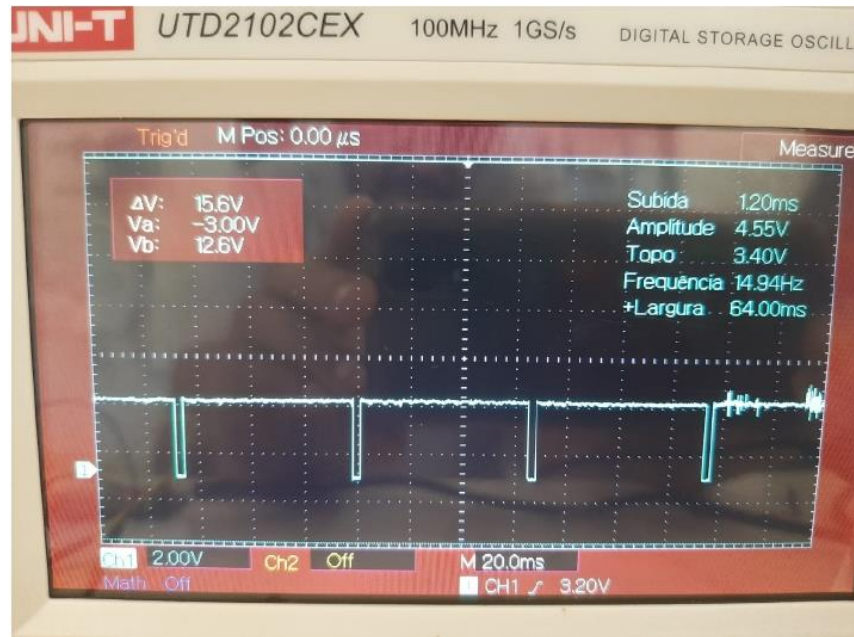
Figura 25: Ambiente de teste



Fonte: Autor, 2023

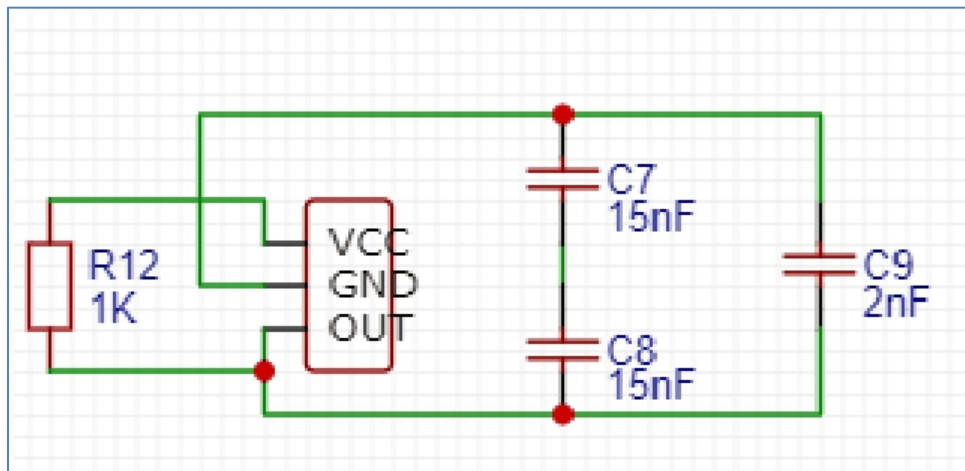
Como pode ser observado na figura 26, o sinal exibiu certa interferência de ruídos eletromagnéticos, levando à implementação de um circuito projetado especificamente para mitigar essas interferências. Esse circuito incorpora três capacitores cerâmicos: dois de $15\mu F$ em serie e um de $2\mu F$. A particularidade desta configuração reside na ligação desses capacitores entre os terminais GND e OUT, contribuindo para criar um caminho eficiente de descarga dos ruídos, minimizando as interferências e distorções no sinal detectado pelo sensor, durante as operações do motor. A Figura 27 mostra o esquemático do circuito de condicionamento de sinais.

Figura 26: Onda de detecção do imã pelo sensor Hall



Fonte: Autor, 2023

Figura 27: Esquemático do circuito de condicionamento de sinal do sensor Hall



Fonte: Autor, 2023

Para realizar a captura das medições no código do microcontrolador, foi implementada a técnica de interrupção para que, sempre que houver uma rotação no motor e se o sensor Hall detectar o campo magnético do ímã, uma parte específica do código seja acionada. Foi utilizada a interrupção externa, utilizando a função `attachInterrupt()` da Arduino IDE, configurada no pino digital associado ao sensor. Quando o sensor Hall detecta uma borda de descida, ele aciona a interrupção externa e, então, a função `handleInterrupt()` é acionada, conforme mostrado na Figura 28.

Figura 28: Função de interrupção e cálculo de RPM

```

void setup() {
  pinMode(interruptPin, INPUT_PULLUP);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(interruptPin), handleInterrupt, RISING);
  previousMicros = micros(); // Inicializa o tempo inicial

void handleInterrupt() {
  unsigned long currentMicros = micros();
  rpm = 60000000.0 / (currentMicros - previousMicros);
  previousMicros = currentMicros;
}

```

Fonte: Autor, 2023

Dentro dessa função, é calculada a RPM, com base no tempo decorrido entre as interrupções. Utilizou-se a função *micros()* da Arduino IDE para obter o tempo em microssegundos, desde que o programa começou a ser executado. A equação 9 é utilizada para converter o tempo entre as interrupções em rotações por minuto.

$$RPM = \frac{60000000.0}{currentMicros - previousMicros} \quad (9)$$

Essa equação calcula a RPM, com base no tempo decorrido entre as interrupções. Aqui, *currentMicros* representa o tempo atual, em microssegundos, e *previousMicros* representa o tempo anterior, *previousMicros* é atualizada para o tempo atual, a fim de calcular o próximo intervalo de tempo entre as interrupções. Isso permite a leitura da RPM do motor.

4.4 Placa de Integração do Protótipo

Na construção do protótipo, as placas de circuito impresso foram separadas em três placas, sendo uma para o circuito de potência, uma para o circuito do sensor Hall e uma para o circuito do microcontrolador com o *display*, o botão e as saídas dos seis sensores analógicos.

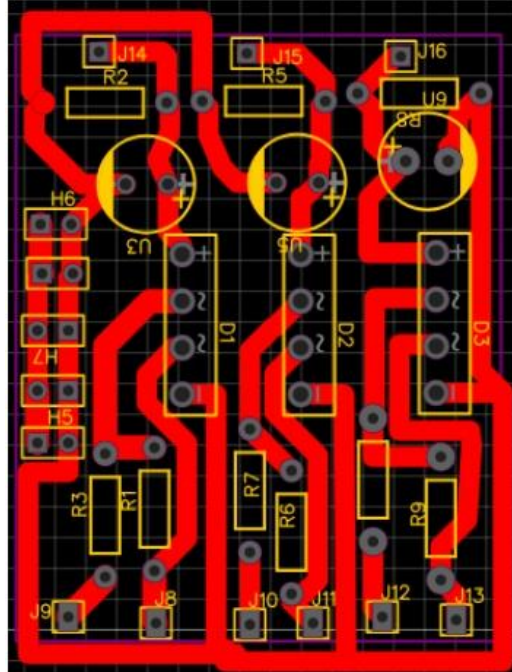
Cada circuito precisou ser dimensionado para se adequar a tamanhos diferentes, de modo que coubesse dentro da caixa de alimentação do motor e também da caixa de proteção do multimedidor. Com o objetivo de alimentar os componentes, que consomem 5V, foi instalada uma fonte de alimentação de 5V e 8000mA para os circuitos.

Após a realização dos testes dos sensores em *proto board*, foi feita a montagem das placas de circuito impresso. O projeto foi desenvolvido no site online *EasyEDA*, que oferece ferramentas para esquemas, simulações e placas de circuito impresso de forma gratuita.

No processo de desenvolvimento das placas, foi utilizado percloroeto de ferro para corroer uma placa de fenolite e traçar linhas de cobre. As Figuras 29, 30, 31 mostram,

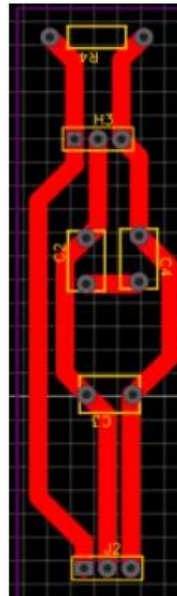
respectivamente, o esquemático das placas do circuito de potência, sensor Hall e ESP32.

Figura 29: Placa do circuito de potência



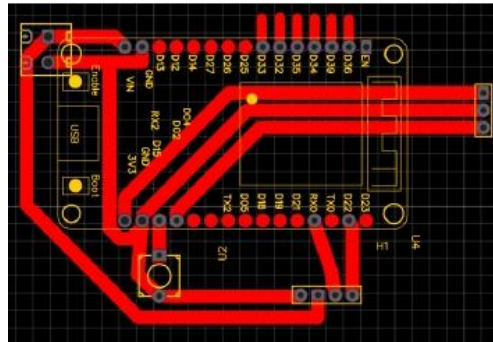
Fonte: Autor, 2023

Figura 30: Placa do circuito do sensor Hall



Fonte: Autor, 202

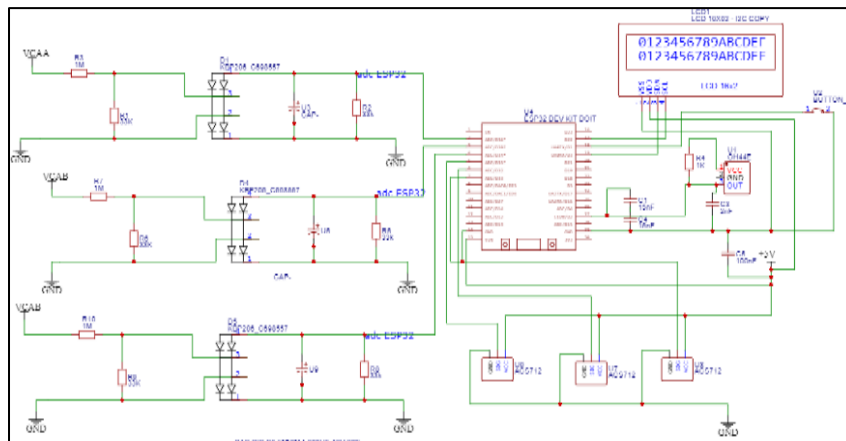
Figura 31: Placa do ESP32 e display



Fonte: Autor, 2023

A Figura 32 mostra o esquemático completo do multimedidor.

Figura 32: Esquemático completo do circuito multimedidor



Fonte: Autor, 2023

Antes da instalação do protótipo desenvolvido no MIT, foram realizados testes na placa, para identificar possíveis problemas físicos, como ligações, além do teste da fonte de alimentação, em que se constatou o funcionamento correto do circuito.

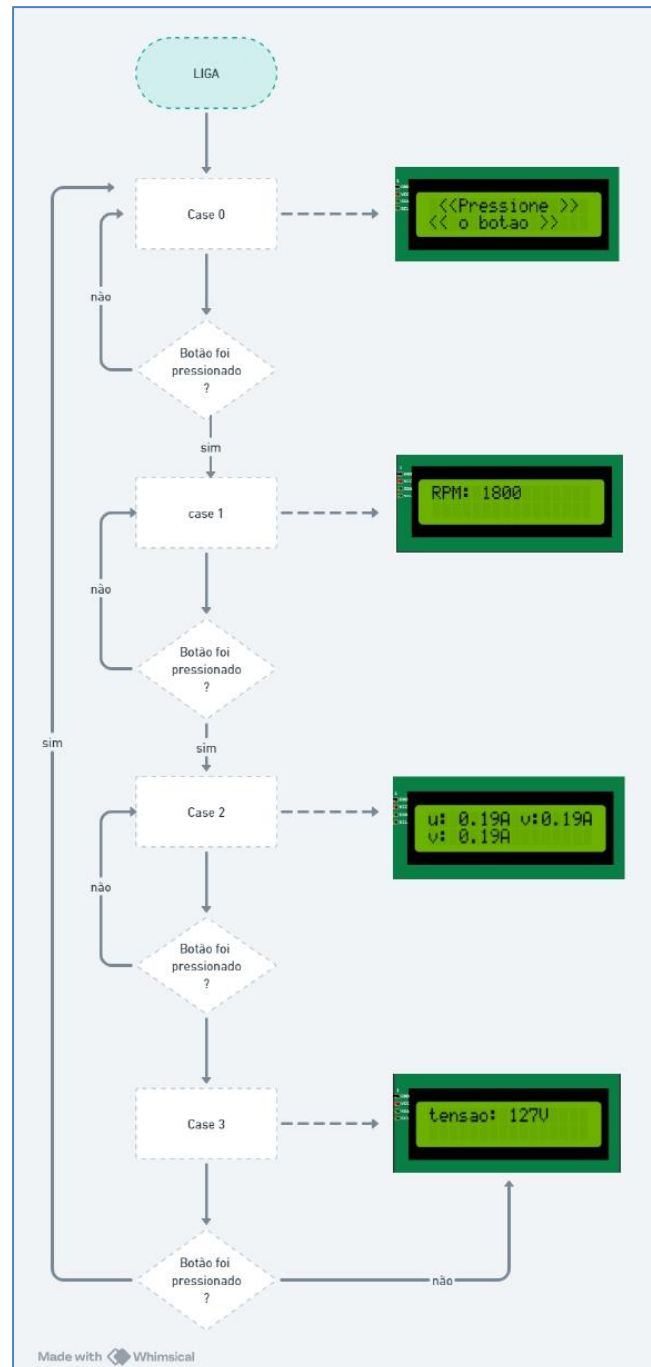
4.5 Telas do Display e Interface Gráfica

Para visualizar os parâmetros medidos, o objetivo foi proporcionar aos usuários a visualização dos valores em tempo real, implementada em um *display* e também permitir a visualização de gráficos a partir de uma interface gráfica.

Na IHM local do multimedidor, foi utilizado um *display* de 16 linhas e 2 colunas de baixo custo, que utiliza o protocolo I2C para comunicação. Portanto, consoante as resoluções da tela, as informações no dispositivo mostrador deveriam ser compactas e permitir seleção

manual do usuário para que ele consiga explorar todos os parâmetros oferecidos na ferramenta. A fim de aumentar a interatividade do usuário com o multimedidor, optou-se por ilustrar os parâmetros separadamente e que ele selecione as telas desejadas. Este processo é melhor ilustrado no fluxo da figura 33.

Figura 33: Fluxo da máquina de estados do display



Fonte: Autor, 2023

Para estabelecer a comunicação do visor com o ESP32, foram empregadas as

bibliotecas *Wire.h* e *LiquidCrystal I2C.h* e, para permitir a troca de telas, foi implementado um botão que, ao ser pressionado, altera a tela para visualização de outra variável. Para controlar a máquina de estados, utilizou-se a estrutura de dados *Switch case* no código do microcontrolador, permitindo controlar a sequência da troca de telas. Isso é apresentado na figura 34.

Figura 34: Código da estrutura criada para a máquina de estados das telas

```
int buttonState = digitalRead(buttonPin);

if (buttonState == LOW && !buttonPressed) {
    buttonPressed = true; // Indica que o botão foi pressionado
    currentState = (currentState + 1) % 4; // Alterna entre os estados (0 a 4)
    lcd.clear();
}
// Verifica se o botão foi liberado para permitir a próxima mudança de estado
if (buttonState == HIGH) {
    buttonPressed = false;
}
// Executa o caso correspondente ao estado atual
switch (currentState) {
case 0:
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("<<Pressione >>");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("<< o botao >>");
    break;
```

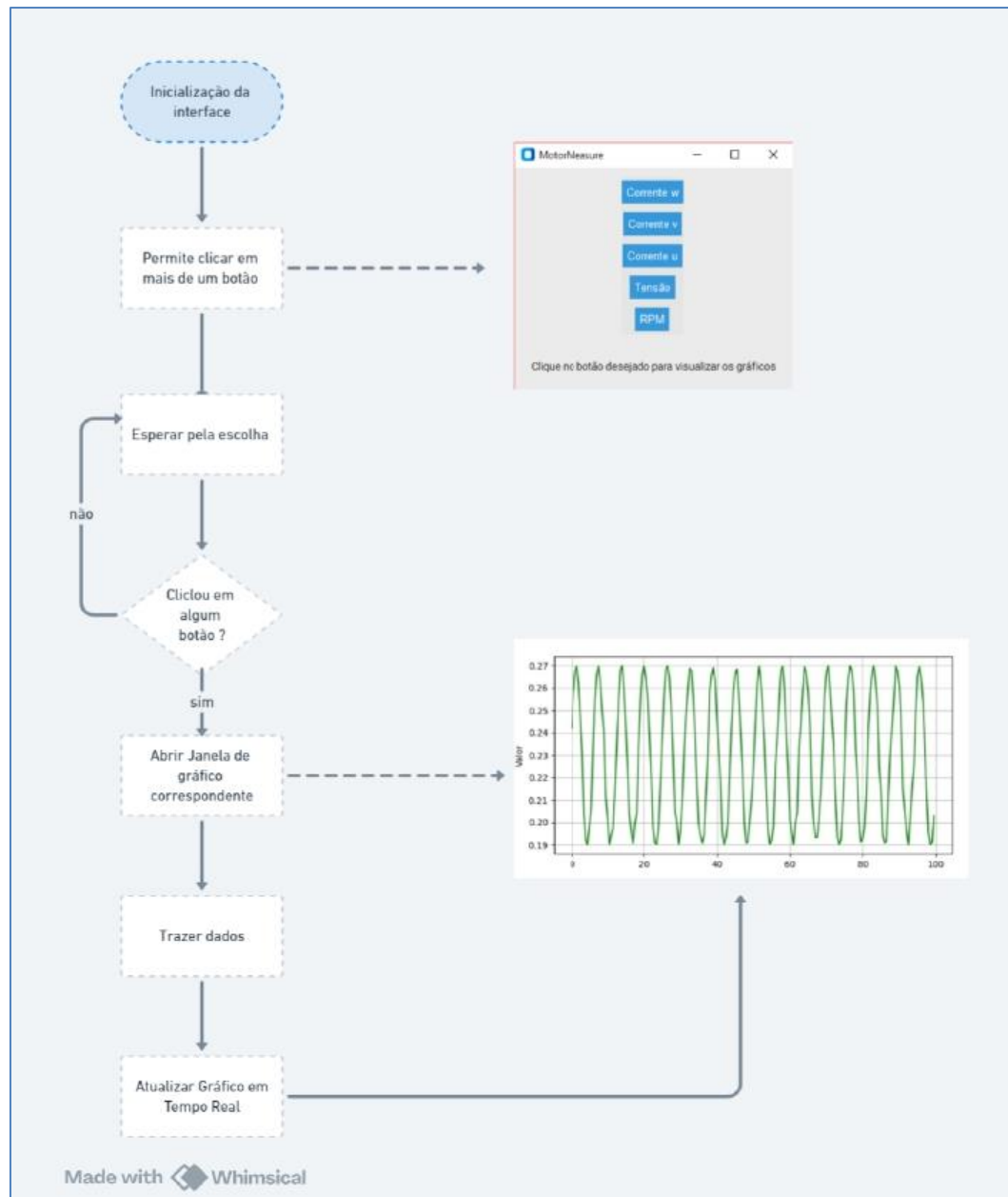
Fonte: Autor, 2023

A funcionalidade principal reside na leitura da condição de um botão conectado ao dispositivo. A variável *buttonState* armazena o *status* e determina se o botão foi pressionado ou não. Ao detectar uma pressão, a variável *buttonPressed* é ajustada para verdadeira, evitando execuções repetidas da ação associada ao botão, enquanto ele estiver pressionado.

Na interface gráfica, o objetivo foi plotar gráficos em tempo real das informações coletadas, pelo ESP32, dos sensores aplicados ao motor. Para isso, foram utilizadas as bibliotecas *TKinter* e *MatPlotLib*, em *Python*.

A interface foi desenvolvida com três botões para visualizar os gráficos de corrente, um botão para os dados de tensão e outro para RPM. Foi observado que será interessante, para aulas didáticas, apresentar os gráficos em conjunto, pois isso permite uma melhor compreensão. Portanto, para facilitar a análise dos dados, foi implementada a técnica de sincronismo, o que possibilita a abertura de várias janelas de gráficos, simultaneamente. Isso permite aos usuários analisar os valores gerados de forma mais eficiente e realizar comparações entre diferentes variáveis, em tempo real. A Figura 35 mostra o fluxograma do funcionamento da interface

Figura 35: Fluxo da interface



Fonte: Autor, 2023

Para gerar os gráficos, os dados foram processados de modo que, ao abrir a interface, seja solicitada uma conexão com o ESP32. Uma vez estabelecida a conexão, o ESP32 envia os dados gerados dos sensores serializados para a interface. Em seguida, esses valores são desserializados e salvos em listas distintas, permitindo direcionar os dados de cada sensor para que, assim, seja gerado o gráfico. Durante esse processo, o ESP32 converte o valor lido em uma *string*, enquanto, no lado da interface, é realizada a conversão de volta para um dado do tipo *float*.

O gráfico foi plotado conforme o valor do medidor e o tempo em segundos, sendo

atualizado continuamente, à medida que novos valores são recebidos. Com isso, foi possível obter uma animação, formando uma representação visual dinâmica e em tempo real do comportamento dos parâmetros monitorados ao longo do tempo.

Para conectar o ESP32 e a interface gráfica, foi necessário conectar o ESP32 ao *WiFi* de uma rede local e, para isso, foi utilizada a biblioteca *WiFi.h*.

A conexão do ESP32 com a interface gráfica foi estabelecida por meio de uma conexão *websocket*. No código do ESP32, que atua como servidor, foi configurada uma rota para estabelecer a conexão. Isso foi feito, usando a classe *AsyncWebSocket* para criar uma rota, como mostrado na Figura 36.

Figura 36: Configuração de envio do servidor

```
// Instanciação dos objetos da classe AsyncWebSocketSS
AsyncWebSocket ws("/ws");

// Configurar a rota para o cliente estabelecer a conexão WebSocket
ws.onEvent(onWebSocketEvent);
server.addHandler(&ws);

String data = String(correnteFase1) + "," + String(correnteFase2) + ","
// envia string para clientes conectados
ws.textAll(data);
```

Fonte: Autor, 2023

Para que a interface, que atua como cliente, conecte-se ao ESP32, foi necessário implantar a função mostrada na Figura 38.

Figura 37: Estrutura para receber dados do servidor

```
async def receber_dados_do_websocket(self):
    esp32_ip = "111.111.1.1"
    port = 80
    url = f"ws://{esp32_ip}:{port}/ws"
    async with websockets.connect(url) as websocket: #
        self.conexao_aberta = True
        while True:
            data = await websocket.recv()
```

Fonte: Autor, 2023

Para gerar os gráficos e fazer com que a interface continue responsiva, foram utilizados dois métodos: um método que é responsável por abrir uma nova janela, para exibir um gráfico e gerar uma animação, e outro que é chamado pela animação para atualizar o gráfico com os novos dados recebidos do *websocket*.

Figura 38: Animação do gráfico

```

def abrir_janela_grafico_value(self, value, titulo):
    # Iniciar animação
    self.ani_dict[value] = FuncAnimation(fig, lambda frame: self.atualizar_graficos(frame, value, ax),
    Interval=1000, blit=False)

def atualizar_graficos(self, frame, corrente, ax):
    if self.corrente_disponivel and received_data[corrente]:
        data = received_data[corrente].pop(0)
        valores = [float(y) for y in data.split(",") if y]
        xlist[corrente].append(time.time() - strat)
        ylist[corrente].extend(valores)

```

Fonte: Autor, 2023

Sem a animação, o gráfico seria estático e não seria atualizado dinamicamente, à medida que novos dados chegam. Além disso, para acessar a interface, foi criado um executável.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo abordou os resultados obtidos, comparando o valor coletado do experimento com as medições realizadas por outros aparelhos, tais como multímetro, amperímetro e inversor de frequência. Dentre os parâmetros, destacam-se as medições de corrente, tensão e RPM. Além disso, foi levado em consideração o investimento necessário para implementação do multimedidor e aplicação das interfaces de comunicação.

5.1 Ensaio Elétrico

Para avaliar a precisão das medições realizadas com o multimedidor, foram conduzidos dois testes para as medições de tensão e corrente elétrica, as ligações do motor em estrela e em triângulo. Para avaliar a precisão das medições de RPM, foi empregado um inversor de frequência para alterar a velocidade em Hertz (Hz) do motor. Isso permitiu entender a capacidade do medidor desenvolvido de adaptar-se a diferentes velocidades e diferentes variações nos parâmetros de interesse.

A ferramenta didática, quando instalada no motor, não respondeu bem ao uso de um inversor de frequência, pois acarretou interferência eletromagnética no circuito de medição de tensão, tornando incapaz de realizar medições, seja com o circuito desenvolvido ou com um multímetro.

5.2 Ensaio Elétricos de Velocidade

Os resultados obtidos mostraram uma relação direta entre a velocidade de rotação, que está sendo medida no multimedidor desenvolvido, o sinal gerado pelo sensor Hall e o valor teórico que deveria estar sendo lido.

A tabela 4 apresenta o valor da frequência transmitida pelo inversor para o motor. Foi feito o cálculo da RPM, obtido no ESP32, e o cálculo do valor que era esperado a partir da frequência aplicada pelo inversor.

Tabela 4: Tabela de valores de RPM

HZ	RPM (esp32)	REAL	ERRO %.
3	99	90	10,0%.
6	188	180	4,4%.
9	276	270	2,2 %.
12	364	360	1,1 %.
18	543	540	0,6 %.
24	722	720	0,3 %.
30	899	900	-0,1 %.
48	1438	1440	-0,1 %.
54	1618	1620	-0,1 %.
60	1798	1800	-0,1%.

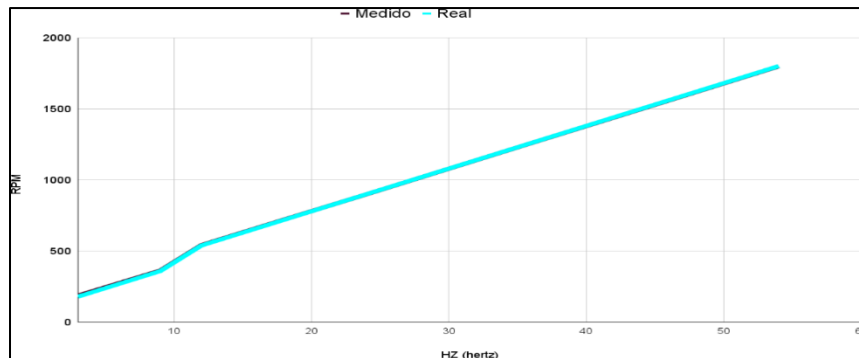
Fonte: Autor, 2023

À medida que a velocidade aplicada ao motor aumentou, os pulsos emitidos pelo sensor Hall também aumentou, porém foi observado que, quando a rotação do motor é menor, há um erro maior na leitura. Isso pode ser melhor observado no gráfico da Figura 39.

Apesar do valor do erro ser maior em baixas rotações, isso não interfere no impacto das medições e avaliações do motor, uma vez que as rotações de interesse para verificar motores de indução trifásica estão acima de 10 HZ.

O código da medição de velocidade envolveu o cálculo de RPM com técnica de interrupção, essa técnica foi favorável para o funcionamento do sensor e do código em geral, pois além de não sobrecarregar o código, permitiu que um evento externo acione uma rotina somente se necessário.

Figura 39: Gráfico RPM



Fonte: Autor 2023

Com a aplicação de capacitores cerâmicos, no circuito de condicionamento de sinal, foi possível a supressão de ruídos, o que contribuiu significativamente para a obtenção de um sinal mais limpo nas medições. Apesar da medição de RPM ter um erro maior para velocidades baixas, os valores foram satisfatórios.

5.3 Ensaio Elétrico de Tensão

Nos ensaios de tensão, o objetivo foi determinar se o circuito de medição seria capaz de discernir entre as diferentes conexões do motor, após os ajustes de linearização. Os testes foram conduzidos para avaliar o desempenho do circuito em ambas as ligações. O circuito foi aplicado entre a entrada e saída da bobina "U" do motor de indução para realizar as medições. Ao realizar a ligação do motor na rede trifásica pela configuração em estrela e depois, em triângulo, foi observado que o circuito de medição desenvolvido consegue captar as variações de tensão, decorrentes da alternância entre as ligações por meio do multimedidor.

Essas mudanças nas ligações resultam em diferentes tensões de alimentação na bobina do motor, que recebe 127V quando está em estrela e 220V quando está em triângulo. Dessa forma, ao medir a tensão entre os pontos de entrada e saída da bobina, foi possível capturar e quantificar essas variações, o que permitiu avaliar como o circuito responde ao realizar diferentes alimentações no motor. Essas alterações foram listadas na tabela 5.

Tabela 5: Tabela de valores medidos da tensão em Volt

Ligação	Multímetro	TensaoPIN ESP32	Calibração	Erro %
Estrela	127V	1,3	125V	2,0
Triângulo	220V	2,6	219V	1,0

Fonte: Autor, 2023

Os resultados apresentados nas tabelas mostram que o circuito conectado ao ESP32 foi capaz de registrar valores de tensão próximos aos medidos pelo multímetro, indicando que o circuito desenvolvido foi eficaz. No entanto, foi observada uma limitação durante a aplicação do inversor de frequência ao motor, já que não foi possível realizar leitura de tensão juntamente com a aplicação do inversor no multimedidor.

5.4 Ensaios Elétricos com Sensor de Corrente

Nos ensaios de medição de corrente, cada fase foi representada por uma letra (U, V, W). As fases U e V foram equipadas com sensores configurados para 20A, enquanto a fase W foi configurada com um sensor de 5A, resultando em medições que variam conforme a sensibilidade padrão dos sensores. Notavelmente, o sensor de 20A demonstrou uma proporção mais precisa durante as medições realizadas na ligação em estrela, obtendo uma melhor precisão com a configuração de 20A e um maior erro com a configuração de 5A, como pode ser observado na tabela 6.

Tabela 6: Tabela de valores medidos da corrente na ligação em estrela

Fase	Range	Amperímetro (mA)	Sensor (mA)	Erro absoluto (%)
U	0 a 20A	0,19	0,18	0,01
V	0 a 20A	0,19	0,20	-0,01
W	0 a 5A	0,19	0,12	0,07

Fonte: Autor, 2023

Na tabela 7, foi feita a coleta dos valores de corrente na ligação em triângulo. Nesta configuração, a corrente elétrica é mais elevada e notou-se uma menor precisão nas leituras fornecidas pelo ACS712. No entanto, essa ocorrência, mesmo que com um erro maior, foi satisfatória, pois o sensor foi capaz de distinguir o aumento da corrente elétrica no sistema de medição, quando uma corrente maior que a corrente da ligação em estrela foi aplicada. Essa capacidade de discernimento possibilitou uma compreensão mais clara dos níveis de corrente em circulação no motor, garantindo, assim, uma compreensão adequada da carga elétrica do motor e das diferentes ligações.

Tabela 7: Tabela de valores medidos da corrente na ligação em triângulo

Fase	Range	Amperímetro (mA)	Sensor (mA)	Erro absoluto (%)
U	0 a 20A	0,95	0,53	0,42
V	0 a 20A	0,95	0,53	0,42
W	0 a 5A	0,95	0,59	0,36

Fonte: Autor, 2023

De acordo com o *datasheet*, a precisão do sensor depende de vários fatores, incluindo a versão específica do sensor e as condições de operação. Além disso, um dos fatores que podem interferir nas medições é a interferência eletromagnética, já que o sensor ACS712 opera com base no efeito Hall, que é influenciado e sensível a campos magnéticos externos.

Além disso, é importante considerar que os pinos analógicos do ESP32 podem exibir não linearidades em suas leituras. Mesmo com a aplicação de técnicas de filtragem de ruído, como a utilização de filtros de mediana, ainda existe a possibilidade de ocorrerem erros nas medições, devido a essa característica.

5.5 Custo-Benefício

A análise do orçamento foi conduzida com foco nos preços disponíveis na loja Baú da Eletrônica. Componentes eletrônicos essenciais, tais como resistores, capacitores e ponte retificadora, foram adquiridos do laboratório de eletrônica do IFMG – *Campus* Bambuí. A fim de aprimorar a análise de custos, esses elementos estão devidamente listados na tabela 8.

Após uma análise minuciosa dos custos dos materiais necessários para o projeto, que totalizaram R\$ 320,73, constata-se que o investimento financeiro exigido está dentro das expectativas e é justificável diante dos benefícios esperados. Ao adquirir componentes essenciais de fontes estratégicas, como o Laboratório de Eletrônica do IFMG – *Campus* Bambuí, e ao desenvolver um circuito para a medição de tensão, foi possível otimizar os gastos sem comprometer a qualidade do projeto. Dessa forma, o levantamento dos custos possibilita uma gestão eficiente dos recursos, assegurando um controle financeiro mais preciso e uma execução do projeto para fins didáticos com um melhor acesso.

Tabela 8: Custo dos materiais

Componente	Quantidade	valor unitário	Total
ESP32	1	-	47,88
<i>Display I2C 16x2</i>	1	-	27,90
ACS712	3	11,26	33,78
Sensor Hall	1	-	25,00
Placa de Fenolite 10x10	1	-	10,00
resistor 1K <i>Omega</i>	1	-	0,14
resistor 1M Ω	3	0,14	0,42
resistor 22k Ω	3	0,14	0,42
resistor 33k Ω	3	0,14	0,42
Capacitores 100 μF	3	6,75	20,25
capacitor cerâmico 15nF	2	0,10	0,20
capacitor cerâmico 2nF	1	0,10	0,20
Ponte retificadora	3	6,75	20,25
Botão sem trava	1	-	2,97
Frete	-	-	50,00
Total	-	-	R\$ 320,73

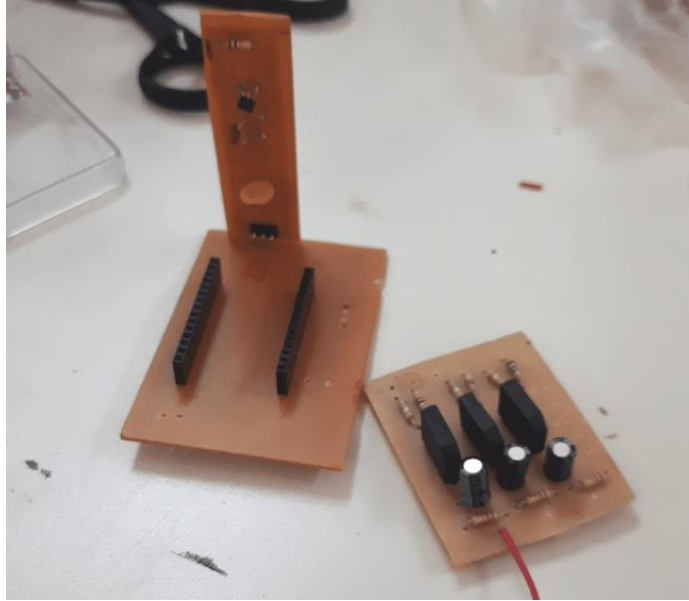
Fonte: Autor, 2023

5.6 Teste em Bancada e Instalação da Placa de Integração no Motor

Foram realizados testes em bancada para verificar se a junção de todos os elementos que compõem o protótipo está em boas condições, antes de ser aplicado no motor em funcionamento. Portanto, antes de proceder com a montagem do multimedidor no MIT, foi feito um teste de integração em bancada, que consistiu na junção das placas desenvolvidas na seção 4.4. Esse teste garantiu a segurança para na fase de montagem final. As placas do protótipo não apresentaram nenhuma irregularidade e são mostradas na Figura 40.

Na PCB de tensão, foram projetados três circuitos, instalados em cada uma das bobinas do motor. No entanto, identificou-se um erro nos circuitos que compartilham o mesmo aterramento, resultando em um curto-circuito. Esse problema impediu a leitura da tensão nas três fases de alimentação do motor. Para solucionar esse inconveniente, seria necessário realizar o aterramento de cada circuito em pontos distintos na placa de cobre. Portanto, para as medições foram realizadas a leitura de tensão apenas de uma bobina do motor.

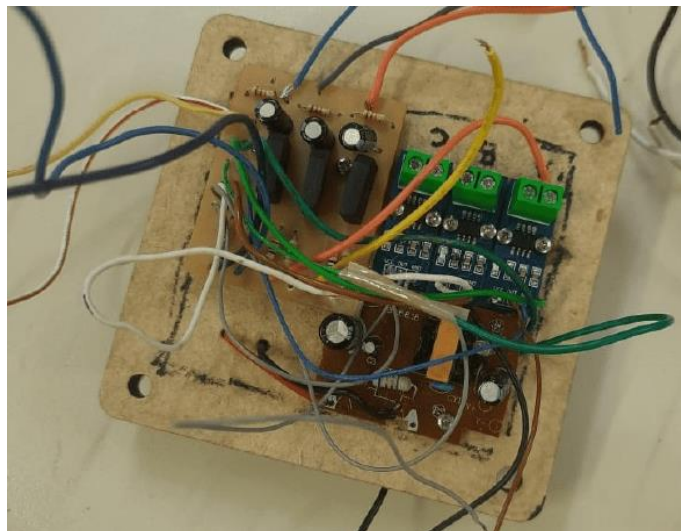
Figura 40: Placa de integração em bancada



Fonte: Autor, 2023

Em seguida, foi realizada a montagem do multimedidor. Na instalação o circuito de potência foi fixado na caixa de instalação do motor. Isso facilitou as conexões do sensor de corrente e do circuito de tensão com as fases. Além de facilitar a alimentação do circuito pela fonte de 5V, que também foi fixado na caixa de instalação do motor.

Figura 41: Circuito de potência na caixa instalação do motor

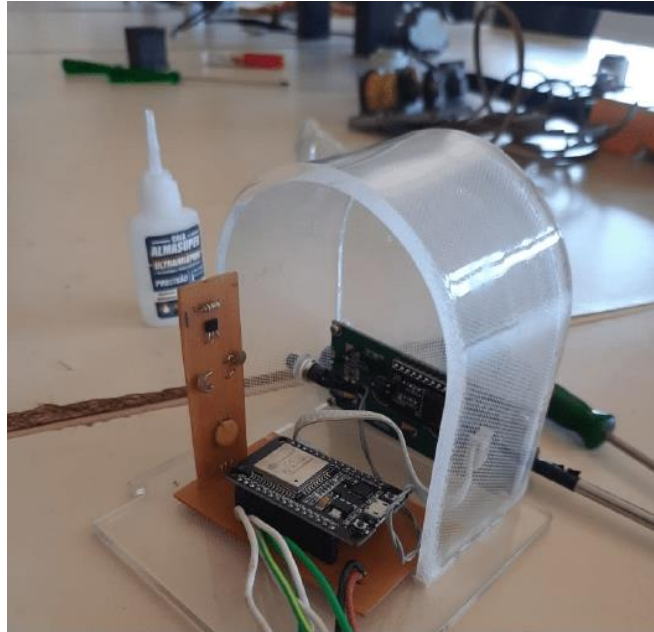


Fonte: Autor, 2023

Como planejado, o circuito de processamento de dados, composto por ESP32, *display* e circuito de condicionamento do sensor Hall, foi instalado em proximidade ao rotor, como mostrado nas Figuras 42 e 43. Essa disposição compacta permitiu que o circuito seja

facilmente aplicado no espaço disponível na bancada didática de motores do IFMG – *Campus Bambuí*.

Figura 42: Circuito de integração instalado próximo ao rotor



Fonte: Autor, 2023

Figura 43: Implantação do circuito na caixa de proteção do rotor

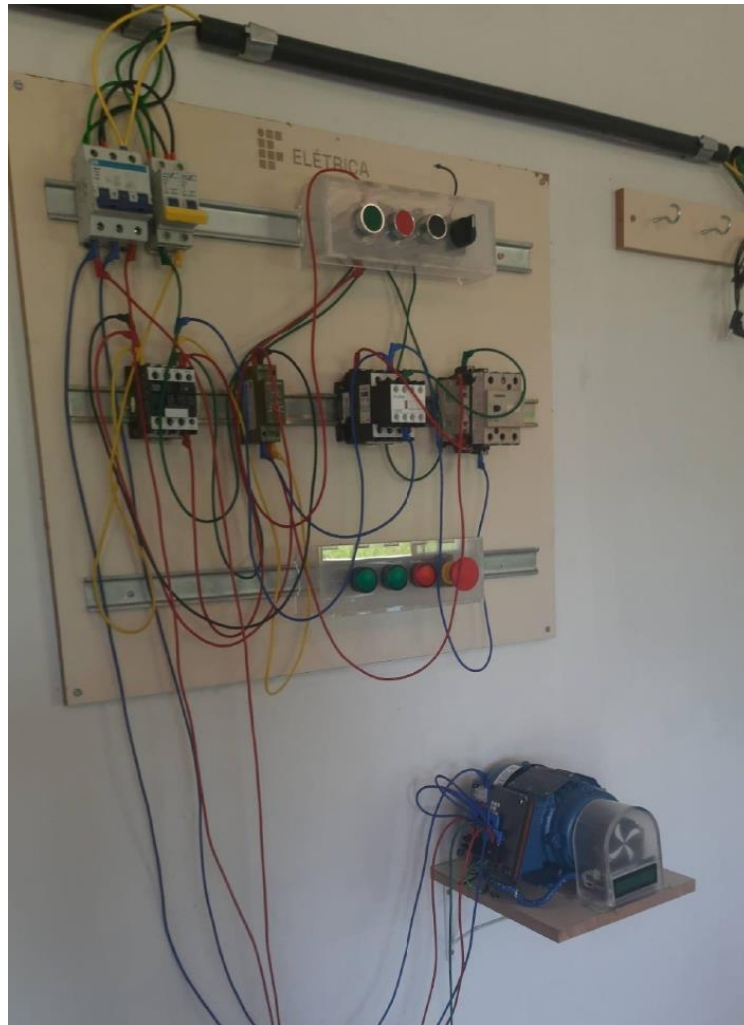


Fonte: Autor, 2023

Por fim, o multimedidor foi instalado no Laboratório de Automação e Controle, na bancada didática, para uso, como pode ser observado na Figura 44. O dispositivo demonstrou ser uma solução acessível e viável e todos os componentes em conjunto responderam bem

quando o motor foi colocado em funcionamento, permitindo as medições e as interação das interfaces de comunicação. A partir disso, foi possível observar que o protótipo construído oferece um bom desempenho, com grande potencial para ser uma opção vantajosa em ambientes educacionais e industriais de pequeno porte. Além disso, tem grande potencial para tornar-se um produto comercial, sendo desejável para várias instituições de ensino e laboratórios, fortalecendo assim, seu impacto e utilidade.

Figura 44: Multimetro instalado na bancada didática do IFMG – *Campus Bambuí*



Fonte: Autor, 2023

5.7 Interfaces de Comunicação e Visualização

Os resultados obtidos com o desenvolvimento das interfaces de comunicação, proporcionaram uma visualização dos parâmetros medidos em tempo real sem a necessidade do usuário utilizar cabos auxiliares, conectados ao multimetro, para receber dados coletados

pelo ESP32. O *display* permitiu a visualização das informações em tempo real e foi fixado na parte frontal do motor, como é apresentado na figura 45.

Figura 45: Tela inicial do multimedidor



Fonte: Autor, 2023

Na interface gráfica, mostrada na Figura 46, os testes foram realizados a partir de valores simulados, em que foi possível apresentar a eficácia da solução.

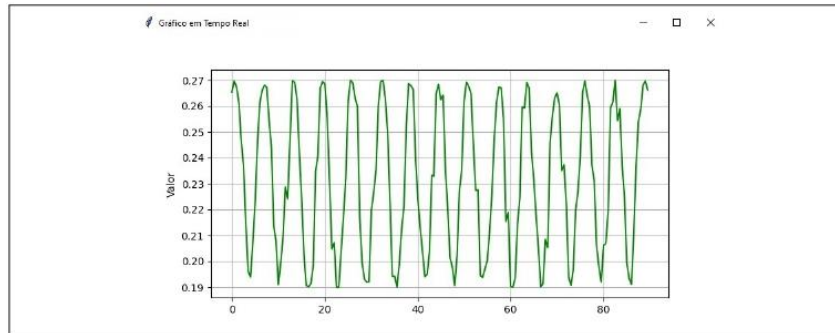
Figura 46: Interface gráfica



Fonte: Autor, 2023

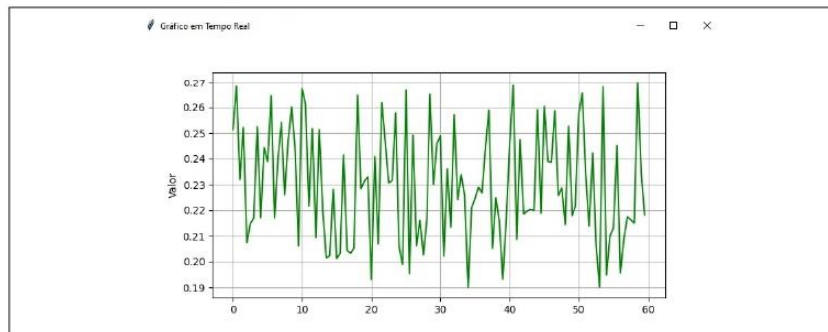
Foram gerados os seguintes gráficos em tempo real:

Figura 47: Gráfico dos valores simulados



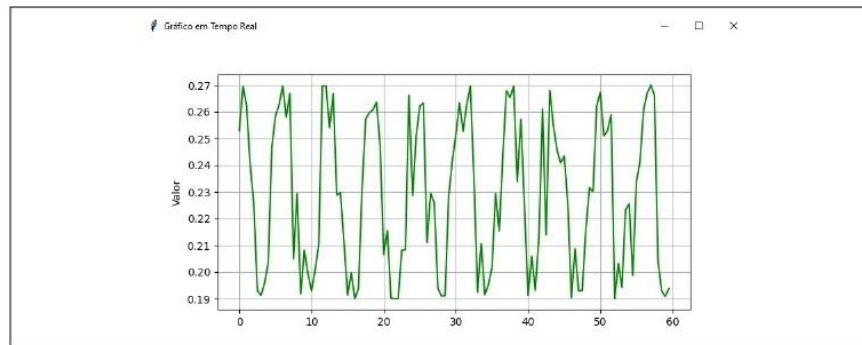
Fonte: Autor, 2023

Figura 48: Gráfico dos valores simulados



Fonte: Autor, 2023

Figura 49: Gráfico dos valores simulados



Fonte: Autor, 2023

Observe que os gráficos se assemelham aos valores gerados de corrente, variando em um intervalo de 0,19 a 0,27. Isso evidencia que a interface é capaz de captar variações no sinal e permite a visualização de ondas com formato senoidal.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo de considerações finais consolida os resultados obtidos através do desenvolvimento do multimetro, destinado ao ensino de motores de indução trifásicos.

Durante o processo de pesquisa e desenvolvimento, o foco principal foi proporcionar uma solução acessível que não comprometesse a qualidade das medições e análises realizadas.

6.1 Trabalhos Futuros

O desenvolvimento do protótipo do dispositivo didático apresenta avanços significativos, mas há diversas oportunidades para aprimorar suas funcionalidades e torná-lo ainda mais completo e versátil.

O aprimoramento do multimedidor didático para motores de indução trifásicos apresenta diversas perspectivas de desenvolvimento que podem enriquecer consideravelmente suas capacidades. Em primeiro lugar, a implementação de circuitos eliminadores de ruídos para melhorar as leituras do sensor de corrente ACS712, na ligação em triângulo, contribuindo diretamente para a melhoria das medições. Outro ponto é o aprimoramento da interface gráfica, para oferecer a oportunidade de proporcionar aos usuários uma experiência cada vez mais dinâmica e eficiente, permitindo monitoramento e interação cada vez mais facilitada para aulas práticas.

Além das medidas convencionais, as funcionalidades do multimedidor podem ser expandidas para incluir medições de potência, a partir dos valores de corrente e tensão já monitorados. Isso possibilitará uma análise mais abrangente do motor, incluindo a leitura do fator de potência ativa e reativa. Essas informações adicionais fornecerão uma compreensão mais completa do comportamento elétrico dos motores trifásicos.

É igualmente valioso realizar estudos no Laboratório de Controle e Automação com o multimedidor, a fim de avaliar a experiência dos alunos no seu uso, além de estender a aplicação e reaplicação do protótipo para ser produzido para todas as bancadas disponíveis no *Campus* Bambuí. Também é de grande importância, a criação de interfaces com a função web server do ESP32.

Outro fator importante para a reaplicação do protótipo é a melhoria da estética das placas de circuito impresso, a fim de melhorar a estética do hardware desse multimedidor. Além disso, é interessante ajustar o aterramento do circuito de tensão para permitir leituras de tensão nas três bobinas do motor.

Por fim, podem ser realizadas simulações em outras condições operacionais, como, por exemplo, simular frenagens. Essa etapa é interessante para verificar seu desempenho em situações práticas como o aumento da corrente elétrica ao se fazer uma frenagem.

7 CONCLUSÃO

Em síntese, o desenvolvimento deste multimedidor de grandezas elétricas, destinado ao ensino de motores de indução trifásicos, representa um avanço significativo na área, proporcionando resultados consistentes a um custo acessível.

Os testes realizados revelaram que o multimedidor oferece leituras precisas de RPM com o sensor Hall, possibilitando uma avaliação acurada do desempenho do motor, principalmente em altas rotações. Além disso, o circuito de tensão demonstrou eficácia ao reduzir tensões elevadas para níveis mensuráveis e processáveis, enquanto a medição de corrente, com o ACS712, permitiu identificar distintas configurações de ligação do motor, seja em estrela ou triângulo. Diante disso, as implementações das interfaces apresentaram potencial para uma melhor compreensão dos parâmetros adquiridos do motor, tanto através de um *display*, quanto por meio da interface gráfica, que recebeu os dados do ESP32 sem atraso de envio, com o uso do protocolo *websocket*, possibilitando o monitoramento de valores recebidos do microcontrolador em gráficos.

Apesar das limitações inerentes a um produto de baixo custo, sua influência impacta diretamente na criação de produtos e kits didáticos acessíveis, o que é notável e relevante. Outra vantagem de destaque do multimedidor desenvolvido é a capacidade de conectividade, que foi estabelecida a partir do microcontrolador ESP32 e permitiu ampliar a capacidade de uso e iteração da ferramenta.

Por meio da combinação de *hardware* e *software*, o multimedidor possibilitou a análise de parâmetros elétricos em tempo real, oferecendo um potencial para enriquecer a experiência prática dos estudantes e proporcionar uma compreensão do funcionamento do motor, em diferentes condições operacionais.

Por fim, percebeu-se que as medições apresentadas pelo multimedidor são importantes para entender como a tensão e a corrente é distribuída e aplicada em diferentes arranjos de ligação do motor trifásico, além de obter também a velocidade do motor. Com essas funcionalidades, a ferramenta permite que aulas experimentais sejam desenvolvidas para exemplificar os conceitos do motor, suas ligações e seu funcionamento.

REFERÊNCIAS

- ADRIROBOT. **OH44E Unipolar Hall Effect Switch IC**. 2023. Disponível em: https://win.adrirobot.it/datasheet/speciali/pdf/OH44E-e_sensore-hall.pdf. Acesso em: 9 mai. 2023.
- AZEVEDO, V. L.; MENDES, L. E. Análise transitória do motor de indução trifásico, p. 1–22, 2008. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/892>. Acesso em: 15 mai. 2023.
- BAZZO. **Introdução à Engenharia: Conceitos, Ferramentas e Comportamentos**. Editora (s.l: s.n.), 2006. Disponível em: https://engeducs.files.wordpress.com/2011/08/introduc3a7c3a3o_a_engenharia_-_walter_antonio_bazzo_-_by_dvdcooper.pdf. Acesso em: 21 mai. 2023.
- BELFORT, D. R. Circuito de Condicionamento de Sinais Analógicos Programável para Sistemas Integrados. por, set. 2007. Universidade Federal do Maranhão. Disponível em: <http://tedebc.ufma.br:8080/jspui/handle/tede/429>. Acesso em: 27 mai. 2023.
- BELLO, E. D. O ensino da eletricidade, desenvolvido através de experiências e elaboração de experimentos construídos com material de baixo custo. **Dia a Dia Educação Cadernos PDE**, v. 1, p. 2–9, 2010. Disponível em: <https://encurtador.com.br/tzIP5>. Acesso em: 1 abr. 2023.
- BOYLESTAD, R. L. **Introdução à análise de circuitos**. 12 ed. Pearson Prentice Hall, 2012. Disponível em: https://www.academia.edu/42323459/Robert_L_Boylestad_12a_EDI%C3%87%C3%83O. Acesso em: 25 mai. 2023.
- CASTRO, R. N. A. d. A teoria da prática: a aula de engenharia, p. 18–20, 2015. Publisher: Getúlio Antero de Deus Júnior. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/ijaeedu/article/view/27114>. Acesso em: 9 abr. 2023.
- DESIDERIO, C. E. C.; VOLANSKI, E. M.; SCHMIELE, J. J. **Implementação de um sistema de monitoramento integrado com microcontrolador para motores e geradores**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/9419>. Acesso em: 20 mai. 2023.
- DONOSO-GARCIA, P. F.; CORTIZO, P. C.; MORAIS, L. M. F. Ensino orientado ao projeto: uma experiência para o ensino de eletrônica nas disciplinas de laboratório de eletrônica e eletrônica de potência. **Eletrônica de Potência**, v. 13, n. 2, p. 109–116, 2008. Disponível em: <https://sobrap.org.br/artigo/ensino-orientado-ao-projeto-uma-experiencia-para-o-ensino-de-eletronica-nas-disciplinas-de-laboratorio-de-eletronica-e-eletronica-de-potencia/>. Acesso em: 15 abr. 2023.
- ELÉTRICA, M. da. **Aprendendo partida estrela triângulo passo a passo**. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/aprendendo-partida-estrela-triangulo-passo-a-passo/>. Acesso em: 21 de abril de 2024. 2024.
- ELETRÔNICA ÔMEGA. **E-Book Internet das Coisas para Iniciantes com ESP-32**. Eletrônica Omega, 2023. Disponível em: <https://blog.arduinoomega.com/ebooks/list-ebooks/index.html>. Acesso em: 24 mai. 2023.

FERREIRA, C. A. **Sistema de monitoramento em motores de indução trifásico utilizando a plataforma Arduino**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/11836>. Acesso em: 24 abr. 2023.

FILIPPO FILHO, G.; AL. *et al.* **Motor de indução: [princípios de funcionamento, características operacionais, aplicações, acionamentos e comandos]**. 2. ed. Tatuapé: Editora Ltda, 2013. Disponível em: Biblioteca do IFMG Campus Bambuí, Ac. 69199. Acesso em: 14 abr. 2023.

FRANGETO, C. F.; ASSIS MOTA, A. de. **Sensor Eletrônico de Tensão Para Medição Inteligente de Energia Elétrica**. 2013. https://www.puc-campinas.edu.br/websist/Rep/Sic08/Resumo/2013820_11258_375706947_resxpa.pdf. Acesso em 25 mai. 2023.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. Coordenado pela Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derad005.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2023.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Redes de Computadores e a Internet - Uma Abordagem Top-Down**. 6. ed.: Editora Pearson, 2013.

LINHARES, M. S. Desenvolvimento de multimedidor eletrônico de energia elétrica, p. 18–25, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/handle/11338/2263>. Acesso em: 21 mai. 2023.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 8. ed. Rio: Editora LTC, 2013. Disponível em: IFMG%20Campus%20Bambu% C3%AD. Acesso em: 14 abr. 2023.

MARINHO, E. C. P. **Aprendizagem significativa no ensino de eletricidade, abordando como alicerce a educação por projetos**. 2018. p. 16–37. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/32829>. Acesso em: 22 abr. 2023.

MATPLOTLIB. **Pyplot tutorial — Matplotlib 3.4.2 documentation**. 2012. Disponível em: <https://matplotlib.org/stable/tutorials/introductory/pyplot.html>. Acesso em: 26 mai. 2023.

MELO, P. M. A. d. S. e. a. **Evolução dos parâmetros de motores de indução trifásicos e sua influência em estratégias de controle**. 2004. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11969/2/Texto20integral.pdf>. Acesso em 27. mai.2023.

MENEZES, N. N. C. **Introdução à programação com Python: algoritmos e lógica de programação para iniciantes**. 2. ed.: Novatec, 2010. Disponível em: https://www.academia.edu/43386855/Introdu%C3%A7%C3%A3o_%C3%A0_Programa%C3%A7%C3%A3o_com_Python_Algoritmos_e_l%C3%B3gica_de_programa%C3%A7%C3%A3o_para_iniciantes_2a_Edi%C3%A7%C3%A3o. Acesso em: 23 mai. 2023.

MICROSYSTEMS, A. **Folha de Dados ACS712**. 2023. Disponível em:

<https://www.allegromicro.com/~media/files/datasheets/acs712-datasheet.ashx>. Acesso em 21 abr. 2023.

MORAIS, J. V. **ESP32 com IDF - O Guia Profissional**. 1°. São Paulo: Instituto NCB, 2023. Disponível em: https://www.newtoncbraga.com.br/arquivos/incb_esp32_idf.pdf. Acesso em: 20 mai. 2023.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J. **Engineering Design: A Systematic Approach**. 3°, 2007. Disponível em: https://www.academia.edu/22269444/Engineering_Design_Springer_2007_1846283183. Acesso em: 27 mai. 2023.

PATSKO, L. F. **Aplicações, funcionamento e utilização de sensores**. 2006. Publicação Title: Maxwell Bohr: Instrumentação eletrônica. Disponível em: <https://encurtador.com.br/otKNZ>. Acesso em: 15 mai. 2023.

PEKELMAN, H.; MELLO-JR, A. A importância dos laboratórios no ensino de engenharia mecânica. In: ANAIS do XXXII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia—COBENGE. Brasília, 2004. Disponível em: http://www.abenge.org.br/cobenge/legado/arquivos/15/artigos/01_219.pdf. Acesso em: 19 abr. 2023.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **tkinter — Python interface to Tcl/Tk — Python 3.7.2 documentation**. 2012. Disponível em: <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html>. Acesso em: 25 mai. 2023.

RUPPEL, E. C.; VIANA, W. L. d. S. **Análise de viabilidade técnica da substituição de encoders incrementais ópticos por transdutores de efeito hall**. 2013. B.S. thesis — Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8292>. Acesso em: 25 mai. 2023.

SADIKU, M. N.; ALEXANDER, C. K.; MUSA, S. **Análise de circuitos elétricos com aplicações**. AMGH Editora, 2014. Acesso em 10/03/2024. Disponível em: https://www.academia.edu/39796440/Analise_de_Circuitos_Eletricos_com_Aplicacoes_1_

SCHWINGEL, E. S. **Técnicas para medição de corrente elétrica de um indutor em circuitos integrados**. 2022. <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/23777>. Acesso em 20 mai. 2023.

STEFFEN, G. L. Desenvolvimento de um analisador de parâmetros elétricos e mecânicos de baixo custo aplicado à motores de indução trifásicos. **Desenvolvimento de um analisador de parâmetros elétricos e mecânicos de baixo custo aplicado a motores de indução trifásicos.**, p. 7–100, 2023. Publisher: Brasil. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/27987>. Acesso em: 14 abr. 2023.

SUHANKO, D. **Primeiros passos com ESP32 e algumas IDEs**. 2023. Disponível em: <https://www.dobitaobyte.com.br/primeiros-passos-com-esp32/>. Acesso em: 24 mai. 2023.

SYSTEMS, E. **ESP32-WROOM-32: datasheet**. 2023. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 21 mai. 2023.

TEIXEIRA, H. T. **Instrumentação Eletroeletrônica**. Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017. p. 216. Disponível em: <https://encurtador.com.br/fgpR6>. Acesso em 20 abr 2023.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. d. **Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações**. 9°. São Paulo: Saraiva Educação SA, 2020. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=1qgPEAAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 14 mai. 2023.

VERISSIMO, M. L. Estudo teórico e prático de equipamentos de medição de energia elétrica e de um motor de indução trifásico. **Estudo teórico e prático de equipamentos de medição de energia elétrica e de um motor de indução trifásico**, p. 15–79, 2019. Publisher: Universidade Federal do Tocantins. Disponível em: <http://umbu.uft.edu.br/handle/11612/3935>. Acesso em: 17 abr. 2023.

WAZLAWICK, R. S. **Metodologia de pesquisa para ciência da Computação**. 6ª reimpressão. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. Disponível em: https://tsxvpsbr.dyndns.org/arquivos/UFFS/Metodologia%20De%20Pesquisa%20CienciaDaComputacao%20_%20TCC1.pdf. Acesso em: 10 mai. 2023.

WEG. **Guia de Especificação de Motores Elétricos**. [S1], 2023. Disponível em: <https://static2.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em 22.abr. 2023.

APÊNDICE

MANUAL DE INSTRUÇÕES DO MULTIMEDIDOR

A.1 INTRODUÇÃO

O multimedidor é um dispositivo que realiza a análise e o monitoramento, em tempo real, de diversos parâmetros do motor de indução trifásico. O objetivo deste manual é oferecer as informações necessárias para utilizar o multimedidor de forma eficaz e segura.

A.2 VISÃO GERAL

O dispositivo é capaz de medir a corrente nas três fases, tensão de alimentação da bobina "U" do motor e RPM (rotações por minuto). Além disso, permite visualizar os parâmetros por meio do *display* e botão localizados no dispositivo, bem como gráficos em tempo real, por meio da interface.

A.3 CONFIGURAÇÃO INICIAL

Para iniciar as medições, basta seguir este esquema:

- Ligar motor em estrela ou triângulo de maneira correta.
- Para ligar o circuito do multimedidor, alimente-o diretamente no disjuntor conectado às fases da rede elétrica, mas lembre-se de desligar o disjuntor para garantir sua segurança.
- Ligar o disjuntor da bancada didática somente se tudo foi ligado da maneira correta.
- Com motor e multimedidor ligados na rede elétrica, visualizar a tela inicial no *display*.
- Apertar o botão para visualizar as informações que estão sendo medidas.
- Para visualizar os gráficos, basta utilizar um computador com acesso ao WiFi, especificamente, na rede do laboratório e abrir o executável da interface.
- Para desligar o multimedidor, basta desligar o disjuntor.

A.4 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Para interpretar os dados e medições exibidos no multimedidor, é necessário analisar ambas as ligações. Em uma ligação em estrela, os valores medidos tendem a ser mais baixos em comparação a uma ligação em triângulo, devido à menor corrente aplicada ao motor. Além disso, independentemente da configuração de ligação, o multimedidor pode exibir uma estabilidade na velocidade do motor, indicando um funcionamento consistente em diferentes condições de carga.

Pela interface gráfica do multimedidor, é possível observar ondas senoidais, que representam a forma de onda da corrente e da tensão aplicadas ao motor. Essas formas de onda são essenciais para compreender o comportamento do motor e identificar possíveis problemas de funcionamento.

A.5 MANUTENÇÃO E CUIDADOS

- Sempre realizar manutenções no multimedidor com o disjuntor desligado, para evitar riscos elétricos.
- Ao descarregar código no ESP32, certifique-se de que o multimedidor esteja desligado, pois há risco de danificar o notebook, caso ocorra curto.
- Tenha cuidado para não arrastar a caixa de proteção do multimedidor, evitando que o circuito seja danificado pelo rotor do motor.
- Sempre que for utilizar o dispositivo, pedir ajuda de alguém que entenda de elétrica, para não causar danos ao dispositivo.