

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL
ENGENHARIA ELÉTRICA

Gustavo Lenhardt Steffen

**DESENVOLVIMENTO DE UM ANALISADOR DE PARÂMETROS ELÉTRICOS E
MECÂNICOS DE BAIXO CUSTO APLICADO À MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS**

Cachoeira do Sul, RS

2023

Gustavo Lenhardt Steffen

**DESENVOLVIMENTO DE UM ANALISADOR DE PARÂMETROS ELÉTRICOS E
MECÂNICOS DE BAIXO CUSTO APLICADO À MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso
de Graduação apresentado ao Curso de
Engenharia Elétrica, da Universidade Federal
de Santa Maria no Campus de Cachoeira do
Sul, como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Nelson Knak Neto

Cachoeira do Sul, RS
2023

Gustavo Lenhardt Steffen

**DESENVOLVIMENTO DE UM ANALISADOR DE PARÂMETROS ELÉTRICOS E
MECÂNICOS DE BAIXO CUSTO APLICADO À MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso
de Graduação apresentado ao Curso de
Engenharia Elétrica, da Universidade Federal
de Santa Maria no Campus de Cachoeira do
Sul, como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 02 de fevereiro de 2023.

Nelson Knak Neto, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Diogo Vargas, Dr. (UFSM)

Paulo César Vargas Luz, Dr. (UFSM)

Cachoeira do Sul, RS
2023

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho ao meu pai Francisco, minha mãe Loreci
e minha vó Erica, que está me cuidando de onde estiver.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Nelson, por todo apoio e suporte oferecidos, não medindo esforços para a conclusão desse trabalho.

Agradeço também aos amigos que fiz durante a graduação, em especial aos meus colegas de casa, Arthur e César, mas também aos demais companheiros, Murilo, Marcelo, Dellazari e Nachau, que se fizeram presentes durante todo o trabalho. Sem vocês, eu não teria conseguido. Foi uma honra estudar com vocês.

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE UM ANALISADOR DE PARÂMETROS ELÉTRICOS E MECÂNICOS DE BAIXO CUSTO APLICADO À MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

AUTOR: Gustavo Lenhardt Steffen
ORIENTADOR: Dr Nelson Knak Neto

Os motores elétricos ocupam posição de destaque no ranking das principais invenções que mudaram a forma como o ser humano vive. Para atingir seu objetivo, de transformar a energia elétrica em energia mecânica, a grande maioria dos motores elétricos se utiliza de dois campos magnéticos: do estator e do rotor. Somente através da interação entre esses campos, se torna possível o movimento do seu eixo e assim se sucede a transformação da energia. Neste contexto, é imprescindível a realização da medição de parâmetros, tanto elétricos como mecânicos dos motores, buscando seu ponto de máxima eficiência. Desta forma, o presente trabalho busca desenvolver um analisador de parâmetros elétricos e mecânicos de baixo custo para um motor de indução trifásico, onde através da medição de sensores e de dados fornecidos pelo usuário, é possível verificar o valor de grandezas tanto elétricas como mecânicas em tempo real. Para alcançar o objetivo proposto, foram utilizados sensores para medição de corrente, tensão e velocidade. Para corrente, utilizou-se o sensor SCT-013-020 acoplado a um circuito condicionador de sinal. Já para a aferição de tensão optou-se por um circuito a base do transformador ZMPT101b, e para a medição de velocidade elegeu-se o módulo *encoder* acoplador ótico para esta tarefa. Durante o desenvolvimento, foram realizados diversos testes com os sensores selecionados de forma a validar o seu funcionamento em conjunto com o ESP32 e o auxílio da ferramenta monitor serial. Em paralelo, foram obtidos via ensaio os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico de 0,16 de CV e tensão de alimentação 380/220 V. Posteriormente, desenvolveu-se o software gráfico do trabalho, onde os dados são apresentados. O software foi desenvolvido na linguagem de programação Python. Ao final, reuniu-se todas as etapas anteriores de forma a construir o protótipo final, com a inclusão dos sensores com o ESP32 e a comunicação do mesmo com o software desenvolvido via comunicação serial. De forma a validar as medidas elétrica realizadas, comparou-se seus valores com medidas realizadas com um analisador de energia IMS PQ600. Nesta comparação, os valores de tensão e corrente apresentaram bons valores de exatidão: as medidas de tensão tiveram erro percentual relativo médio abaixo de 1,5%, e as de corrente abaixo de 4%. A medida mecânica de valor de velocidade foi comparada com um tacômetro digital, apresentando um erro relativo percentual médio de apenas 0,25%, sendo um ótimo resultado. Embora as medidas de conjugado e rendimento não tivessem equipamentos adequados de modo a realizar-se uma comparação, seus valores respeitam as curvas fornecidas pelo fabricante do motor, indicando resultados plausíveis. Assim, com o desenvolvimento do analisador proposto, torna-se possível mensurar em tempo real grandezas pertinentes do motor de indução trifásico, podendo os parâmetros serem visualizados em uma interface simples e amigável.

Palavras-chave: Motor de Indução Trifásico. ESP32. PYTHON.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A LOW COST ANALYZER OF ELECTRICAL AND MECHANICAL PARAMETERS APPLIED TO THREE-PHASE INDUCTION MOTORS

AUTHOR: Gustavo Lenhardt Steffen
ADVISOR: Dr Nelson Knak Neto

Electric motors occupy a prominent position in the ranking of the main inventions that have changed the way human beings live. To achieve its goal of transforming electrical energy into mechanical energy, most electric motors use two magnetic fields: the stator and the rotor. Only through the interaction between these fields does the movement of its shaft become possible, and thus the transformation of energy takes place. In this context, it is essential to measure the parameters, both electrical and mechanical, of the motors, seeking their point of maximum efficiency. Thus, the present work seeks to develop a low-cost electric and mechanical parameter analyzer for a three-phase induction motor, where through the measurement of sensors and data provided by the user, it is possible to verify the value of both electrical and mechanical magnitudes in real time. To achieve the proposed objective, sensors were used to measure current, voltage and speed. For current, the SCT-013-020 sensor coupled to a signal conditioning circuit was used. For voltage measurement a ZMPT101b transformer-based circuit was chosen, and for speed measurement an optically coupled encoder module was chosen for this task. During development, several tests were performed with the selected sensors in order to validate their operation in conjunction with the ESP32 and the aid of the serial monitor tool. In parallel, the parameters of the equivalent circuit of the three-phase induction motor of 0.16 HP and 380/220 V supply voltage were obtained via testing. Subsequently, the graphic software of the work was developed, where the data is presented. The software was developed in the Python programming language. At the end, all the previous steps were put together to build the final prototype, with the inclusion of the sensors with the ESP32 and its communication with the developed software via serial communication. In order to validate the electrical measurements made, their values were compared with measurements made with an IMS PQ600 power analyzer. In this comparison, the voltage and current values presented good accuracy values: the voltage measurements had an average relative percentage error below 1.5%, and the current measurements below 4%. The mechanical measurement of the speed value was compared to a digital tachometer, showing an average relative error percentage of only 0.25%, which is a very good result. Although the torque and efficiency measurements did not have adequate equipment in order to perform a comparison, their values respect the curves provided by the motor manufacturer, indicating plausible results. Thus, with the development of the proposed analyzer, it becomes possible to measure in real time relevant magnitudes of the three-phase induction motor, and the parameters can be viewed in a simple and friendly interface.

Keywords: Three-Phase Induction Motor. ESP32. PYTHON.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.2	Objetivo	11
1.2.1	GERAL	11
1.2.2	ESPECÍFICOS	12
1.3	Delimitações do trabalho.....	12
1.4	Contribuições do Trabalho.....	12
1.5	Estrutura do trabalho	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1	MÁQUINA DE CORRENTE ALTERNADA	14
2.1.1	Princípio de funcionamento de uma máquina de indução trifásica	15
2.1.2	Círcuito equivalente motor trifásico	20
2.2	POTÊNCIA, FATOR DE POTÊNCIA E RENDIMENTO	23
2.3	TORQUE DE UM MOTOR TRIFÁSICO	27
2.3.1	Classes de torque	30
2.4	CONEXÕES DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	31
2.5	ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS	33
2.5.1	Ensaio CC para resistência do estator	33
2.5.2	Ensaio de rotor bloqueado	34
2.5.3	Ensaio a vazio.....	37
2.6	ESP32	41
2.7	SENSORES PARA MEDIÇÃO DE VELOCIDADE, CORRENTE E TENSÃO ..	45
2.7.1	Sensor de velocidade.....	45
2.7.2	Sensor de corrente	48
2.7.3	Sensor de tensão	50
2.8	PYTHON	51
2.9	PESQUISAS CORRELATAS	53
2.10	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO.....	56
3	METODOLOGIA	58
3.1	DESCRIÇÃO DA ETAPA UM	59
3.2	DESCRIÇÃO DA ETAPA DOIS.....	60
3.3	DESCRIÇÃO DA ETAPA TRÊS	60
3.4	DESCRIÇÃO DA ETAPA QUATRO	61

3.5 DESCRIÇÃO DA ETAPA CINCO	61
3.6 DESCRIÇÃO DA ETAPA SEIS	62
4 DESENVOLVIMENTO	64
4.1 ETAPA UM	64
4.1.1 Sensor de Tensão	64
4.1.2 Sensor de Corrente	68
4.1.3 Sensor de Velocidade	70
4.2 ETAPA DOIS	71
4.3 ETAPA TRÊS	75
4.4 ETAPA QUATRO	77
4.5 ETAPA CINCO	80
5.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO	84
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
6.1 ENSAIOS ELÉTRICOS	85
6.2 ENSAIOS MECÂNICOS	94
6.3 CUSTO-BENEFÍCIO DO ANALISADOR	97
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
7.1 TRABALHOS FUTUROS	100
REFERÊNCIAS	101
APÊNDICE A – Determinação dos parâmetros do circuito equivalente	105
ANEXO A – Folha de dados do motor analisado	112

1 INTRODUÇÃO

O motor elétrico tornou-se uma das invenções mais notáveis da humanidade. A partir da sua construção e aprimoramento, uma série de tarefas, antes complexas, foram simplificadas, desde domésticas, até industriais. O motor elétrico é o último elemento de uma cadeia de equipamentos elétricos que se inicia na geração de energia elétrica, passa pela transmissão e distribuição até chegar a sua utilização final no consumidor (SHINDO, 2003).

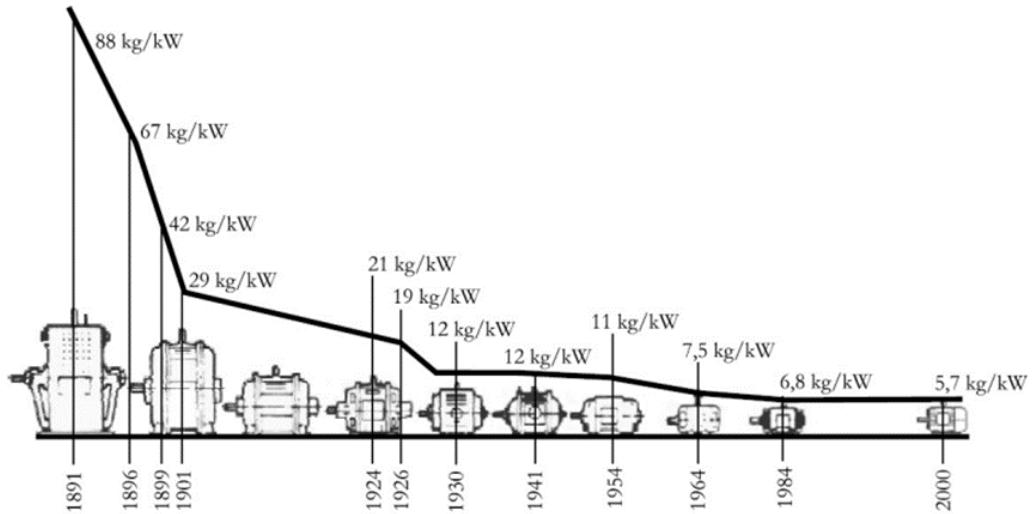
Os motores elétricos são responsáveis por transformar a energia elétrica que chega até os seus terminais em energia mecânica, disponível para realizar trabalho no seu eixo. Dessa forma, eles tornam possíveis o funcionamento de diversos equipamentos, sejam domésticos, como geladeiras, liquidificadores e máquinas de lavar roupa, ou industriais, como compressores de ar, bombas e misturadores.

Um fato que demonstra a importância dos motores elétricos é a estimativa de que no Brasil mais de 20 milhões de motores elétricos trifásicos estão em uso, com consumo aproximado de 144 GWh por ano, o correspondente a aproximadamente 24,5% da produção nacional de eletricidade (ENERGIA, 2020). O motor de indução trifásico é o tipo dominante no mercado de motor elétrico, e participa com mais de 97% das unidades vendidas anualmente (SHINDO, 2003).

A predominância dos motores de indução trifásicos é justificada devido as suas vantagens, como sua simplicidade, robustez e baixo custo, aliado ao controle de velocidade via inversor de frequência, o que o torna adequado para a maioria das aplicações industriais.

O avanço tecnológico e aperfeiçoamento dos materiais utilizados na fabricação de motores, tornou possível também um aumento da potência dos motores ao comparar-se o seu peso. Se em 1891 um motor possuía em média 88 quilos por quilowatt de potência, em 2000 esse valor foi reduzido a apenas 6,5% dessa medida, dessa forma, pode-se encontrar motores que possuem apenas 5,7 quilos por quilowatt, conforme ilustrado na Figura 1. O maior avanço tecnológico nesse sentido se deve ao desenvolvimento dos isolantes elétricos. A isolação dos fios com seda natural ou artificial reduziu em cerca de 60% o espaço ocupado pelos condutores. Os vernizes de impregnação eram à base de resinas naturais, óleos e solventes, com capacidade térmica máxima de 90 °C (SENS, 2001).

Figura 1 - Evolução da relação Peso X Potência dos motores de indução



Fonte: WEG em Revista (2005).

Outra característica importante dessa máquina é o seu rendimento: com a modernização dos componentes e métodos de produção de motores, é notável o aumento de rendimento dos motores de indução, conforme apresentado na Figura 2, o que demonstra outra vantagem dessa máquina.

Figura 2 – Evolução do rendimento dos motores de indução

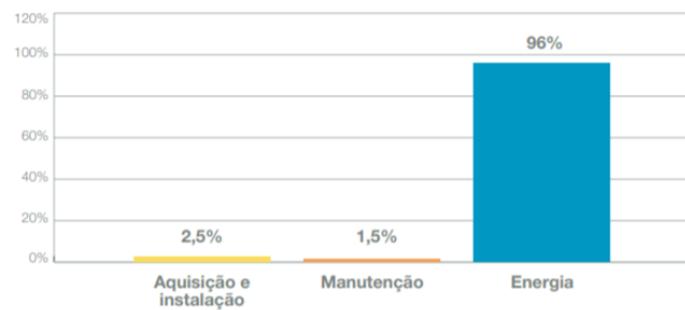


Fonte: Motores elétricos WEG (2015).

A busca pela otimização no emprego de motores de indução trifásico para que operem em suas características ideias se ampara no fato de que os motores são os equipamentos responsáveis pela maior parcela do consumo de energia elétrica nas

indústrias. Em estudo publicado pela Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro, em 2017, a energia elétrica era um produto fundamental e estratégico utilizado por 79% das empresas nacionais (FIRJAN, 2017). Dados do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) indicam que 96% dos custos de um motor elétrico após 10 anos de uso correspondem à eletricidade (Figura 3), dessa forma, deve-se prezar pelo correto dimensionamento e garantir as condições adequadas de alimentação do motor a fim de que ele opere com seu rendimento máximo.

Figura 3 – Gastos de um motor de indução trifásico em 10 anos



Fonte: PROCEL (2016).

Embora o valor de rendimento máximo das máquinas de indução trifásicas tenha sofrido relevante aumento com o passar dos anos, o seu valor em uma máquina em regime de trabalho sofre diversas influências, sendo o superdimensionamento o mais comum (SILVA, 2012). Nessa condição, o motor possui potência nominal excessivamente maior que a potência requerida pela carga, dessa forma, as perdas se tornam consideráveis e o rendimento da máquina é diretamente afetado, acarretando-se um valor inferior ao desejado.

Outro fator pertinente, que tem influência negativa sobre o funcionamento desse tipo de máquina é a má qualidade da energia fornecida ao mesmo, principalmente, se tratando de ambientes industriais, onde há forte presença de componentes harmônicas e desequilíbrios de tensão. As componentes harmônicas surgem através de cargas não lineares, em equipamentos que não possuem mecanismos internos que compensem a distorção na forma de onda de corrente, afetando assim a forma de onda da tensão. Além disso, o principal responsável pelos desequilíbrios de tensão são as incorretas divisões de carga, sobrecarregando muitas vezes uma das fases.

Uma vez que os motores apresentam essa variação de rendimento com relação a carga acoplada ao seu eixo e a qualidade da energia fornecida ao mesmo, se torna relevante o estudo do comportamento do rendimento de uma máquina em diferentes regimes de operação, sendo o foco do trabalho, realizar análises em tempo real de parâmetros do motor em regime permanente a fim de se determinar grandezas simultaneamente, observando-se o comportamento do motor em diferentes situações. Dessa forma pode-se otimizar o seu uso, tornando-o mais eficiente. Nesse contexto, se torna pertinente ao trabalho também a medição em tempo real das grandezas de corrente e tensão, a fim de verificar possíveis distúrbios e prever soluções, de modo que o motor de indução opere em suas condições ideais. Além dos problemas apresentados, bem como demais problemas, tanto elétricos como mecânicos, podem provocar significativas alterações de funcionamento dos motores, afetando diretamente variáveis como: fator de potência, torque, rendimento e potência disponível para a carga.

O analisador proposto se torna atrativo ao analisar-se o mercado de medidores de grandezas tanto elétricas quanto mecânicas atualmente. Na grande maioria dos casos, as opções fornecidas pelos fabricantes se restringem somente a medição de determinados parâmetros, como por exemplo, corrente e tensão através de um multímetro, ou velocidade através de um tacômetro, não sendo disponibilizados no mercado equipamentos que reúnem a medição de ambos os parâmetros, a fim de se realizar uma análise mais precisa do funcionamento da máquina. Outro fator limitante dos medidores encontrados comercialmente é o seu elevado custo, tornando seu uso restrito, dificultando o acesso a empresas pequenas e médias.

Assim, o trabalho é direcionado com o propósito de realizar o levantamento de parâmetros do circuito equivalente de um motor de indução trifásico, realizando-se todos os ensaios necessários para determinação do mesmo. Unindo-se os parâmetros determinados via ensaio, com medições em tempo real de corrente, tensão e velocidade do motor, com auxílio da placa de prototipagem eletrônica ESP32, busca-se demonstrar graficamente em tempo real, através de um programa desenvolvido na linguagem de programação Python, diversos valores pertinentes do motor de indução trifásico em estudo, para que seja possível analisar seu funcionamento em diferentes condições, tanto de carga, quanto de fornecimento de energia. A Figura 4 demonstra os parâmetros e valores obtidos simplificados do trabalho.

Figura 4 – Variáveis do medidor proposto



Fonte: O AUTOR (2022).

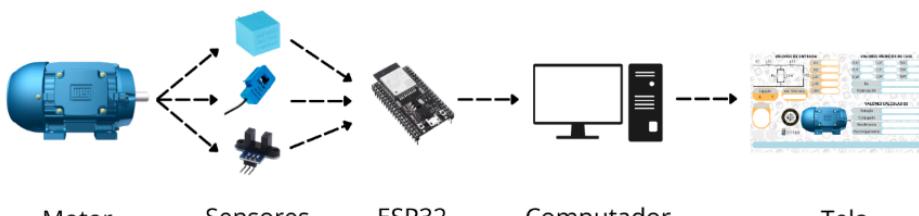
Assim, através do monitoramento das variáveis acerca do motor de indução trifásico, acompanhando em tempo real, parâmetros pertinentes ao seu funcionamento, desenvolve-se o passo inicial para que se obtenha o ponto de melhor rendimento para motores de indução trifásicos para a aplicação de interesse.

1.2 Objetivo

1.2.1 GERAL

O objetivo geral do trabalho é desenvolver um analisador de parâmetros de motores de indução trifásicos de até 3 CV de baixo custo associado à ferramenta gráfica para visualização de parâmetros do motor de indução, conforme demonstra a Figura 5.

Figura 5 – Objetivo do trabalho



Fonte: O AUTOR (2022).

1.2.2 ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Determinar o circuito equivalente por fase do motor de indução trifásico a partir dos ensaios de tensão CC para resistência do estator, ensaio de rotor bloqueado e ensaio a vazio;
- Medir os valores de corrente, tensão, e velocidade de um motor de indução trifásico;
- Determinar de forma matemática, através dos valores obtidos via ensaio e valores medidos grandezas pertinentes ao motor de indução, como escorregamento, rendimento, potência ativa, fator de potência e torque;
- Disponibilizar os valores obtidos para consulta pelo usuário, através de conexão via serial com um computador onde os valores serão exibidos em uma ferramenta gráfica de simples visualização.

1.3 Delimitações do trabalho

A fim de estabelecer fronteiras ao trabalho, serão listadas as principais restrições do trabalho proposto.

- Motor utilizado: Motor de Indução Trifásico com rotor gaiola de esquilo de seis terminais;
- Tensão máxima de alimentação do motor entre fase e neutro: 311 Vpp;
- Corrente máxima suportada: 20 A;
- A obtenção dos valores de torque e rendimento é realizada de maneira indireta.

1.4 Contribuições do Trabalho

Através do trabalho desenvolvido, busca-se conciliar o conceito de medição de variáveis mecânicas e variáveis elétricas, visualizando em uma única ferramenta a influência que a alteração de uma variável elétrica, a tensão por exemplo, pode causar em uma variável mecânica, como a velocidade. Dessa maneira, é possível realizar

uma análise mais precisa e criteriosa a respeito do motor de indução, explorando sua faixa de operação afim de determinar se o mesmo opera em suas condições ideais para obter máxima eficiência. Tendo em vista o relevante consumo de energia elétrica advindo de motores de indução trifásicos, o trabalho se mostra promissor no âmbito a se tornar uma ferramenta auxiliar a profissionais, de modo a investigar as características de operação do motor de indução trifásico.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho possui seis capítulos. O primeiro capítulo é dedicado a introdução do tema, destacando a importância dos motores de indução trifásicos atualmente. Além disso são elencados os objetivos do trabalho, bem como as limitações e contribuições do mesmo.

O segundo capítulo é destinado a apresentar os principais conceitos referentes ao motor de indução trifásico, explorando seu funcionamento, circuito equivalente e grandezas pertinentes. Além disso, são apresentados conceitos dos sensores utilizados bem como do *software* e do *hardware* utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

O terceiro capítulo é designado a apresentar a metodologia adotada para a confecção do analisador proposto.

No quarto capítulo é apresentado o desenvolvimento das etapas da metodologia, o passo a passo para a implementação do protótipo final. São apresentados os circuitos utilizados, os esquemas de ligação e os testes de validação realizados.

Os resultados do trabalho desenvolvido são apresentados no quinto capítulo, onde valores medidos e calculados através do analisador desenvolvido são comparados a valores medidos por equipamentos comerciais de modo a se verificar a exatidão do aparelho desenvolvido bem como visualizar possíveis melhorias.

Por fim, o sexto capítulo é dedicado a apresentar as conclusões e a sugestão para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para atingir os objetivos do trabalho, que busca determinar parâmetros de um motor de indução trifásico bem como demonstrar de maneira visual em tempo real os principais parâmetros do motor, é necessária uma base sólida a respeito de máquinas de corrente alternada, além de estabelecer bases sobre o ESP32 e a linguagem de programação Python. Dessa forma, os tópicos subsequentes buscam trazer esta sustentação.

2.1 MÁQUINA DE CORRENTE ALTERNADA

São encontradas duas classes principais de máquinas de Corrente Alternada (CA): máquinas síncronas e máquinas assíncronas, também conhecidas como máquinas de indução. As máquinas síncronas são motores e geradores cuja corrente de campo magnético é fornecida por uma fonte de potência de Corrente Contínua (CC) separada, ao passo que as máquinas de indução são motores e geradores cuja corrente de campo é fornecida por indução magnética (ação de transformador) em seus enrolamentos de campo (CHAPMAN, 2013).

Quanto ao modo de operação de máquinas de indução, embora seja possível usá-las como motor ou como gerador, ela apresenta muitas desvantagens como gerador e, por isso, ela é usada como gerador somente em aplicações especiais (CHAPMAN, 2013). Por essa razão, as máquinas de indução são usualmente referidas como motores de indução.

O largo emprego de motores de indução, se justifica pela sua robustez (não existem partes que se desgastam facilmente, tais como comutador e escova), pelo seu baixo custo, pouca necessidade de manutenção e possibilidade de emprego em praticamente qualquer aplicação, incluindo ambientes hostis, ambientes explosivos, ambientes com poeiras, aplicações navais, etc.(BORGES, 2016). Onde quer que haja progresso, a presença do motor elétrico é imprescindível e isso é notável quando de acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022, o principal setor responsável pelo consumo de energia elétrica no Brasil é o industrial, correspondendo a 36,3% do consumo de energia elétrica no Brasil no ano de 2021, em que o principal consumo de energia referente as indústrias são advindas da utilização de motores

elétricos. Desempenhando um importante papel para a sociedade, os motores são o coração das máquinas modernas (ELÉTRICOS, 2015).

Desta forma, a máquina de indução se tornou uma *commodity* cujo custo é muito reduzido quando comparado com outros tipos de motores, justificando assim a sua utilização tão intensiva nos acionamentos em geral, principalmente industriais.

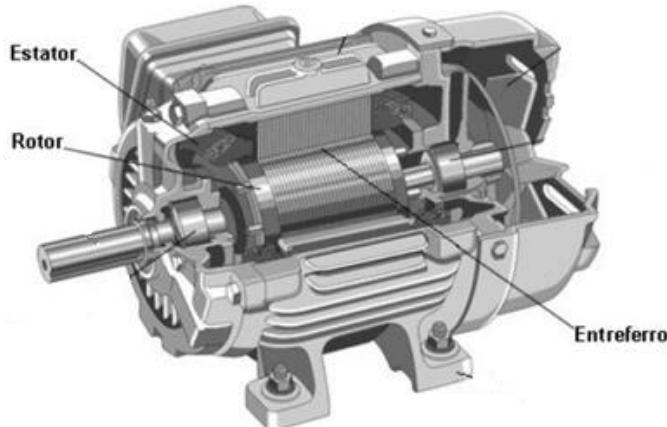
O funcionamento dos motores elétricos de indução trifásicos depende de diversos valores, como a situação da carga do motor, a tensão constante de alimentação da carga, a velocidade em que ele precisa funcionar, a corrente elétrica disponibilizada pela rede, a potência que o motor tem e o seu rendimento (ELETROVAL, 2018) que são parâmetros que serão explorados nos tópicos subsequentes, com especial foco ao motor de indução trifásico, embora possam ser encontrados também motores de indução monofásicos.

2.1.1 Princípio de funcionamento de uma máquina de indução trifásica

O princípio de funcionamento do Motor elétrico de Indução Trifásico (MIT) é o mesmo de todos os motores elétricos, ou seja, baseia-se na interação do fluxo magnético com uma corrente em um condutor, resultando numa força no condutor (CASTRO, 2015).

O MIT é, construtivamente, composto por dois elementos básicos: o estator e o rotor. O estator representa o elemento fixo e, portanto, imóvel em relação à estrutura da máquina. O rotor representa a parte móvel. Entre o estator e o rotor existe o entreferro (também conhecido como *air gap*) que é o termo utilizado, para denominar o vão existente, preenchido com ar, entre o estator e o rotor, de modo que os dois não se toquem. Na construção de motores de indução, deseja-se que o entreferro tenha o menor valor possível, visto que com o aumento do entreferro é necessária a criação de um campo magnético mais intenso, para se induzir a mesma potência no rotor. Estão expostos os principais componentes do MIT na Figura 6.

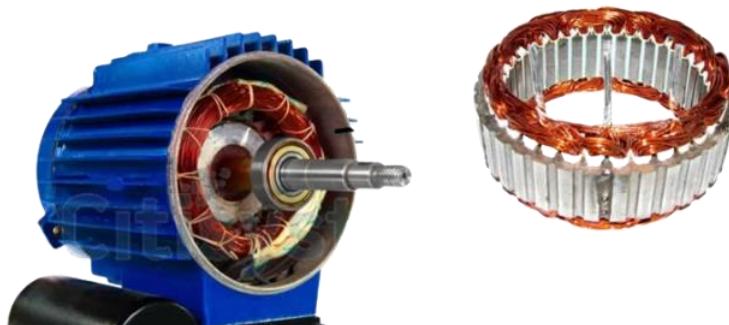
Figura 6 - Principais componentes do MIT



Fonte: Roberto (2018).

O estator é construído com lâminas de aço de boa permeabilidade magnética e condutores de cobre ou alumínio. Por meio do empilhamento de chapas forma-se o pacote do estator. Os condutores, por sua vez, representam o enrolamento ou a bobinagem. A isolação e as características construtivas das bobinas dependem da tensão de alimentação e do tamanho do estator. Em estatores de pequeno porte alimentados em baixa tensão é frequente o uso de bobinas randômicas de fios circulares (RUVIARO, 2011). O termo randômico se refere ao modo de como as espiras estão dispostas perante a bobina, em princípio qualquer espira circular poderia estar disposta randomicamente a qualquer outra espira da bobina (VEIGA, 2011). A Figura 7 detalha o estator de um MIT.

Figura 7 - Vista do estator do MIT



Fonte: Citisystems (2016).

Quanto ao rotor do motor de indução trifásico, existem dois modelos distintos que podem ser construídos. Um deles é denominado rotor gaiola de esquilo e o outro é denominado rotor bobinado. A Figura 8 apresenta os dois modelos de rotores.

Figura 8 - Comparação entre o rotor gaiola de esquilo e o rotor bobinado



Fonte: (Adaptado de IMD, 2019).

Os rotores de gaiola apresentam barras de cobre ou alumínio postas em curto-circuito em suas extremidades por meio de anéis. Esses rotores caracterizam-se pela simplicidade, robustez construtiva e pela indisponibilidade de terminais para a conexão elétrica ao circuito do rotor (CHAPMAN, 2013). A Figura 9 apresenta em detalhes um rotor gaiola de esquilo.

Figura 9 - Rotor gaiola de esquilo



Fonte: (Alamy, 2018).

O MIT de rotor de gaiola de esquilo com alimentação somente no estator é o modelo de máquina alternada mais bem estabelecida sob o ponto de vista de projeto e utilização no mercado (RUNCOS, 2006). Com a utilização desse rotor, conectando-se o motor diretamente a rede trifásica, pode operar-se com uma pequena variação de velocidade. Porém, para operações que exijam a variação da componente velocidade, é necessário a utilização de um conversor de frequência, o que pode, de acordo com o tamanho da máquina, acrescer um custo bastante elevado ao projeto, de acordo com o tamanho da máquina, (CHAPMAN, 2013).

Ambos os modelos de rotores são posicionados dentro do estator da máquina. Diferentemente de máquinas de corrente contínua, onde um campo magnético constante é produzido no estator, nos motores de indução trifásicos há o efeito do campo girante, onde o campo magnético “gira” em torno do estator, sendo o rotor, gaiola de esquilo, exposto ao campo girante, tendo assim, corrente induzida e através da interação, entre o campo magnético do estator e do rotor, há a produção de torque.

Um campo magnético girante e de amplitude constante, girando a velocidade constante pode ser produzido por qualquer grupo polifásico de enrolamentos deslocados no espaço do estator, se as correntes que circulam pelos enrolamentos também estão defasadas no tempo (KOSOW, 1989). No Brasil, no sistema trifásico, as tensões e por consequência as correntes têm uma defasagem de 120° , sendo as tensões representadas segundo as Equações 1, 2 e 3.

$$V_a = \sqrt{2} \cdot V_{rms} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (1)$$

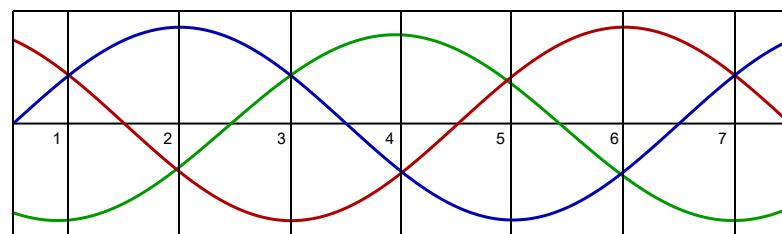
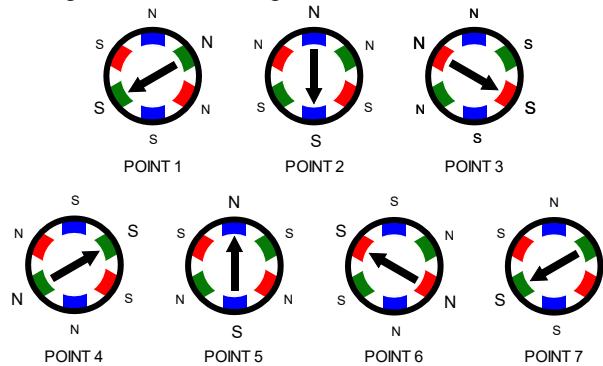
$$V_b = \sqrt{2} \cdot V_{rms} \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ) \quad (2)$$

$$V_c = \sqrt{2} \cdot V_{rms} \cdot \sin(\omega \cdot t - 120^\circ) \quad (3)$$

Em que V_{rms} é a tensão eficaz (V), ω é a frequência angular (rad/s) e t é o tempo (s).

Dessa forma, todas as máquinas de indução trifásicas produzem um campo magnético de amplitude constante e na velocidade da frequência síncrona desde que os enrolamentos estejam espaçados de 120° e as corrente estejam defasadas 120° no tempo, conforme é possível visualizar através da Figura 10.

Figura 10 – Defasagem de 120° entre correntes



Fonte: KLISOVICH (2019).

A velocidade do campo girante do estator depende apenas de duas condições: a frequência da rede na qual os enrolamentos estão conectados e o número de pólos

de cada fase. Assim, a velocidade síncrona do motor de indução é descrita através da Equação 4.

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (4)$$

Em que n_s é a velocidade síncrona do motor (RPM), f é a frequência da rede e P é o número de pólos por fase.

Dessa forma, o campo magnético girante produzido no estator da máquina CA, passa pelo rotor gaiola de esquilo da máquina e como a mesma é formada por material ferromagnético, é induzida uma tensão sobre o rotor, de acordo com a Equação 5.

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad (5)$$

Em que e_{ind} é a tensão induzida em uma barra do rotor (V), v é a velocidade relativa entre o campo do estator e o rotor (m/s), B é o vetor densidade de fluxo (T) e l é o comprimento do condutor imerso no campo magnético (m).

A partir do movimento relativo do rotor em relação ao campo magnético do estator é gerada uma tensão induzida em uma barra do rotor. Dessa forma, com o surgimento do campo magnético no rotor, há uma interação com o campo magnético girante do estator, gerando um torque induzido, e por consequência o movimento no eixo do motor (CHAPMAN, 2013).

Assim, o motor de indução trabalha numa rotação mecânica um pouco inferior à rotação síncrona, sendo que existe pouca variação da velocidade em função da carga mecânica acoplada ao eixo (PEREIRA, 2008). A diferença entre a velocidade do motor (n) e a velocidade síncrona (n_s) é chamada de escorregamento (s), que em geral é expresso como um percentual da velocidade síncrona, como demonstrado na Equação 6.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (6)$$

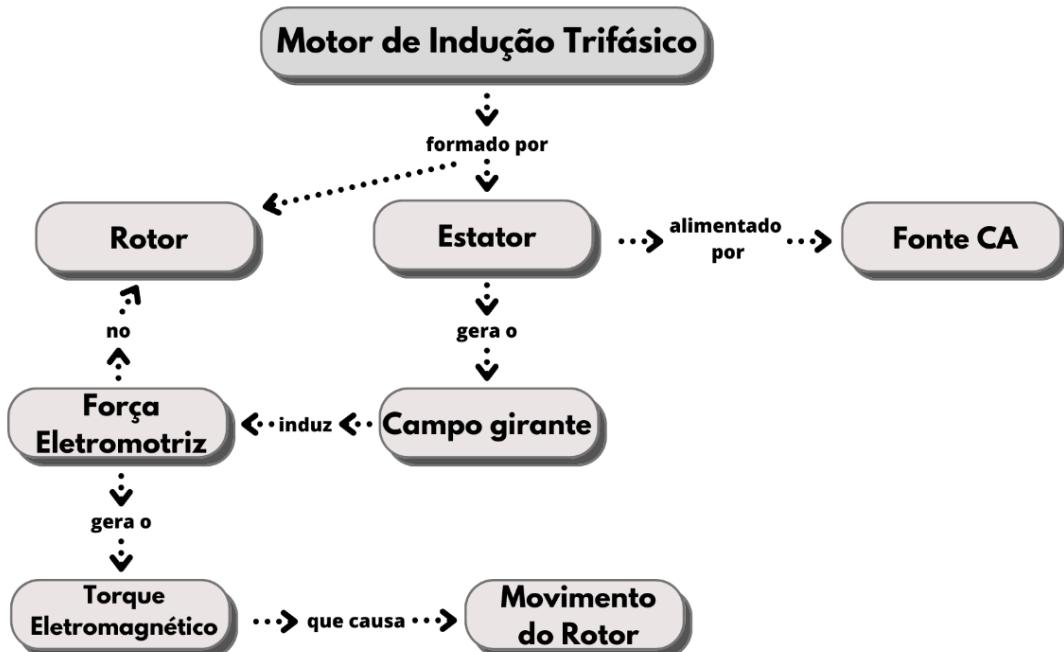
Em que n é a velocidade do motor (RPM) e s o escorregamento (%).

Em termos gerais, o valor de escorregamento não ultrapassa a faixa de 10%, sendo que na partida é onde existe o maior valor de escorregamento, pois o rotor está inicialmente parado, e na condição a vazia há o menor escorregamento, ou seja, é o ponto onde a velocidade do motor fica mais próxima da velocidade síncrona. Quando uma carga mecânica é aplicada ao eixo do rotor, a tendência é uma diminuição na velocidade. À plena carga o motor de indução sempre irá girar a um escorregamento

que assegure o equilíbrio entre o torque eletromagnético desenvolvido pelo motor e o torque resistente da carga (CHAPMAN, 2013).

A Figura 11, resume o princípio de funcionamento do motor de indução trifásico.

Figura 11 – Esquema simplificado de funcionamento do motor de indução trifásico



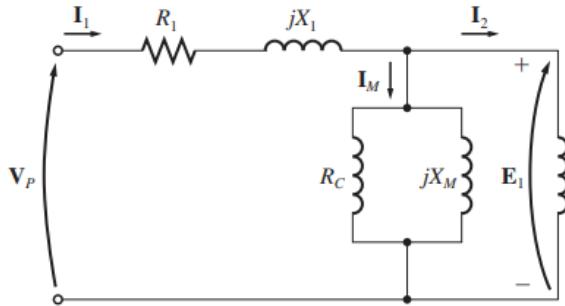
Fonte: O AUTOR (2022).

2.1.2 Circuito equivalente motor trifásico

Como as tensões e correntes no circuito do rotor de um motor de indução são basicamente o resultado de uma ação de transformador, o circuito equivalente de um motor de indução será muito semelhante ao circuito equivalente de um transformador (CHAPMAN, 2013). Esse circuito é obtido agrupando os circuitos do estator e do rotor e introduzindo no circuito do estator o ramo magnetizante (MALANGE, 2018).

Como em um transformador, é possível representar o circuito do estator (Figura 12) por uma resistência (R_1), devido a resistência dos condutores que formam os enrolamentos, em série com um indutor (X_1), representando a indutância dos condutores, em paralelo com um ramo de magnetização. Esse ramo é constituído de uma resistência (R_C), traduzindo as perdas no núcleo (magnéticas), em paralelo com uma reatância (X_M), responsável pela produção do fluxo magnético girante (MALANGE, 2018).

Figura 12 – Circuito equivalente do estator



Fonte: CHAPMAN (2013).

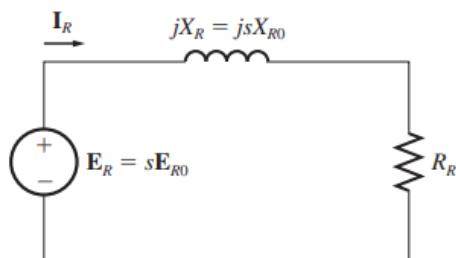
Quando uma tensão é aplicada nos enrolamentos do estator, é induzida uma tensão nos enrolamentos do rotor, e quanto maior o movimento relativo entre os campos magnéticos do rotor e do estator, maiores serão a tensão e a frequência do rotor, sendo esses valores diretamente proporcionais ao escorregamento (s) do rotor. Dessa forma, a tensão induzida no rotor para todos os valores de escorregamento, a partir da tensão de rotor bloqueado (E_{R0} , onde o eixo do motor está travado) é dada pela Equação 7.

$$E_R = s \cdot E_{R0} \quad (7)$$

Em que E_R é a tensão induzida no rotor (V) e E_{R0} é a tensão induzida no rotor com eixo bloqueado.

O circuito do rotor pode ser representado então por uma fonte de tensão, uma resistência (R_R) caracterizando a resistência dos condutores do rotor (no caso do rotor gaiola de esquilo à resistência é o próprio rotor) e uma indutância intrínseca aos condutores. O valor da reatância indutiva (X_R) varia de acordo com a frequência da tensão induzida no rotor, sendo proporcional ao escorregamento (s) e dependendo do valor da reatância indutiva com o rotor bloqueado (X_{R0}). O circuito equivalente do rotor é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Circuito equivalente do rotor



Fonte: CHAPMAN (2013).

O valor da corrente que circula no rotor é apresentado na Equação 8.

$$I_R = \frac{s \cdot E_{RO}}{R_R + j \cdot s \cdot X_{RO}} \quad (8)$$

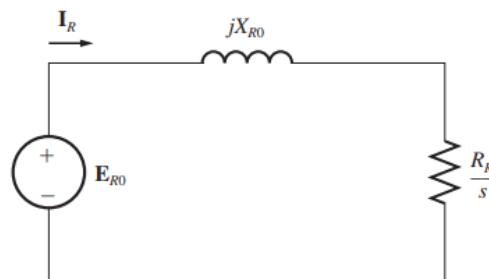
Em que R_R representa a resistência do rotor (Ω) e X_{RO} é a reatância do rotor com eixo bloqueado (Ω).

Multiplicando-se tanto o numerador como o denominador da Equação 8 por $(1/s)$, é encontrada a forma mais usual de representação do circuito do rotor de uma máquina de indução demonstrada na Equação 9.

$$I_R = \frac{E_{RO}}{R_R/s + j \cdot X_{RO}} \quad (9)$$

O circuito do rotor final é apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Circuito equivalente final do rotor



Fonte: CHAPMAN (2013).

Nesse circuito equivalente, a tensão do rotor é um valor constante de E_{RO} volts e a impedância do rotor inclui todos os efeitos devido a um escorregamento variável do rotor (CHAPMAN, 2013).

Para realizar a construção do circuito equivalente final, basta apenas referir a impedância do rotor para o lado do estator. Em um transformador, podemos referir tensões, correntes e impedâncias do lado secundário do dispositivo para o lado primário, por meio da relação de espiras do transformador, que neste caso será denominada a_{ef} . Assim a impedância referida do rotor pode ser expressa pela Equação 10.

$$Z_2 = a_{ef}^2 \cdot \left(\frac{R_R}{s} + j \cdot X_{RO} \right) \quad (10)$$

Em que Z_2 é a impedância do rotor referida ao lado do estator e a_{ef} é a relação de transformação de um motor de indução.

Dessa forma, são obtidos os valores de resistência e reatância indutiva do rotor referidos para o lado do estator, conforme as Equações 11 e 12, respectivamente.

$$R_2 = a_{ef}^2 \cdot \frac{R_R}{s} \quad (11)$$

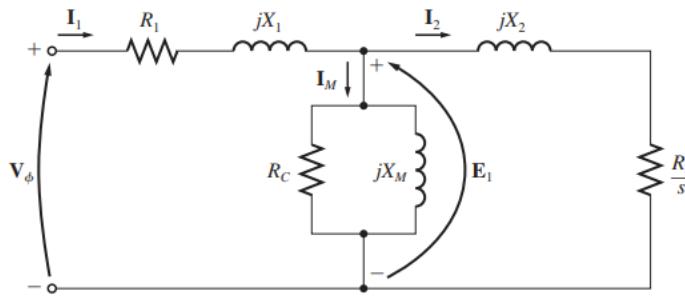
Em que R_2 é a resistência do rotor referida ao lado do estator.

$$X_2 = a_{ef}^2 \cdot j \cdot X_{RO} \quad (12)$$

Em que X_2 é a reatância indutiva do rotor referida ao lado do estator.

A Figura 15 ilustra o circuito equivalente final por fase do motor de indução trifásico.

Figura 15 – Circuito equivalente final por fase do motor de indução trifásico



Fonte: CHAPMAN (2013).

A resistência do rotor R_R e reatância do rotor X_{RO} , com o rotor bloqueado, são de determinação muito difícil ou impossível em rotores de gaiola de esquilo. A relação de espiras efetiva a_{ef} também é de difícil obtenção no caso de rotores de gaiola de esquilo. Porém, é possível realizar medidas que darão diretamente a resistência e a reatância referidas R_2 e X_2 (CHAPMAN, 2013).

2.2 POTÊNCIA, FATOR DE POTÊNCIA E RENDIMENTO

Em um motor de indução trifásico, sua potência de entrada é constituída por um conjunto de tensões e correntes trifásicas. Já a sua saída, pelo fato dos enrolamentos do secundário (rotor) estarem em curto-círculo, não é elétrica, em vez disso, a saída é mecânica (KOSOW, 1989).

A potência de entrada de um motor de indução trifásico é apresentada através da Equação 13.

$$P_{in} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos(\Phi) \quad (13)$$

Em que P_{in} representa a potência ativa trifásica de entrada (W), V_L é a tensão de linha (V), I_L é a corrente de linha (A) e Φ é o ângulo de defasagem entre corrente e tensão.

Já a potência de saída de um motor de indução trifásico é dada pela diferença entre a potência de entrada e as perdas inerentes a máquina, como demonstrado na Equação 14.

$$P_{out} = P_{in} - P_{Perdas} \quad (14)$$

Em que P_{out} representa a potência de saída do motor (W) e P_{Perdas} simbolizam as perdas da máquina (W).

Para determinar a potência de saída da máquina, então, é necessário tomar conhecimento das perdas presentes no seu circuito, que podem ser subdivididas em 5 perdas:

- Perdas no ferro ou no núcleo ($P_{Núcleo}$): são divididas em perdas por histerese e correntes parasitas. Essas perdas ocorrem tanto no estator como no rotor. No circuito equivalente elas são representadas somente pela resistência (R_C), pois como essas perdas variam com a frequência, e a frequência do estator é muito superior a frequência do rotor, as perdas do núcleo devido ao rotor podem ser suprimidas. Perdas de corrente parasita são minimizadas usando lamação no núcleo (YAMACHITA, 2013);
- Perdas por atrito e ventilação (P_{AeV}): as perdas por atrito e ventilação ocorrem devido ao atrito nos mancais e a ventilação no motor, por isso, dependem do tipo de mancal, da lubrificação, do sistema de ventilação, da velocidade de rotação e do estado de conservação do motor, no que diz respeito a limpeza do mesmo (BUFFON, 2021);
- Perdas no cobre do estator (P_{CCE}): As bobinas construídas no estator das máquinas são constituídas por condutores, na grande maioria dos projetos, condutores de cobre esmaltado. E como, na prática, não há condutor perfeito, ou seja, que tenha resistência zero, há uma perda de potência devido à resistência intrínseca ao condutor do estator. No circuito equivalente, as perdas no cobre do estator são representadas por (R_1);
- Perdas no cobre do rotor (P_{PCR}): De forma análoga as perdas no cobre do estator, há uma perda no cobre do rotor, ocasionada pela passagem da

corrente elétrica. No circuito equivalente, as perdas no cobre do rotor são representadas por (R_2);

- Perdas suplementares ou de dispersão (P_{Sup}): As perdas por dispersão, são ocasionadas por diversos fenômenos como a distribuição não uniforme das correntes nos enrolamentos, o efeito da saturação e as imperfeições na densidade de campo magnético (BUFFON, 2021).

O quadro 1, demonstra as principais perdas, com o seu percentual de contribuição e modos para amenizar os seus valores:

Quadro 1: Principais perdas de um motor de indução trifásico

PRINCIPAIS PERDAS MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO		
Tipo de Perda	Percentual de Contribuição	Como Reduzir
Perdas no Ferro (núcleo)	15 a 25%	Alongamento do núcleo e pelo uso de laminação mais fina no núcleo.
Perdas Mecânicas (atraito e ventilação)	5 a 15%	Desenvolvimento de ventiladores mais eficientes, mancais e rolamentos de baixo atrito.
Perdas no Cobre do Estator	25 a 40%	Aumento da bitola dos condutores, melhoria do desempenho das ranhuras para comportar maior inserção de cobre.
Perdas no Cobre do Rotor	15 a 25%	Aumento da quantidade de alumínio e aumento do tamanho das barras do condutoras do rotor.
Perdas Suplementares (dispersão)	10 a 20%	Desenvolvimento de um bom projeto do motor, com afastamento das cabeças de bobina do rotor, tratamento térmico do rotor e enrolamento do estator em dupla camada.

Fonte: Adaptado de BUFFON (2021).

O rendimento é calculado como a razão entre a potência de saída no eixo e a potência de entrada no estator, conforme Equação 15 (FITZGERALD et al. KINGSLEY, 2006). O rendimento de um equipamento representa o valor percentual da potência de entrada que efetivamente é transformada em potência útil durante a realização de trabalho. A parcela da potência de entrada que não é transferida para a saída é denominada de perdas, e objetiva-se que o valor destas seja o menor possível (SILVA, 2012).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (15)$$

Em que η simboliza o rendimento da máquina.

Na maioria das ocasiões é prudente se reescrever a Equação 15, levando-se em consideração as perdas, como demonstrado na Equação 16.

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + P_{\text{Perdas}}} \quad (16)$$

Em que, P_{Perdas} , pode ser determinado a partir de (17).

$$P_{\text{Perdas}} = P_{\text{Núcleo}} + P_{\text{Aev}} + P_{\text{PCE}} + P_{\text{PCR}} + P_{\text{Sup}} \quad (17)$$

Em que $P_{\text{Núcleo}}$ são as perdas no núcleo da máquina (W), P_{Aev} são as perdas pro atrito e ventilação (W), P_{PCE} são as perdas no cobre do estator (W), P_{PCR} são as perdas no cobre do rotor (W) e P_{Sup} são as perdas suplementares (W).

Outro parâmetro relevante no que diz respeito a motores de indução trifásicos é o fator de potência. A potência reativa bem como a potência ativa fluem através de motores. A soma geométrica (teorema de Pitágoras) destas duas potências determina a potência aparente. A divisão da potência ativa pela potência aparente determina o que chamamos de fator de potência (APRENDENDO ELÉTRICA, 2018). A Equação 18 determina o fator de potência.

$$\cos(\Phi) = \frac{P_{\text{in}}}{S_{\text{in}}} \quad (18)$$

Em que $\cos(\Phi)$ representa o fator de potência e S_{in} representa a potência de entrada (VA).

A potência aparente de entrada pode ser determinada através da Equação 19.

$$S_{\text{in}} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \quad (19)$$

Em resumo, o fator de potência é uma medida que determina a eficiência com que a energia elétrica está sendo utilizada em seu sistema elétrico, ou seja, é uma medida de quanto da potência elétrica consumida está de fato sendo convertido em trabalho útil (SCARPIN, 2017).

Esse parâmetro se torna relevante quando, segundo a Legislação Brasileira, mais precisamente o Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, do Prodist (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) estabelece o Fator de Potência mínimo permitido para faturas de energia elétrica, que é de 0,92 (ANEEL, 2010). Para fator de potência abaixo desse valor, a concessionária cobra uma multa na fatura de energia sobre o consumo de potência reativa além dos 8% máximos permitidos.

Algumas causas do baixo fator de potência em motores são (ELÉTRICA, 2018):

- Motores trabalhando em vazio durante grande parte de tempo. Os motores consomem praticamente a mesma energia reativa, quer operando em vazio, quer operando à plena carga. Como a energia ativa é menor à vazio, a potência reativa se torna mais significativa na soma vetorial para obtenção da potência aparente, e consequentemente o fator de potência é reduzido;
- Motores superdimensionados para as respectivas cargas. O motivo do baixo fator de potência é similar ao apresentado em motores a vazio, e se deve ao fato da potência reativa (que é praticamente constante) possuir maior significado em pequenas cargas, onde a potência ativa é menor.

Porém, o problema de baixo fator de potência pode ser resolvido. Existem quatro maneiras mais comuns para realizar a correção do fator de potência a partir da instalação de capacitores corretamente dimensionados (WEG AUTOMAÇÃO, 2009):

- Correção na entrada da energia de alta tensão;
- Correção na entrada da energia de baixa tensão;
- Correção por grupos de cargas: o capacitor é instalado de forma a corrigir um setor ou um conjunto de pequenas máquinas;
- Correção localizada: é obtida instalando-se os capacitores junto ao equipamento que se pretende corrigir o fator de potência. Representa, do ponto de vista técnico, a melhor solução, pois reduz as perdas energéticas em toda a instalação, diminui o esforço de potência dos circuitos alimentadores e gera potência reativa somente onde é necessário.

2.3 TORQUE DE UM MOTOR TRIFÁSICO

O torque do motor serve para girar objetos e ocorre quando é aplicada uma tensão na entrada de um motor elétrico, gerando a polarização dos campos eletromagnéticos (CRAVO, 2020). A interação entre os campos magnéticos do estator e do rotor, faz gerar o torque, que é a força de rotação do eixo do motor, fazendo este eixo romper a inércia para movimentar-se. O valor do torque induzido pode ser definido como a razão entre a potência convertida em um motor de indução trifásico, pela sua velocidade, como demonstra a Equação 20 (CHAPMAN, 2013).

$$\tau_{\text{Ind}} = \frac{P_{\text{Conv}}}{\omega_n} \quad (20)$$

Em que τ_{Ind} é o torque induzido (Nm), P_{Conv} é a potência convertida (W) e ω_n é a velocidade do motor (rad/s).

O valor da velocidade do motor pode ser facilmente obtido, através da medição da sua velocidade no eixo, porém, o valor da potência convertida é complexo de ser obtido via medição, como pode ser visualizado através de sua Equação (21).

$$P_{\text{Conv}} = P_{\text{in}} - P_{\text{Núcleo}} - P_{\text{PCE}} - P_{\text{PCR}} \quad (21)$$

A partir da Equação 21, para se determinar o valor de P_{Conv} , é necessário determinar os valores das perdas envolvidas, para um motor de indução trifásico.

O valor da potência de entrada, P_{in} , pode ser determinado através da Equação 13.

Analizando-se o circuito da Figura 15, é possível determinar o valor das perdas no núcleo ($P_{\text{Núcleo}}$) para uma fase a partir da Equação 22.

$$P_{\text{Núcleo}} = \frac{E_1^2}{R_c} \quad (22)$$

Em que E_1 representa a tensão eficaz no ramo de magnetização (V) e R_c simboliza a resistência do ramo de magnetização.

Como o circuito equivalente da Figura 15 faz referência a apenas uma fase do motor, considerando-se as três fases, o valor das perdas totais no núcleo é obtido multiplicando-se o valor encontrado na Equação 22 por 3.

$$P_{\text{Núcleo}} = 3 \cdot \frac{E_1^2}{R_c} \quad (23)$$

Ainda com base no circuito da Figura 15, o valor das perdas no cobre do estator pode ser determinado através da Equação 24.

$$P_{\text{PCE}} = I_1^2 \cdot R_1 \quad (24)$$

Em que I_1 é a corrente eficaz de entrada do motor (A).

Como o circuito equivalente da Figura 15 faz referência a apenas uma fase do motor, considerando-se as três fases, o valor das perdas totais no cobre do estator é obtido multiplicando-se o valor encontrado na Equação 24 por 3.

$$P_{\text{PCE}} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \quad (25)$$

Por final, as perdas no cobre do rotor podem ser obtidas através da Equação 26.

$$P_{\text{PCR}} = I_2^2 \cdot R_2 \quad (26)$$

Como o circuito equivalente da Figura 15 faz referência a apenas uma fase do motor, considerando-se as três fases, o valor das perdas totais no cobre do rotor é obtido multiplicando-se o valor encontrado na Equação 26 por 3.

$$P_{PCR} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \quad (27)$$

Outra forma útil de calcular o valor do torque induzido, considerando-se a velocidade síncrona (ω_{sin}) do motor de indução trifásico, é apresentado na Equação 28.

$$\tau_{Ind} = \frac{P_{EF}}{\omega_{Sin}} \quad (28)$$

Em que P_{EF} é a potência no entreferro do motor (W) e ω_{Sin} é a velocidade síncrona do motor (rad/s).

O valor da potência no entreferro é o valor de potência transferida ao rotor de indução, subtraindo-se da potência de entrada as perdas no cobre do estator e as perdas no núcleo, como demonstra a Equação 29.

$$P_{EF} = P_{in} - P_{Núcleo} - P_{PCE} \quad (29)$$

A potência no entreferro, a partir da análise do circuito equivalente da Figura 15, também pode ser determinado através da Equação 30.

$$P_{EF} = 3 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} \quad (30)$$

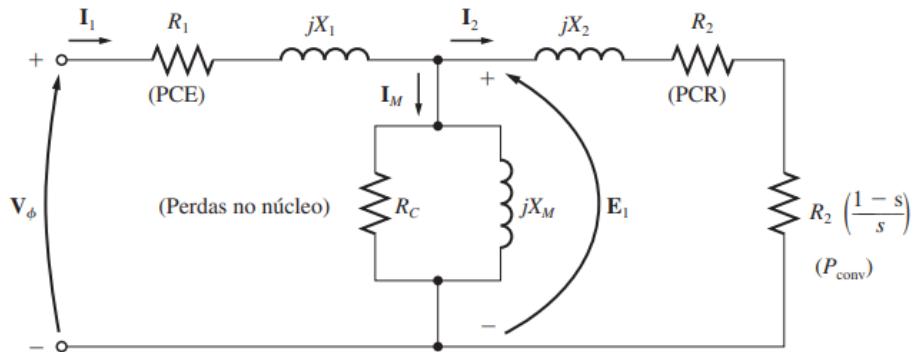
A equação do torque induzido que leva em consideração o valor da potência no entreferro é útil porque expressa o conjugado induzido diretamente em termos de potência de entreferro e velocidade síncrona, que não varia.

Além disso, a partir das Equações 27 e 30 apresentadas, é possível ainda redesenhar o circuito equivalente do motor de indução trifásico, separando-se as perdas no cobre do rotor (P_{PCR}) e a potência convertida (P_{Conv}) através da Equação 31.

$$R_{Conv} = \frac{R_2}{s} - R_2 = R_2 \cdot \left(\frac{1}{s} - 1 \right) = R_2 \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (31)$$

A Figura 16 demonstra o circuito redesenhado.

Figura 16 – Circuito equivalente redesenhado



Fonte: CHAPMAN (2013).

Essa separação é extremamente útil para a determinação das perdas de um motor de indução através de ensaios.

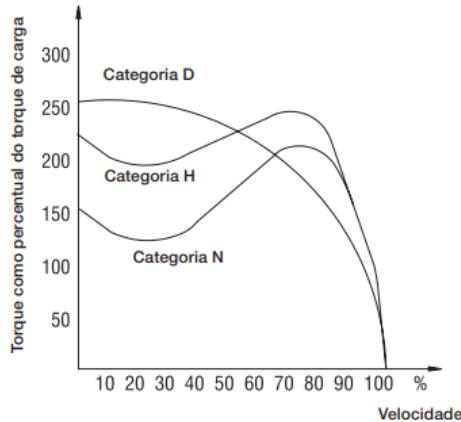
2.3.1 Classes de torque

Conforme as suas características de conjugado em relação à velocidade e corrente de partida, os motores de indução trifásicos com rotor de gaiola são classificados em categorias, cada uma adequada a um tipo de carga (ELÉTRICOS, 2015). Estas categorias são definidas em norma (ABNT NBR 17094 e IEC 60034-1), e são as seguintes:

- Categoria N: Possui um conjugado de partida médio, com uma corrente de partida normal e baixo escorregamento. Constituem a grande maioria dos motores encontrados no mercado;
- Categoria H: Possui um conjugado de partida alto, com uma corrente de partida normal e baixo escorregamento. São utilizados em aplicações que exijam um alto conjugado de partida;
- Categoria D: Possui um conjugado de partida alto, com uma corrente de partida normal e alto escorregamento (mais de 5%). São utilizados em aplicações onde a carga apresenta picos periódicos.

As curvas de Conjugado versus Velocidade das diferentes categorias podem ser vistas na Figura 17, onde observa-se as diferenças nas curvas de acordo com a velocidade do motor.

Figura 17 – Curva de Torque X Velocidade



Fonte: ELÉTRICOS (2015).

Dessa forma, é possível observar que o motor de indução trifásico possui significativas variações de torque, de acordo com sua categoria, sendo assim, conhecer a carga a ser acionada é essencial para o correto dimensionamento do mesmo.

2.4 CONEXÕES DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

A grande maioria dos motores trifásicos são fornecidos para operação em pelo menos duas tensões diferentes, o que os torna aptos a operarem em dois sistemas com tensões diferentes. A escolha de uma ou outra ligação é feita a partir da tensão disponível no local onde o motor deverá operar, sendo que suas características não se alteram devido à reconexão (PEREIRA, 2008).

Desta forma, os três enrolamentos do estator, antes de serem conectados à rede trifásica, têm de ser ligados entre si (FRANCISCO, 2006). Nos motores de três enrolamentos, as conexões possíveis são: estrela (Y), ou triângulo (Δ).

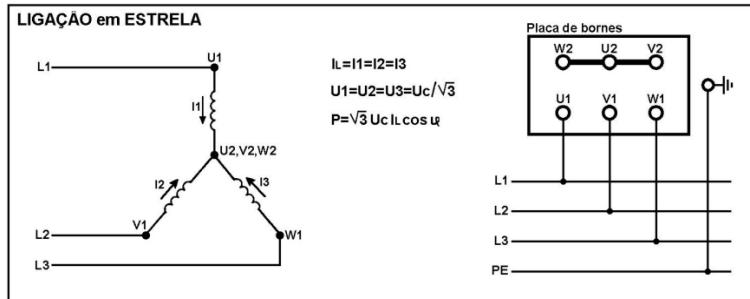
Na ligação em estrela (Y), há a presença de dois valores de tensão, a tensão de linha (V_L) e a tensão de fase (V_F), que tem sua relação demonstrada na Equação 32.

$$V_L = \sqrt{3} \cdot V_F \quad (32)$$

Em que V_L representa a tensão de linha (V) e V_F representa a tensão de fase (V). Com relação a corrente, há a presença somente da corrente de linha (I_L). A

Figura 18 demonstra a ligação de um motor trifásico de três enrolamentos em estrela, tanto com relação aos seus enrolamentos, como em relação a sua caixa de bornes.

Figura 18 – Ligação em estrela (Y)



Fonte: FRANCISCO (2006).

Motores com fechamento em estrela são aplicados quando a tensão dos enrolamentos do motor coincide com a tensão de fase da rede trifásica. Ou seja, um motor construído para que os enrolamentos operem com tensão de 220V, deve ser conectado a uma rede trifásica com tensão de linha (V_L), igual a 380V.

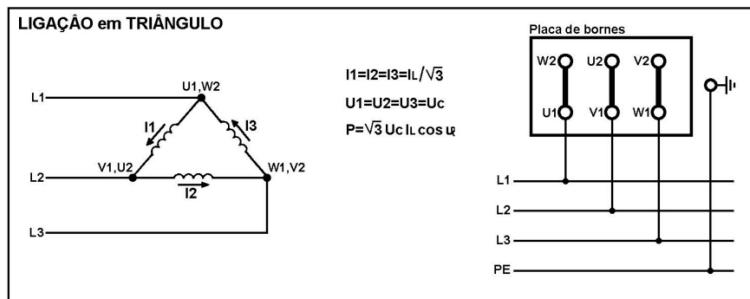
Já na ligação em triângulo (Δ), há a presença de dois valores de corrente, a corrente de linha (I_L) e a corrente de fase (I_F), que tem sua relação demonstrada na Equação 33.

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_F \quad (33)$$

Em que I_L representa a corrente de linha (A) e I_F representa a corrente de fase (A).

Com relação a tensão, há a presença somente de uma tensão. A Figura 19 demonstra a ligação de um motor trifásico de três enrolamentos em triângulo, tanto com relação aos seus enrolamentos, como em relação a sua caixa de bornes.

Figura 19 – Ligação em triângulo (Δ)



Fonte: FRANCISCO (2006).

Motores com fechamento em triângulo são aplicados quando a tensão dos enrolamentos do motor coincide com a tensão de linha da rede trifásica. Ou seja, um motor construído para que os enrolamentos operem com tensão de 220V, deve ser conectado a uma rede trifásica com tensão de linha, (V_L), igual a 220V.

2.5 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS

A determinação dos parâmetros intrínsecos ao motor de indução trifásico é essencial para a obtenção de resultados fidedignos através de medições e cálculos afim da determinação do seu circuito equivalente. Para determinar os parâmetros do circuito equivalente de um motor de indução, é necessária a realização testes em laboratório como o ensaio a vazio, o ensaio CC e o ensaio de rotor bloqueado (IEEE, 2004) e (NBR17094-3, 2018).

2.5.1 Ensaio CC para resistência do estator

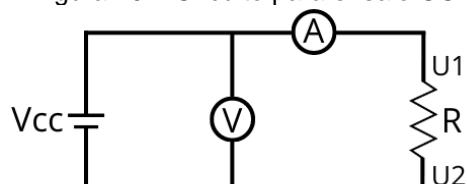
O ensaio para determinação dos valores de resistência do estator são de simples realização. De acordo com o item 7.1.2 da NBR 17094-3, 2018, o método da queda de tensão consiste em medir uma resistência fazendo circular uma corrente contínua (I_{CC}) no enrolamento e medindo-se a queda de tensão (V_{CC}) provocada por esta corrente. A corrente que circula não pode ser superior a 15% do valor nominal do enrolamento considerado. De posse dos valores de corrente e tensão, a resistência do enrolamento pode ser calculada através da Equação 34.

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \quad (34)$$

Em que R_1 representa a resistência do estator (Ω), V_{CC} simboliza a tensão medida durante o ensaio (V) e I_{CC} representa a corrente medida durante o ensaio (A).

A Figura 20 ilustra o diagrama do ensaio.

Figura 20 – Circuito para ensaio CC



Fonte: (O AUTOR, 2022).

Deve-se realizar o teste em todos os enrolamentos do estator, sendo o valor final de R_1 definido pela média aritmética dos valores encontrados (Equação 35).

$$R_1 = \frac{R_U + R_V + R_W}{3} \quad (35)$$

Em que R_U representa a resistência do enrolamento U (Ω), R_V representa a resistência do enrolamento V (Ω) e R_W representa a resistência do enrolamento W (Ω).

Ainda de acordo com a NBR 17094-3, 2018, é necessário corrigir o valor final de resistência encontrado de acordo com a temperatura. A resistência deve ser corrigida para uma temperatura ambiente de 25 °C, de acordo com a Equação 36.

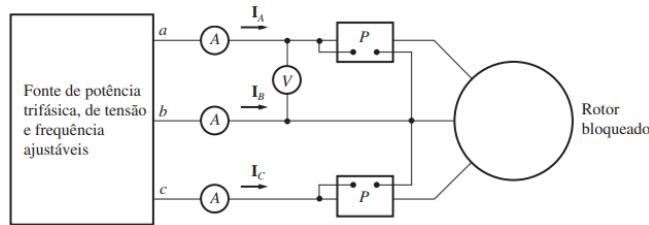
$$R_{\text{corrigida}} = R_{\text{calculada}} \cdot \frac{(t_s + k)}{(t_t + k)} \quad (36)$$

Em que $R_{\text{corrigida}}$ é a resistência corrigida para a temperatura especificada (Ω), $R_{\text{calculada}}$ é a resistência determinada via ensaio (Ω), t_s é a temperatura especificada (°C), t_t é a temperatura do enrolamento no momento da realização do ensaio (°C) e k é igual a 234,5 para cobre eletrolítico com 100 % de condutividade ou 225 para alumínio com condutividade em volume de 62 % IACS (*International Annealed Copper Standard*).

2.5.2 Ensaio de rotor bloqueado

Assim como no caso do ensaio em curto-círcuito de um transformador, o ensaio de rotor bloqueado ou travado de um motor de indução fornece informações sobre as impedâncias de dispersão (FITZGERALD et al. KINGSLEY, 2006). Neste ensaio, o rotor é bloqueado, sendo impossibilitado de girar, e neste caso o escorregamento é máximo, ou seja, $s=1$. O diagrama de conexões do ensaio de rotor bloqueado pode ser visualizado na Figura 21.

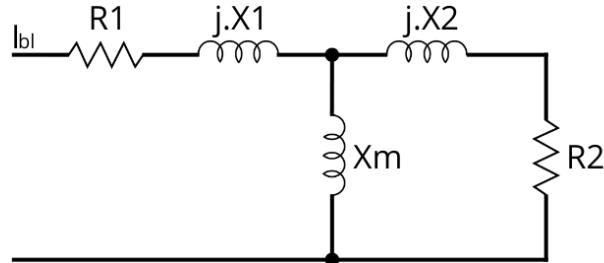
Figura 21 – Circuito para ensaio com o rotor bloqueado



Fonte: CHAPMAN (2013).

O circuito equivalente por fase do motor na condição de rotor bloqueado pode ser encontrado na Figura 22.

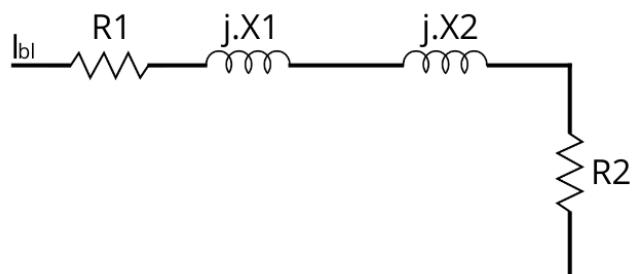
Figura 22 – Circuito equivalente com o rotor bloqueado



Fonte: CHAPMAN (2013).

Como os valores de R_2 e X_2 são muito baixos, pelo fato de o escorregamento ser igual a 1, quase toda a corrente de entrada circulará através destas impedâncias, em vez de fluir através da reatância de magnetização X_M , que é muito maior. Portanto, o circuito nessas condições assemelha-se a uma combinação em série de R_1 , X_1 , X_2 e R_2 . Dessa forma, a corrente que circula no circuito de magnetização é muito menor que a corrente do estator, o circuito paralelo composto por X_M é desprezado e o circuito equivalente final pode ser visualizado na Figura 23.

Figura 23 – Circuito equivalente com o rotor bloqueado desprezando X_M



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Com o auxílio da Tabela 1, é possível determinar o valor de X_1 e X_2 .

Tabela 1 – Distribuição empírica das reatâncias de dispersão

Classe de motor	Descrição	Fração de ($X_1 + X_2$)	
		X_1	X_2
A	$C_p = \text{Normal}$ $I_p = \text{Normal}$	0.5	0.5
B	$C_p = \text{Normal}$ $I_p = \text{Baixa}$	0.4	0.6
C	$C_p = \text{Elevado}$ $I_p = \text{Baixa}$	0.3	0.7
D	$C_p = \text{Elevado}$ $s = \text{Elevado}$	0.5	0.5
Rotor Bobinado	Varia de acordo com a resistência do rotor	0.5	0.5

Onde:

C_p = Conjugado de Partida;

I_p = Corrente de Partida;

s = Escorregamento

Fonte: IEEE 112 (2017)

Sabendo-se que a potência total do circuito do ensaio é dada de acordo com a Equação 37, é possível descobrir o valor do módulo da impedância total do ensaio, como demonstrado na Equação 38.

$$P_{1bl} = \sqrt{3} \cdot V_{1bl} \cdot I_{1bl} \cdot \cos \Phi_{1bl} \quad (37)$$

Em que P_{1bl} representa a potência trifásica total de entrada (W), V_{1bl} simboliza a tensão de fase no ensaio (V), I_{1bl} simboliza a corrente de linha no ensaio (A) e $\cos \Phi_{1bl}$ representa o fator de potência do ensaio obtido através de leitura via wattímetro.

$$|Z_{1bl}| = \frac{|V_{1bl}|}{\sqrt{3} \cdot |I_{1bl}|} \quad (38)$$

Em que Z_{1bl} representa a impedância no ensaio de rotor bloqueado (Ω).

Dessa forma, a reatância indutiva total devido as indutâncias X_1 e X_2 pode ser obtida através da Equação 39.

$$X = |Z_{1bl}| \cdot \operatorname{sen} (\Phi_{1bl}) \quad (39)$$

Em que X representa o valor da impedância na frequência do ensaio (Ω).

Utilizando-se das relações apresentadas na Tabela 1, para as proporções de X_1 e X_2 de acordo com a classe do motor, obtém-se as respectivas reatâncias indutivas de acordo com a Equação 40.

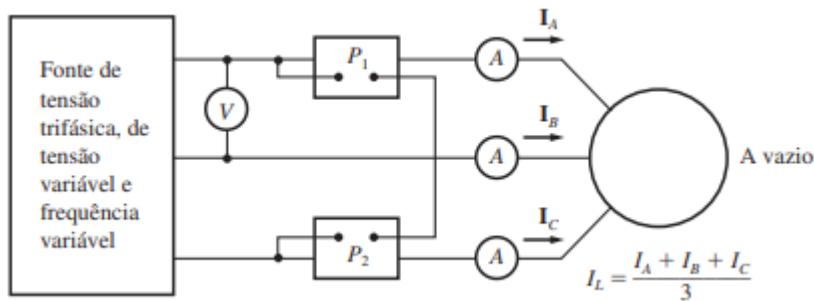
$$X_1 + X_2 = |Z_{1bl}| \cdot \text{sen}(\Phi_{1bl}) \quad (40)$$

Em que X_1 representa a reatância do estator na frequência do ensaio (Ω) e X_2 representa a reatância do rotor na frequência do ensaio (Ω).

2.5.3 Ensaio a vazio

De acordo com a NBR 17094-03, o ensaio a vazio é realizado para se obter as perdas no núcleo, além das perdas por atrito e ventilação. Neste ensaio a corrente em cada linha é lida e a média das correntes de linha é a corrente em vazio. Dessa forma, segundo NBR 17094-03, a leitura da potência de entrada é o total das perdas no motor em vazio. Subtraindo a perda no estator (P_{PCE}) da potência de entrada, resulta a soma das perdas por atrito, por ventilação e no núcleo. O circuito para a realização do ensaio a vazio é apresentado na Figura 24.

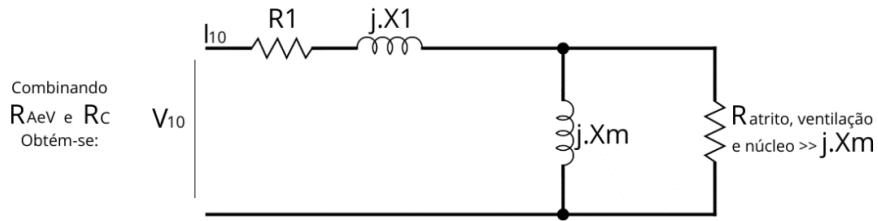
Figura 24 – Circuito para ensaio a vazio



Fonte: CHAPMAN (2013).

Como neste ensaio, o valor do escorregamento é muito pequeno, toda a potência convertida (P_{Conv}) desse motor é consumida por perdas mecânicas. Com seu escorregamento muito pequeno, a resistência correspondente à potência convertida, é muito maior do que a resistência R_2 correspondente às perdas no cobre do rotor e muito maior do que a reatância X_2 do rotor. Assim, o circuito equivalente reduz-se aproximadamente a Figura 25, no qual o resistor de saída está em paralelo com a reatância de magnetização X_M .

Figura 25 – Circuito equivalente do ensaio a vazio



Fonte: CHAPMAN (2013).

Dessa forma, pode-se concluir que a potência de entrada da máquina é a soma das potências das perdas: no cobre do estator, perdas no núcleo, perdas por atrito e ventilação e as perdas suplementares (Equação 41).

$$P_{Vazio} = P_{PCE} + P_{Núcleo} + P_{AeV} + P_{Sup} \quad (41)$$

Em que P_{Vazio} representa a potência ativa de entrada no ensaio a vazio (W).

As perdas no cobre já são conhecidas, pois o valor de R_1 é determinado através do ensaio de tensão CC no estator, assim, pode-se unir as demais perdas e denominá-las de perdas rotacionais, reescrevendo a Equação 41, conforme a Equação 42.

$$P_{Vazio} = P_{PCE} + P_{Rotacionais} \quad (42)$$

Em que $P_{Rotacionais}$ representam as perdas rotacionais da máquina (W).

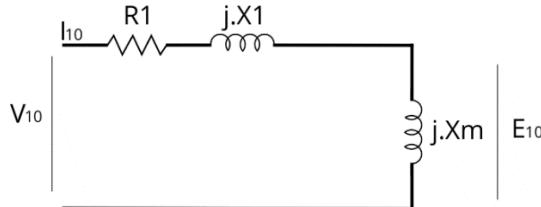
Portanto, conhecendo-se a potência de entrada do motor, as perdas rotacionais da máquina podem ser determinadas. Em um motor de indução, a corrente necessária para estabelecer um campo magnético é bem elevada, devido à alta relutância de seu entreferro. Desse modo, a reatância X_M será muito menor do que as resistências em paralelo com ela e o fator de potência geral de entrada será muito baixo. Com a elevada corrente em atraso, a maior parte da queda de tensão será sobre os componentes indutivos do circuito. A impedância de entrada equivalente pode ser descrita através da Equação 43.

$$|Z_{1vz}| = \frac{|V_{10}|}{|I_{10}|} \approx X_1 + X_M \quad (43)$$

Em que Z_{1vz} representa a impedância no ensaio a vazio (Ω), V_{10} é a tensão medida no ensaio a vazio (V) e I_{10} é a corrente medida no ensaio a vazio (A).

Como o valor de X_M é muito maior que o valor da resistência do atrito, ventilação e núcleo, o circuito da Figura 25, pode ser redesenhadado de forma conveniente como apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Circuito equivalente do ensaio a vazio desprezando perdas por atrito



Fonte: CHAPMAN (2013).

A partir da aplicação da tensão nominal no enrolamento desejado, é possível determinar sua potência reativa, através da Equação 44.

$$Q_{\text{Vazio}} = V_{10} \cdot I_{10} \cdot (\text{sen } \Phi_{10}) \quad (44)$$

Em que Q_{Vazio} representa a potência reativa do ensaio a vazio (Var).

A potência reativa do circuito é estabelecida sobre X_1 e X_M , então a potência reativa sobre o ramo de magnetização pode ser encontrada através da Equação 45.

$$Q_M = Q_{\text{Vazio}} - I_{10}^2 \cdot X_1 \quad (45)$$

Em que Q_M representa a potência reativa sobre o ramo de magnetização (Var).

E a tensão sobre a indutância do ramo de magnetização E_{10} é expressa através da Equação 46.

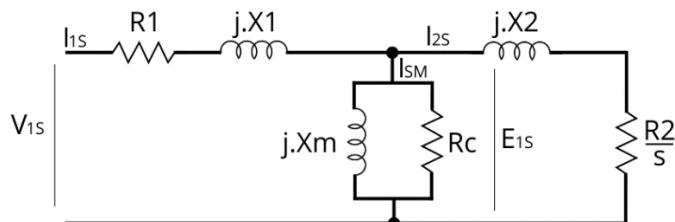
$$E_{10} = V_{10} - (R_1 + j \cdot X_1) \cdot I_{10} \quad (46)$$

Assim, o valor de X_M pode ser determinado através da Equação 47.

$$X_M = \frac{E_{10}^2}{Q_M} \quad (47)$$

Na última etapa do ensaio a vazio, o objetivo é determinar o valor de R_2 , para isso adequa-se o valor de tensão para que o motor atinja a sua velocidade nominal. Neste momento, observa-se os valores de corrente de entrada (I_{1s}), tensão de entrada (V_{1s}) e potência de entrada (P_{1s}). O circuito equivalente do motor de indução trifásico nesta etapa pode ser visualizado através da Figura 27.

Figura 27 – Circuito equivalente do ensaio a vazio com velocidade nominal



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Com o valor de P_{1s} , medido, determina-se o valor do ângulo do fator de potência do circuito, através da Equação 48.

$$\cos^{-1}(\Phi_{1s}) = \frac{P_{1s}}{V_{1s} \cdot I_{1s}} \quad (48)$$

Em que $\cos^{-1}(\Phi_{1s})$ representa o fator de potência do ensaio a vazio com velocidade nominal, P_{1s} é a potência ativa medida no ensaio a vazio com velocidade nominal (W), V_{1s} é a tensão de entrada medida no ensaio a vazio com velocidade nominal (V) e I_{1s} é a corrente de entrada medida no ensaio a vazio com velocidade nominal (A).

Além disso, deve ser determinado também (Equação 49) o valor da tensão sobre o ramo do núcleo (E_{1s}), pois como este ramo está em paralelo com o ramo do rotor, a tensão sobre ambos é igual.

$$E_{1s} = V_{1s} - (R_1 + j \cdot X_1) \cdot I_{1s} \quad (49)$$

Assim, a corrente, no ramo de magnetização, sobre o indutor X_M é apresentado na Equação 50.

$$IM_s = \frac{E_{1s}}{X_M} \quad (50)$$

Em que IM_s representa a corrente no indutor X_M no ensaio a vazio com velocidade nominal (A) e E_{1s} representa a tensão no ramo de magnetização no ensaio a vazio com velocidade nominal (V).

Dessa forma, a corrente que flui sobre o resistor R_2 pode ser obtida, de acordo com a Equação 51.

$$I_{2s} = I_{1s} - IM_s \quad (51)$$

Assim, pode ser determinado o valor da impedância equivalente do rotor.

$$|ZR_s| = \frac{|E_{1s}|}{|I_{2s}|} \quad (52)$$

Em que ZR_s representa a impedância no ramo do motor (Ω).

Como o valor da reatância X_2 já é conhecido, através do ensaio de rotor bloqueado, é possível determinar o valor da resistência R_2 , de acordo com a Equação 53.

$$R_2 = s \cdot \sqrt{|ZR_s|^2 - |X_2|^2} \quad (53)$$

É possível observar que o valor de R_2 sofre influência da velocidade do motor, sendo diretamente proporcional ao valor do escorregamento, dessa forma, quanto menor o valor da velocidade do motor, maior será o escorregamento e por consequência, maior será o valor de R_2 .

2.6 ESP32

ESP32 é uma série de placas de prototipagem eletrônica de baixo custo e baixo consumo de energia. A importância das placas de prototipagem eletrônica reside basicamente na alta demanda por sistemas embarcados do mercado atual. Isto é, sistemas computacionais compactos e de custo acessível que atendem a uma demanda específica (CARDOSO, 2020).

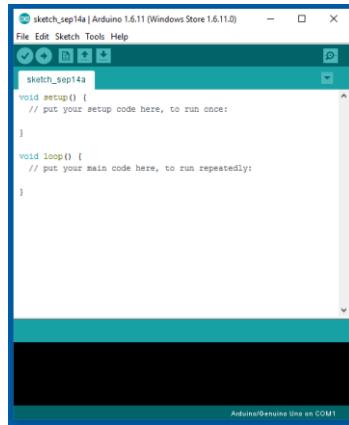
O ESP32 é uma plataforma de *software* e *hardware* livre destinada ao desenvolvimento de protótipos eletrônicos capazes de interagir com o ambiente, usando ferramentas acessíveis, de baixo custo e usabilidade simples, ao alcance de profissionais de áreas não ligadas diretamente à eletrônica como computação, engenharia mecânica e etc. (DE SOUZA et al. 2012).

Essa plataforma pode ser dividida em duas partes: O *hardware*, que é representado por uma pequena placa de circuitos eletrônicos e o *software*, representado por um ambiente de desenvolvimento integrado, juntamente com sua linguagem de programação própria, que servem para construir um *sketch* (código), o qual dirá o que a placa deve fazer (ARDUINO, 2011).

Atualmente, existe uma variedade de plataformas de desenvolvimento integrado (*Integrated Development Environment*, IDE) que podem ser utilizadas para programar o ESP32, como o Espruino (linguagem JavaScript) e o *firmware* emulado Node.js, ESPlorer IDE (linguagem Lua) e o Arduino IDE (linguagem C/C++) (VIANA, 2021). Devido à grande familiaridade dos programadores, o software mais utilizado para programação do ESP32 é o Arduino IDE, desenvolvido pela Arduino.

O software Arduino IDE de código aberto facilita a escrita de código e o *upload* para a placa (Arduino, 2022). O programa utiliza uma linguagem baseada no C/C++, sendo muito bem difundida, usando uma estrutura simples, o que facilita sua programação, além disso, o uso do Arduino IDE também é facilitado devido a grande quantidade de bibliotecas, livros e tutoriais gratuitos disponíveis na internet. Na Figura 28 é possível visualizar a interface gráfica do Arduino IDE.

Figura 28 – Interface Arduino IDE



Fonte: Microsoft APPS (2022).

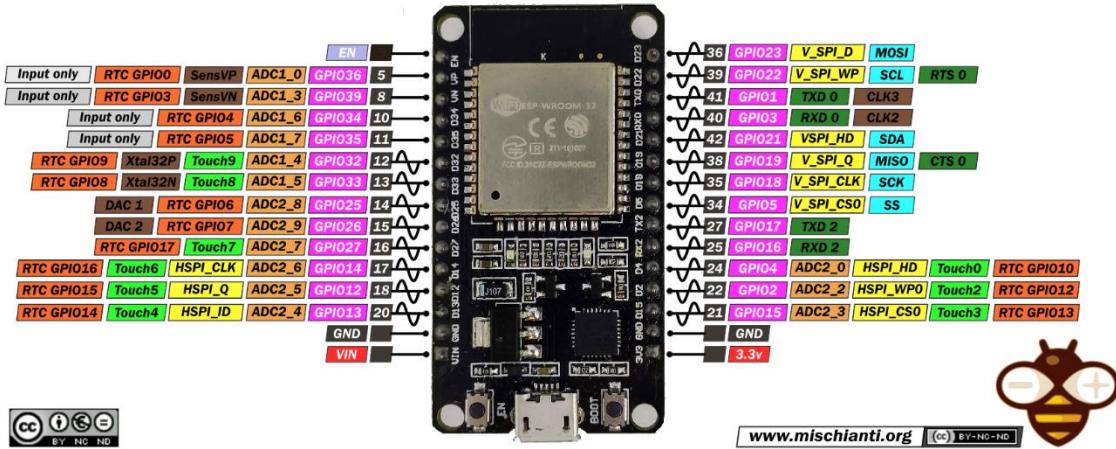
Para programar o ESP32 com a interface do Arduino IDE, basta localizar, nas preferências do usuário, na caixa *URLs adicionais para Gerenciadores de Placas*, e adicionar o link: <https://dl.espressif.com/dl/package_esp32_index.json>, e após esta etapa, ir até o gerenciador de placas e buscar o pacote ESP32 instalando o mesmo.

Em termos práticos pode-se dizer que o ESP32 é um pequeno computador com portas de entradas e saídas programáveis no qual pode-se ligar diversos periféricos como sensores, LED, *push button*, entre outros, para executar diversas tarefas (Adaptado de KUROISHI, 2018).

No mercado encontram-se disponíveis diversos modelos da placa de prototipagem eletrônica ESP32 entre as quais podem ser citadas DOIT ESP32 DevKit v1, ESP32-DevKitC, ESP32-PICO-KIT, que se diferenciam principalmente pelo seu tamanho e função específica, por exemplo o ESP32-CAM, conta com uma câmera de 2MP embutida. Para o trabalho em questão, é utilizado o DOIT ESP32 DevKit v1 de 30 pinos, que é o modelo mais difundido da família ESP, possuindo os pinos necessários para o projeto bem como comunicação serial via *USB* embutida.

Os pinos de portas programáveis de saída (*General Purpose Input Output*, GPIO) são portas que servem como interface entre o microcontrolador e periféricos como sensores, atuadores ou até outros circuitos integrados e microcontroladores. A Figura 29 demonstra a pinagem de um DOIT ESP32 DevKit v1 de 30 pinos. Ele tem 25 pinos GPIOs com níveis de tensão 0 V e 3.3 V (não tolera 5 V) para níveis digitais 0 e 1 respectivamente, com corrente máxima de 12 mA por GPIO (ALBUQUERQUE, 2020).

Figura 29 – DOIT ESP32 DevKit v1



Fonte: MISCHIANTI (2021).

A maioria dos 25 pinos GPIO do ESP32 pode funcionar como entrada ou saída digital simples. Essas funções de entrada e saída podem ser acessadas através do framework Arduino pelas funções `pinMode()`, `digitalRead()` e `digitalWrite()`.

Algumas características de pinagem do ESP32 são importantes, de forma a utilizá-los da maneira correta e para tanto, serão expostos a seguir algumas características de pinagem do ESP32:

- Pinos de Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation*, PWM): O ESP32 PWM possui 16 canais independentes que podem ser configurados para gerar sinais PWM com propriedades diferentes. Todos os pinos que podem atuar como saídas podem ser usados como pinos PWM (apenas os pinos GPIOs 34 a 39 não podem gerar PWM);

- Pinos GPIO Touch: Esses pinos funcionam como sensores capacitivos, são sensíveis a objetos com alguma carga elétrica como a pele humana. Com isso podem ser utilizados para detectar o toque dos dedos. Os pinos disponíveis nessa placa são: GPIO 4, GPIO 2, GPIO 15, GPIO 13, GPIO 12, GPIO 14, GPIO 27, GPIO 33, GPIO 32.

- Pinos GPIO de Conversão Analógica para Digital (*Analog Digital Converter*, ADC), é o circuito capaz de converter uma grandeza analógica de entrada (tensão) em uma representação digital (valor inteiro). Esta função é de extrema importância para o projeto, tendo em vista que a grande maioria dos sensores de corrente e de tensão atua de forma analógica, necessitando seu valor ser convertido para o modo

digital através de um ADC. No ESP32 existem 2 conversores AD, ADC1 com 8 canais e o ADC2 com 10 canais. Ambos os conversores possuem resolução de 12 bits alcançando 4096 valores distintos. A faixa de entrada pode ser alternada opcionalmente para níveis entre 0-1 V, 0-1.34 V, 0-2 V ou 0-3.6 V. O ESP32 DevKit v1 tem 15 pinos disponíveis para esta função: GPIO 36, GPIO 39, GPIO 32, GPIO 33, GPIO 34, GPIO 35, GPIO 4, GPIO 2, GPIO 15, GPIO 13, GPIO 12, GPIO 14, GPIO 27, GPIO 25, GPIO 26.

- Pinos GPIO Conversão Digital para Analógica (*Digital to Analog Converter, DAC*): Existem 2 pinos DAC de 8 bits no ESP32 para converter valores digitais em saídas com níveis de tensão analógica. Estes são os pinos disponíveis: GPIO 25, GPIO 26.

Também existem pinos disponíveis que não fazem parte do GPIO do ESP32 como:

- VIN: Entrada de alimentação. Faixa recomendada de 7-12 V.
- GND: *Ground*.
- EN (*Enable*): Pino de ativação do regulador de 3,3 V. Levando esse pino ao GND, o ESP32 será desligado.
- 3V3: Saída de 3.3 V. Corrente máxima de 500 mA.

Além de operações individuais em cada pino, alguns GPIOs podem ser utilizados em combinação para proporcionar conexões seriais como SPI, I²C e CAN 2.0.

Dessa forma, através dos pinos de conexão, tanto digitais como analógicos, podem ser conectados diversos componentes, tanto com funcionalidade de entrada, como botões e sensores de luminosidade por exemplo, bem como de saída, como motores e LED's. Tanto componentes de entrada, como de saída podem ser encontrados por meio de *shields*. *Shields* são placas usadas com objetivo de possibilitar a adição de funcionalidades ao ESP32. Podem ser utilizadas mais de uma *shield* ao mesmo tempo, proporcionando a criação de módulos de *hardware* com várias funções diferentes (SILVA, 2018). Os *shields* possuem preço acessível, bem como são de fácil utilização. *Shields* podem ser conectadas ao corpo do ESP32 através de seus pinos, a fim de estender seus limites de trabalho. (ARDUINO 2011).

Outra ferramenta importante muito utilizada na programação são as bibliotecas, que tornam a utilização e aplicação de sensores mais simples. No contexto do trabalho, a principal biblioteca utilizada é emon.lib. A biblioteca foi criada com o intuito

de oferecer suporte a um monitor de energia, dessa forma, através da inserção de um sensor de corrente e um sensor de tensão, com sua instanciação e calibração correta no *sketch* é possível obter valores como potência ativa, potência aparente e fator de potência, tudo isso através da biblioteca emon.lib.

2.7 SENsoRES PARA MEDIÇÃO DE VELOCIDADE, CORRENTE E TENSÃO

Serão utilizados no desenvolvimento do projeto, 3 modelos de sensores distintos, sendo que cada modelo de sensor terá sua finalidade, sendo:

- Sensor de velocidade: utilizado para medição de velocidade do motor;
- Sensor de corrente: utilizado para medir as correntes de linha do motor;
- Sensor de tensão: utilizado para medir as tensões do motor.

Com o medidor proposto, deseja-se mensurar os valores de corrente e tensão de cada uma das fases do motor. Dessa forma, serão utilizados 3 sensores de corrente e 3 sensores de tensão.

2.7.1 Sensor de velocidade

O primeiro sensor apresentado é o de velocidade, no qual, se encontram disponíveis no mercado diversos modelos, com princípios de funcionamento distintos. A Tabela 2 apresenta os principais modelos de sensores de velocidade utilizados com Arduino.

Tabela 2: Modelos de sensores de velocidade

(continua)

MÓDULOS SENsoRES DE VELOCIDADE

Sensor	Alimentação	Corrente Máx	Distância de Detecção	Valor	Imagen
Módulo Sensor Infravermelho TCRT5000	3,3 - 5V	60mA	2 - 12mm	R\$ 9,21 ¹	

Fonte: Baú da Eletrônica (2022)

Tabela 2: Modelos de sensores de velocidade

(conclusão)

Sensor	Alimentação	Corrente Máx	Distância de Detecção	Valor	Imagen
Módulo Sensor de Obstáculo	3,3 - 5V	65mA	20 - 300mm	R\$ 8,46 ²	
Fonte: Eletrogate (2022)					
Módulo Encoder Acoplador Óptico	3,3 - 5V	65mA	5mm	R\$ 8,90 ³	
Fonte: Casa da Robótica (2022)					
Sensor Hall de Campo Magnético KY-024	3,3 - 5V	30mA	2 - 20mm	R\$ 13,90 ⁴	
Fonte: MasterWalker (2022)					

Notas:

- [1] – Fonte: Baú da Eletrônica – Acessado em: 26/07/2022;
- [2] – Fonte: Eletrogate – Acessado em: 26/07/2022;
- [3] – Fonte: Casa da Robótica – Acessado em: 26/07/2022;
- [4] – Fonte: Master Walker – Acessado em: 26/07/2022.

Fonte: O AUTOR (2022).

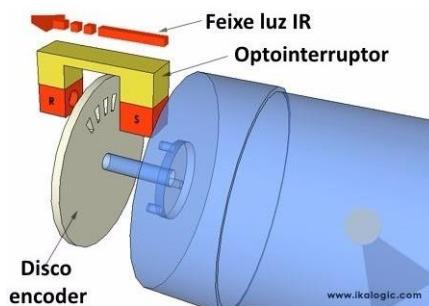
Os três primeiros módulos apresentados na Tabela 2 têm seu princípio de funcionamento dispostos através de um modelo especial de transistor: o fototransistor. Utilizando-se das características dos transistores, fototransistor capta através da base o sinal infravermelho, ocorrendo através do efeito fotoelétrico circulação de corrente pela base, desse modo, o fototransistor conduz entre seus terminais de coletor e emissor e se comporta, idealmente, como uma chave fechada (BOYLESTAD, 2013). Quando não há sinal infravermelho na base, não há corrente circulando entre os terminais de coletor e emissor, logo, idealmente, o fototransistor se comporta como uma chave aberta. O fototransistor atua nas regiões de corte (quando o sinal infravermelho não é refletido) e de saturação (quando o sinal infravermelho é refletido).

Em suma, os três módulos iniciais apresentados se utilizam desta característica: existe um comparador de tensão no circuito que tem a função de comparar a tensão do fototransistor com uma tensão de referência (que pode ser variada de acordo com a posição do *trimpot*), dessa forma quando o sinal infravermelho é refletido no objeto e incide sob o fototransistor, o mesmo conduz, então, o comparador de tensão tem seu nível lógico alterado na saída, de 0 V para 5 V. Assim, a cada giro completo do rotor, há um pulso na saída do comparador de tensão.

O módulo Sensor Hall de Campo Magnético KY-024, é um módulo eletrônico desenvolvido com a finalidade de detectar a aproximação de um campo magnético (OLIVEIRA, 2020). O mesmo funciona baseado no sensor KY-024, e de acordo com Datasheet da empresa BCD, a tensão de saída é definida pela tensão de alimentação e varia proporcionalmente à força do campo magnético. Analogamente aos módulos descritos anteriormente, este também possui um comparador de tensão, que compara a tensão de saída do sensor com uma tensão de referência, definida através do ajuste do *trimpot*.

O módulo adotado para realização do presente trabalho é o Módulo *Encoder* Acoplador Óptico, que possui o menor preço entre os módulos avaliados e é de simples funcionando. A Figura 30 apresenta, de maneira resumida, o funcionamento do módulo. Seu único entrave é o disco de *encoder*, que pode variar de motor para motor devido a sua forma de acoplamento no eixo, porém, com a disponibilidade de uma impressora 3D, como a presente no laboratório, é possível imprimir o modelo de *encoder* adequado ao motor utilizado.

Figura 30 – Módulo e o disco de *encoder*



Fonte: MERCADO LIVRE (2021).

2.7.2 Sensor de corrente

Atualmente, se encontram disponíveis comercialmente diversos modelos de sensores para medições de corrente compatíveis com microcontroladores, em específico o ESP32. Sua gama de valores a serem medidos e princípios de funcionamento tem grande variação de acordo com o projeto desejado. É possível encontrar equipamentos capazes de aferir corrente na ordem de mili amperes até equipamentos mais robustos capazes de medir centenas de amperes. A Tabela 3 demonstra quatro modelos distintos de sensores estudados para a realização da medição da corrente do motor.

Tabela 3: Modelos de sensores de corrente

(continua)

MÓDULOS SENsoRES DE CORRENTE							
Sensor	Corrente Máxima	Saída Analógica	Invasivo	Tempo de resposta	Erro na faixa linear	Valor	Imagen
Módulo Sensor de corrente ACS712	30A	66mV/1A	Sim	5µs	± 1,5%	R\$24,90 ¹	
Módulo Sensor de Corrente Linear ACS758LCB-050B	50A	40mV/A	Sim	4µs	± 1%	R\$113,74 ²	
Módulo Sensor de Corrente ZMCT103C	10A	1mA/1A	Não	5µs	± 2%	R\$ 24,90 ³	
Sensor de Corrente SCT-013	20A	20A/1V	Não	-	± 1,5%	R\$ 59,66 ⁴	

Fonte: Baú da Eletrônica (2022)

Fonte: Baú da Eletrônica (2022)

Fonte: Saravati (2022)

Fonte: Filipe Flop (2022)

Tabela 3: Modelos de sensores de corrente

(conclusão)

Notas:

- [1] – Fonte: Baú da Eletrônica – Acessado em: 26/07/2022;
- [2] – Fonte: Baú da Eletrônica – Acessado em: 26/07/2022;
- [3] – Fonte: Saravati – Acessado em: 26/07/2022;
- [4] – Fonte: Filipe Flop – Acessado em: 26/07/2022.

Fonte: (O AUTOR, 2022).

O princípio de funcionamento da maioria dos módulos, incluindo os quatro apresentados na Tabela 3, está relacionado com o efeito Hall. Quando um condutor ou semicondutor está conduzindo corrente elétrica e é imerso em um campo magnético, uma tensão é gerada perpendicular à corrente e ao campo magnético. Este princípio é conhecido como Efeito Hall. (CARVALHO, 2011).

A sua tensão de saída é proporcional ao campo magnético ao qual o sensor está exposto. Essa tensão poderá ser positiva ou negativa de acordo com o deslocamento no espaço do gerador do campo magnético ou o sentido da corrente, caso esta seja o gerador do campo magnético (CARVALHO, 2017).

O Transformador de Corrente (TC) consiste em poucas espiras no primário e com uma bitola apropriada para a corrente do circuito de força, conectado em série com este enrolamento, fazendo com que a corrente que flui para a carga circule pelo enrolamento primário (FILHO, 2015).

Um fator preponderante para a escolha do sensor a ser utilizado no medidor é o fato de ser invasivo ou não. O sensor invasivo é aquele em que o módulo é conectado eletricamente em série ao circuito a ser medido. Já os sensores não invasivos não estão conectados eletricamente ao circuito: temos apenas a passagem de um dos condutores do circuito por dentro da abertura do sensor. O fato de o transformador de corrente ser invasivo ou não está diretamente atrelado ao seu tipo. Os transformadores de corrente podem ser de diversos tipos: barra, enrolado, janela, bucha, núcleo dividido, com vários enrolamentos, com vários núcleos secundários, derivação no secundário (BATISTA, 2014).

O sensor de corrente SCT-013 tem capacidade para medir Corrente Alternada (CA) de até 20A. É um sensor não invasivo, ou seja, ele não é eletricamente conectado ao circuito medido (VIDAL, 2017). Sua construção é do tipo núcleo dividido, o que

torna sua utilização bastante simples: basta retirar sua trava, dividindo seu núcleo, colocando-o dentro do condutor em que se deseja realizar a medição, após, é só travá-lo novamente.

Dessa forma, o mesmo é do tipo janela e sua corrente máxima de medição é de 10 A. Esse valor de corrente baixo limita sua aplicação a pequenos motores trifásicos, de no máximo 1,5 CV, visto que em motores de maior porte, sua corrente de partida pode superar o valor máximo de operação do TC, trazendo incertezas e podendo comprometer o funcionamento do mesmo.

Tanto o Módulo Sensor de corrente ACS712, como o Módulo Sensor de Corrente Linear ACS758LCB-050B são sensores invasivos capazes de medir 30 A e 50 A, respectivamente. O fato de os mesmos serem invasivos não os tornam atrativos para o desenvolvimento do medidor, levando-se ainda em consideração que seus erros na faixa linear de operação são bastante próximos aos dos dois TC's não invasivos apresentados.

Dessa forma, o módulo que apresenta as melhores características para realizar a medição de corrente de um motor trifásico foi o Sensor de Corrente SCT-013, sua praticidade de utilização e faixa de operação se mostraram as ideais para a determinação da corrente, embora seu custo seja o mais elevado entre os sensores apresentados e o mesmo necessite de um circuito auxiliar para que o conversor ADC do ESP32 interprete corretamente os valores lidos.

2.7.3 Sensor de tensão

Para que seja possível a medição da tensão sobre os terminais do motor, é preciso um sensor adequado para tal tarefa, visto que as entradas analógicas do ESP32 suportam tensões entre 0 V e 3,3 V_{DC}. Desse modo é necessário realizar a conversão do sinal da rede elétrica alternada tendo em vista que seu valor de pico, entre fase e neutro é de 311 V em regiões onde a tensão eficaz da rede de energia elétrica é de 220 V_{RMS}. A Tabela 4 apresenta o modelo de sensor de tensão encontrado.

Tabela 4: Modelos de sensores de tensão

MÓDULOS SENSORES DE TENSÃO							
Módulo	Alimentação	Tensão Máxima	Proporção	Margem de Erro	Linearidade	Valor	Imagen
Sensor de Tensão AC ZMPT101B	3,3 - 5V	220Vca Rms	1000:1000	± 1%	0,20%	R\$32,00 ¹	

Fonte: Eletrogate
(2022)

Notas:

[1] – Fonte: Eletrogate – Acessado em: 26/07/2022;

Fonte: (O AUTOR, 2022).

Como pode ser observado na Tabela 4, a disponibilidade de sensores de tensão adequados ao projeto é limitada, se comparada por exemplo, ao número de sensores de corrente apresentados.

Assim, o módulo encontrado foi o Módulo Sensor de Tensão AC ZMPT101B, que tem o princípio de funcionamento dado pelo Transformador de Tensão do tipo corrente ZMPT101B, que opera em conjunto com um amplificador operacional LM358. O módulo possui com um Off-set de 1,65 V, ou seja, quando o valor da tensão medida for 0 V, teremos tem-se na saída do sensor uma tensão de 1,65 V.

2.8 PYTHON

O Python é uma linguagem de programação de alto nível, ou seja, com sintaxe mais simplificada e próxima da linguagem humana, utilizada nas mais diversas aplicações, como desktop, web, servidores e ciência de dados (MELO, 2021).

Por ser uma linguagem de sintaxe relativamente simples e de fácil compreensão, ganhou popularidade entre profissionais da indústria tecnológica que não são especificamente programadores, como engenheiros, matemáticos, cientistas de dados, pesquisadores e outros (KRIGER, 2022).

A linguagem é desenvolvida sob uma licença de código aberto aprovada pela OSI (Open System Interconnection, que significa Sistemas Abertos de Interconexão em referência a Organização Internacional de Normalização), tornando-o livremente utilizável e distribuível, mesmo para uso comercial. A licença do Python é administrada

pela Python Software Foundation. O Python é uma linguagem de programação que permite trabalhar mais rapidamente e integrar seus sistemas com mais eficiência, sendo difícil encontrar uma biblioteca que não tenha *bindings* (versão) em Python o que a torna extremamente atrativa (MENEZES, 2010). Dessa forma, é possível integrar o Python a outras linguagens, como a linguagem C e Fortran.

Uma biblioteca muito útil utilizada em Python, para realizar a comunicação entre a linguagem de programação e o Arduino é chamada de PySerial. Através dessa biblioteca, o programa em Python pode tanto enviar como receber dados do ESP32. Essa biblioteca possui aplicações bastante interessantes, visto que, o programa em Python por si só não possui a capacidade de realizar a leitura de sensores de corrente, ou tensão, por exemplo. Porém, através da interação criada pela biblioteca PySerial é possível que o ESP32 realize as leituras necessárias e o programa em Python receba esses valores através da Porta COM, com a biblioteca PySerial.

Em fóruns e sites especializados, existem uma infinidade de projetos envolvendo Python e Arduino através da biblioteca PySerial pelo fato de a biblioteca ser de simples instalação e utilização. São apresentados diversos projetos em que diferentes modelos de sensores têm seus dados adquiridos pelo ESP32 e enviados via comunicação serial ao programa em Python. Um ponto interessante, é que além de receber dados do ESP32, através da biblioteca é possível também que o programa envie dados ao ESP32, alterando suas variáveis.

Uma vantagem da utilização do Python em alusão a outras linguagens é a facilidade de criação de interfaces gráficas. Um exemplo é a biblioteca Tkinter que é nativo da linguagem Python, bastando importá-lo no momento do uso, ou seja, estará sempre disponível (JOAO, 2016). A partir dessa biblioteca, é possível criar uma interface gráfica leve e customizada, podendo inserir botões, visores e campos para preenchimento.

Neste contexto a utilização do Python se torna atrativa ao trabalho. O programa desenvolvido nesta linguagem de programação será responsável por demonstrar de forma simples, os valores obtidos através de leituras e cálculos realizados através do Arduino. O programa em Python será a Interface Homem Máquina (IHM) do projeto, atuando como mediador da interação entre o ESP32 e o usuário.

Para realizar a programação do programa em Python é necessária a utilização de uma IDE compatível, e no caso do projeto proposto, optou-se pela utilização do Pycharm, ferramenta bastante difundida entre os programadores. Uma vantagem é

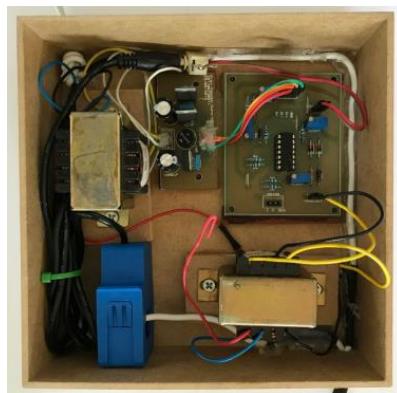
que o PyCharm fornece conclusão de código inteligente, inspeções de código, realce de erros em tempo real e correções rápidas, juntamente com refatorações de código automatizadas e recursos avançados de navegação (PYCHARM, 2023).

2.9 PESQUISAS CORRELATAS

A aplicação de placas de prototipagem elétônicas em projetos para aquisição de valores de medição tanto de grandezas elétricas ou mecânicas é muito usual e difundida no meio acadêmico. Grande parte dos trabalhos está relacionada a medição de energia elétrica em aplicações domésticas onde valores de interesse são: corrente, tensão, potência ativa, fator de potência e energia, principalmente no que se refere a medição do consumo de aparelhos elétricos.

Em seu trabalho, Kuroishi (2018) realizou medição de corrente através do transformador de corrente SCT-013-000V e medição de tensão através de um transformador rebaixador, agregado a um circuito condicionador afim se obter valores de tensão adequados a entrada dos microcontroladores. A Figura 31 demonstra a case elaborada pelo autor.

Figura 31 – Case desenvolvida por Kuroishi



Fonte: KUROISHI (2018)

O trabalho buscou comparar a precisão dos valores medidos através de dois equipamentos distintos: Arduino UNO e ARM Cortex. No trabalho, após a aquisição dos dados, os mesmos foram enviados para duas plataformas distintas e através dos valores de entrada, foi determinado o valor de fator de potência apresentando-o no monitor serial. Em sua conclusão, Kuroishi valida o resultado dos programas ao

realizar medições em diversos equipamentos domésticos tendo como resultado obtido dos dois sistemas (Arduino e ARM Cortex) valores próximos, tendo uma diferença máxima de 1,232%. Com isso, o mesmo afirma a vantagem do uso do Arduino, por ser mais barato, em relação ao ARM Cortex.

Em sua obra, Flores (2017), desenvolveu um sistema de monitoramento de qualidade de energia portátil, analisando as mesmas entradas (corrente e tensão) do trabalho de Kuroishi. No entanto, neste trabalho os resultados obtidos foram demonstrados de formas distintas: através de um display LCD 16 x 2 e também através do armazenando dos dados em um Micro SD para posterior análise no programa Microsoft Excel.

Um fato notável de ambos os trabalhos analisados é com relação ao medidor de corrente utilizado: os dois autores sugerem a alteração do Transformador de Corrente a ser utilizado, visto que o SCT-013-000 possui fundo de escala de 100 A, valor muito superior as medidas por eles realizadas.

Apesar dos dois trabalhos anteriormente citados realizarem medições monofásicas de corrente e tensão, é possível encontrar na literatura medidores trifásicos. Um exemplo é o trabalho de Santos (2020), no qual, através de medição da corrente e tensão nas três fases é possível obter valores trifásicos. Neste ponto, o objetivo principal do trabalho citado é desenvolver um protótipo de monitoramento de consumo de energia em tempo real de baixo custo. Passo importante relatado no trabalho é o seu desenvolvimento, sendo o primeiro protótipo construído num modelo monofásico, para validação e posteriormente a construção do modelo final, trifásico. Assim como nos trabalhos anteriores, o mesmo utiliza o sensor de corrente SCT-013-000. Em sua validação, o artigo aborda os resultados encontrados, condizentes com os calculados, sendo desta forma satisfatórios. O trabalho cita ainda a importância de equipamentos medidores de consumo de energia elétrica, uma vez que eles auxiliam na conscientização do usuário com relação ao consumo de energia.

Além de artigos acadêmicos, existem diversas empresas no mercado que atuam com a venda de medidores de energia inteligentes. A empresa IE Tecnologia (IE TECNOLOGIA, 2022) é um exemplo desse ramo de mercado que vem se expandindo constantemente. Na sua gama de produtos, são oferecidos diversos modelos de medição de energia, tanto monofásicos como trifásicos, com diferentes valores suportados de corrente e com possibilidade de visualização dos resultados via

aplicativo móvel, conforme demonstra a Figura 32, que traz um medidor de energia elétrica trifásico *Wi-fi*.

Figura 32 – Medidor de energia IE Tecnologia



Fonte: IE TECNOLOGIA (2023)

Na área mecânica, no que diz respeito a medição de velocidade em motores, destaca-se o trabalho de (LIMA ET AL., 2021), no qual foi possível demonstrar a velocidade de um motor de 60 W em um display LCD 20X4 utilizando a plataforma Arduino UNO e um sensor de efeito Hall, A3144. Para realizar tal medição, foram construídos um suporte e um roda com eixo em TECNIL. Dessa forma, o eixo do motor foi conectado a roda produzida, possuindo 2 imãs colados a ela. Esse contato faz a roda do tacômetro girar, forçando os imãs a passarem na frente do sensor, produzindo os pulsos necessários para o cálculo das rotações desenvolvidas pela roda. Ao final, com a realização de diversos testes, com diferentes velocidades do motor, o sistema de medição de rotação se mostrou extremamente eficiente tendo um erro entre leituras de 0,61%, comprovando o seu sucesso.

Já na área de integração entre Arduino e a linguagem de programação Python, um artigo de destaque é o trabalho de Guedes (2018) que traz um capítulo abordando a biblioteca Pyserial, especialmente desenvolvida para realizar a comunicação via serial entre a linguagem Python e dispositivos eletrônicos. É demonstrado, no decorrer do trabalho, desde a instalação da biblioteca, até exemplos práticos, ilustrando a programação tanto em Python como em C/C++, consolidando a utilização desta biblioteca como principal meio para integração entre o Arduino e a linguagem Python (GUEDES, 2018).

Ainda nesta temática, de aquisição de dados com Python com a utilização do Arduino, se destaca o trabalho elaborado por Dias e Fuentes (2017). Através de dados extraídos do Arduino, enviados por meio de comunicação Serial, foi idealizado um

programa onde em uma interface gráfica é apresentado um gráfico que plota um certo número de amostras para um período de amostragem estabelecido pelo usuário. Um resultado importante desse trabalho, na aquisição de dados é de que apesar dessa obtenção poder ser realizada por outros softwares, como LabView e MathLab, ambos são programas que demandam um alto custo de licença. Dessa forma, trazer soluções através de plataformas OpenSource é importante para que mais pessoas possam usufruir e ser impactadas com esses trabalhos (DIAS, 2017).

Assim, é possível identificar que o meio acadêmico assim como o industrial estão alinhados com o uso de placas de prototipagem eletrônica para realização de medições, seja de corrente, tensão ou velocidade, para obtenção de valores como o consumo de energia elétrica. Embora haja esse alinhamento, o mesmo está voltado principalmente ao ramo doméstico, onde através de medições se encontram valores de energia consumida, fator de potência, etc. que são demonstrados a partir de visores LCD, monitor serial ou ainda aplicativos de celular. Porém, ainda se carecem de pesquisas na área do levantamento de valores elétricos e mecânicos instantâneos de motores de indução trifásicos, para realizar o inter-relacionamento de constantes mecânicas e elétricas para a visualização de diversos parâmetros do mesmo, como rendimento, torque e escorregamento.

2.10 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

O capítulo apresentado buscou fundamentar, com base sólida, as máquinas de corrente alternada, com ênfase no motor de indução trifásico, apresentando desde o seu princípio de funcionamento, ao circuito equivalente e ensaios para determinação de tais parâmetros. Foram analisadas também características de desempenho relevantes, como torque, potência e fator de potência, com objetivo de embasar e expor cálculos que serão utilizados tanto no *script* no ESP32 como no *script* em Python. Outro ponto de destaque apresentado é com relação a escolha dos sensores utilizados no protótipo, apresentando-se os diferentes modelos disponíveis e as características que levaram a escolha de determinados sensores.

Ainda foram expostas as principais características do ESP32, placa de prototipagem eletrônica escolhida para o projeto e da linguagem de programação Python. Por fim, analisou-se obras pertinentes ao tema do trabalho, demonstrando o

alinhamento do tema desenvolvido com o meio acadêmico e o possível nicho de mercado a ser explorado pelo mesmo.

No capítulo seguinte será abordada a metodologia do trabalho, com as etapas práticas a serem completadas a fim de atingir os objetivos propostos.

3 METODOLOGIA

Transcorrido o referencial teórico, no qual foram expostos os conteúdos relevantes do trabalho, bem como a definição dos sensores utilizados e dos materiais empregados, além do referencial bibliográfico em que foram evidenciados os principais trabalhos realizados na área, assim como resultados e considerações apresentadas, a metodologia busca expor as etapas seguintes, sendo a mesma desmembrada em seis partes. A Figura 33 traz de forma simplificada as 6 etapas do trabalho.

Figura 33 – Etapas do desenvolvimento prático



Fonte: O AUTOR (2022).

A partir de agora, serão detalhadas cada uma das seis etapas do projeto, descrevendo sua importância para o resultado final.

3.1 ANÁLISE E PROGRAMAÇÃO DE SENsoRES

Na primeira etapa, o objetivo é a familiarização com os sensores, programando-os e os testando na prática. Nesta etapa cada um dos sensores é testado e programado de forma individual, logo, seus resultados se darão de forma individual. Para realização dos testes, são utilizados simulações e equipamentos de medição pertinentes, como osciloscópio e tacômetro. Para a verificação dos resultados obtidos, a ferramenta *monitor serial*, disponível na IDE de programação é utilizada. A Figura 34 apresenta as rotinas de ensaio realizadas em cada um dos sensores.

Figura 34 – Etapa Um



Fonte: O AUTOR (2022).

Nesta primeira etapa, o objetivo principal é realizar a validação dos sensores, analisando se os seus valores de saída são compatíveis com as entradas do ESP32, sendo assim, o principal parâmetro avaliado é o de amplitude do sinal de saída dos sensores, tendo em vista que para o correto funcionamento do ESP32, os valores devem variar de 0 V até 3,3 V_{DC}.

3.2 DESENVOLVIMENTO MEDIDOR MONOFÁSICO DE ENERGIA

A segunda etapa busca realizar a integração dos sensores, utilizando de forma conjunta o medidor de corrente e o medidor de tensão. Dessa forma, através da medição de ambas as grandezas, é possível determinar diferentes valores, como energia, potência, fator de potência. A fim de verificar o valor das grandezas, tanto medidas como calculadas, assim como na primeira etapa, será utilizada a ferramenta monitor serial, disponível na IDE de programação do ESP32 e seus valores são comparados com instrumentos comerciais disponíveis no laboratório de engenharia elétrica da UFSM-CS. A Figura 35 demonstra os passos realizados durante a Etapa dois.

Figura 35 – Etapa Dois



Fonte: O AUTOR (2022).

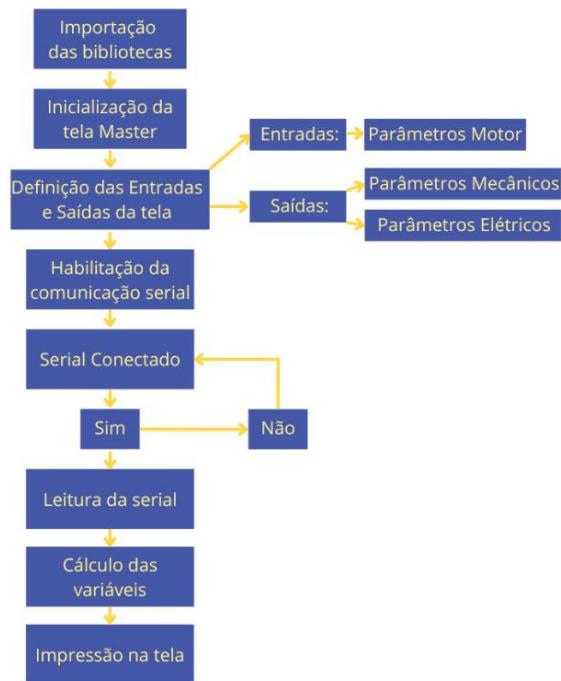
3.3 LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Na terceira etapa, o objetivo é o levantamento dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico. Para realização desta etapa, é utilizado o motor trifásico de indução, de 0,16CV, 380/220 V disponível no laboratório de conversão eletromecânica de energia da UFSM-CS. A partir das medições realizadas, é possível deduzir seu circuito equivalente através dos cálculos apresentados no referencial teórico. Serão realizados os ensaios de corrente contínua, ensaio de rotor bloqueado e o ensaio a vazio e ao final, são apresentados os valores do seu circuito equivalente.

3.4 DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO EM PYTHON

Na quarta etapa, a ferramenta Python será explorada, através da elaboração de um código protocolo com comunicação serial, para que seja possível realizar a integração entre o ESP32 e Python. Nesta etapa são realizados diversos testes, em que o ESP32 envia uma série de dados em uma única linha ao programa em Python. Após esta validação o código é aprimorado com a inserção de uma interface gráfica com auxílio da biblioteca Tkinter. O fluxograma reduzido do código final desenvolvido em Python para o analisador é apresentado na Figura 36.

Figura 36 – Fluxograma reduzido do código em Python



Fonte: O AUTOR (2022).

3.5 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO FINAL

A partir do teste dos sensores utilizados, bem como da comunicação via serial entre ESP32 e Python, a quinta etapa tem como objetivo unir as etapas anteriores, para a criação do protótipo. Nesta etapa, são inclusos três medidores de corrente, três medidores de tensão e um medidor de velocidade, ambos conectados ao ESP32, sendo os valores tanto medidos como calculados visualizados através de um

aplicativo desenvolvido em Python. Neste ponto do trabalho, com o código já desenvolvido em Python, é necessária a inclusão dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico, bem como, a escolha do modo de ligação do motor (estrela ou triângulo) para que, desta forma, as medidas de corrente e tensão sejam realizadas de forma adequada. Os medidores de tensão são utilizados para medições de tensões fase e neutro, enquanto cada medidor de corrente, lê o valor correspondente de sua fase. A partir destas medições são calculados indiretamente outros parâmetros, como torque, rendimento e fator de potência. A Figura 37 traz o detalhamento da Etapa 5.

Figura 37 – Etapa Cinco



Fonte: O AUTOR (2022).

3.6 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

A sexta etapa busca comparar os valores determinados pelo medidor com um analisador de energia. No laboratório da UFSM-CS encontra-se disponível o analisador de energia IMS PQ600, através do qual é possível realizar a leitura dos seguintes parâmetros elétricos:

- Tensão, com exatidão garantida de $\pm 0,25\%$ do valor lido;
- Corrente com exatidão garantida de $\pm 0,25\%$ do valor lido;
- Potência com exatidão garantida de $\pm 0,50\%$ do valor lido;
- Fator de potência com exatidão garantida de $\pm 0,50\%$ do valor lido.

Os valores de exatidão apresentados constam no manual técnico do produto.

Para avaliar o desempenho do analisador proposto, serão coletadas amostras simultaneamente, do analisador proposto e do analisador IMS PQ600. Posteriormente, são analisados os valores de erro absoluto máximo e mínimo, que podem ser determinados através da Equação 53.

$$E_A = |x - \bar{x}| \quad (53)$$

Em que, o valor de x simboliza o valor lido no analisador IMS PQ600 e o valor \bar{x} simboliza o valor lido no analisador desenvolvido. O valor do erro absoluto será máximo quando se obtiver o maior valor na diferença entre os valores lidos, e o erro absoluto mínimo se dará quando a diferença entre as medidas for mínima. Será também avaliado o erro médio absoluto, que verifica qual é o valor médio dos erros absolutos encontrados durante a amostragem. O cálculo é realizado através da Equação 54.

$$E_{AM} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i| \quad (54)$$

Além disso, também são coletados os valores de erros médios percentuais relativos, determinados através da Equação 55.

$$E_{RM} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - \bar{x}_i|}{x_i} \cdot 100\% \quad (55)$$

Onde o valor de n simboliza o número de amostras coletadas. Através das análises realizadas, é possível determinar o nível de confiança do analisador proposto, bem como analisar possíveis falhas que podem ser aprimoradas.

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, serão exploradas as 5 primeiras etapas descritas na metodologia, que buscam realizar as montagens e testes necessários para o desenvolvimento do protótipo final.

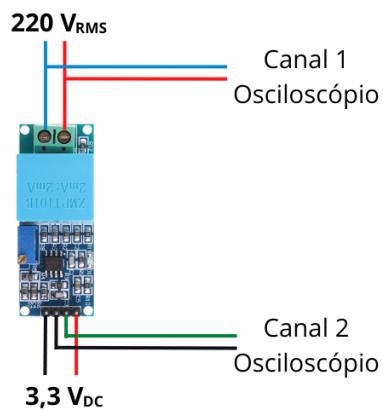
4.1 ANÁLISE E PROGRAMAÇÃO DE SENSORES

A primeira etapa visa validar o funcionamento independente de cada sensor escolhido, de modo a validar o seu funcionamento, compreendendo seu *range* de atuação e suas restrições.

4.1.1 Sensor de Tensão

O teste inicial foi realizado com o módulo sensor de tensão ZMPT101B, em que se conectou seus terminais de entrada a rede alternada de $220 \text{ V}_{\text{RMS}}$. Com auxílio de um osciloscópio, foi possível analisar as formas de onda sobre o módulo, tanto de entrada como de saída, sendo o módulo alimentado com $3,3 \text{ V}_{\text{DC}}$. A Figura 38 demonstra a montagem realizada.

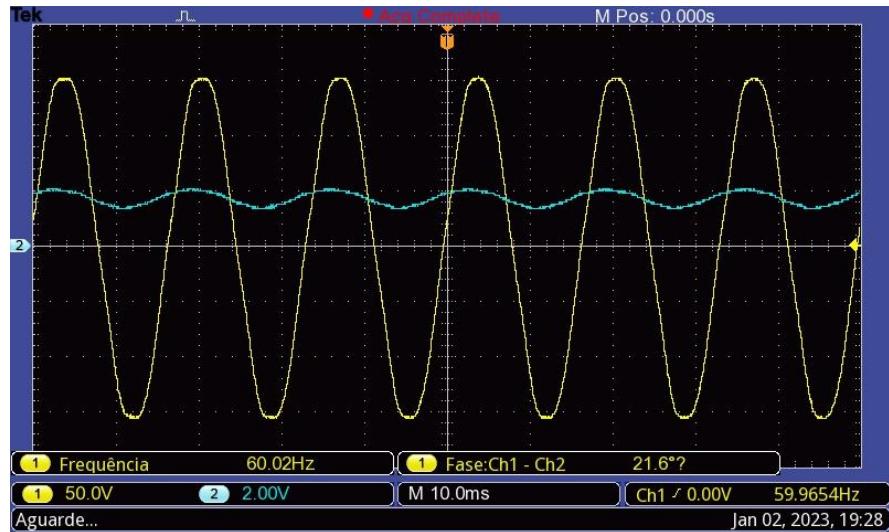
Figura 38 – Montagem para verificação do sinal do sensor



Fonte: O AUTOR (2022).

A Figura 39 apresenta as formas de onda visualizadas no osciloscópio.

Figura 39 – Medida do osciloscópio do módulo sensor de tensão



Fonte: O AUTOR (2022).

Analizando-se a Figura 39, dois pontos relevantes merecem atenção sendo o primeiro o valor de tensão na saída do módulo que se comportou de maneira esperada. A tensão de saída não superou 3,3 V_{DC}, sendo este o limite da porta de entrada analógica do ESP32. Porém, é possível visualizar uma diferença de ângulo de fase de aproximadamente 20° entre a onda de entrada e a onda de saída. Embora essa diferença não gere problemas significativos no valor do módulo da tensão, pode causar grande impacto na leitura do fator de potência do sistema. É importante destacar que esta diferença no ângulo de fase decorre de um filtro ativo passa-baixa de ordem 1 presente no módulo.

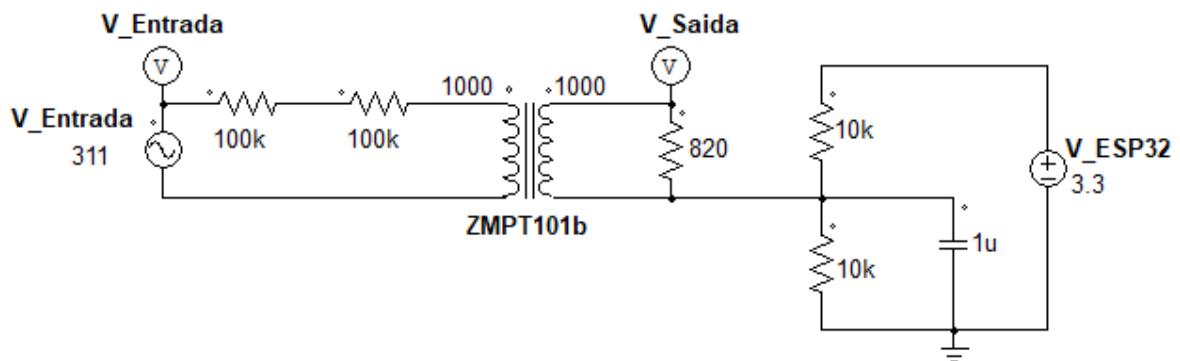
De forma a evitar problemas futuros envolvendo a diferença do ângulo de fase encontrada, optou-se pela implementação de um medidor de tensão, utilizando-se o transformador de corrente ZMPT101b, o mesmo presente no módulo. O circuito utilizado é apresentado na Figura 40, em que dois resistores de 100 kΩ em série são conectados ao primário do transformador (foram utilizados dois resistores em série de modo que a potência dissipada sobre cada um deles fosse reduzida, utilizando-se dessa maneira resistores de ¼ W). De acordo com o *datasheet* do transformador (neta-USA, 2020) a Equação 56 define o valor de tensão no secundário do transformador.

$$V_{\text{secundário}} = \frac{V_{\text{primário}}}{R_{\text{primário}}} \cdot R_{\text{secundário}} \quad (56)$$

De modo a obter um circuito com maior segurança, definiu-se uma tensão no secundário de 2,5 V de pico a pico, quando no primário, a tensão de pico atingisse 311 V. Dessa forma, o valor do resistor de saída é determinado com o reagrupamento dos termos da Equação 56, levando-se em consideração que a tensão de entrada de pico deve ser multiplicada por 2, devido ao semi-ciclo positivo e ao semi-ciclo negativo.

Desse modo, determinou-se o valor de resistência no secundário de $803,85 \Omega$. O resistor comercial mais próximo disponível é de 820Ω , sendo, portanto, utilizado. Assim, o valor de tensão sobre os terminais do resistor do secundário, irá variar aproximadamente de -1,25 V até +1,25 V. Como o microcontrolador não permite a leitura de valores negativos de tensão, inseriu-se um off-set no circuito, de modo a deslocar a forma de onda obtendo somente valores positivos de tensão. Para isso foram utilizados dois resistores em série de $10 k\Omega$ cada, sendo os mesmos alimentados com $3,3 V_{DC}$ disponíveis no ESP32. Assim, do ponto médio dos resistores conectou-se um terminal do resistor secundário calculado, sendo o outro pino do resistor do secundário conectado a entrada do ESP32. Como os resistores tem valores idênticos, o off-set corresponde à metade da tensão do ESP32, ou seja, $1,65 V_{DC}$, assim, o valor de tensão na porta de entrada do ESP varia de aproximadamente 0,4 V até 2,9 V. A Figura 40 demonstra o circuito proposto.

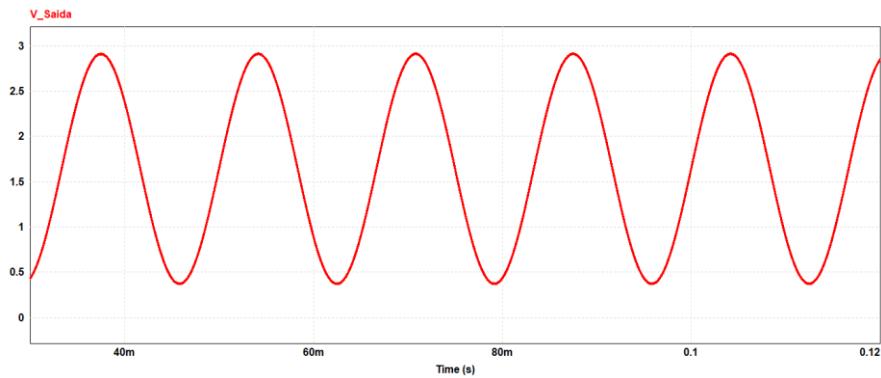
Figura 40 – Circuito para medição de tensão



Fonte: Adaptado de Neta, (2022).

Para validar o circuito proposto, realizou-se a simulação do mesmo no software PSIM, sendo que a Figura 41 demonstra o comportamento da tensão de saída quando na entrada a tensão é de $220 V_{RMS}$.

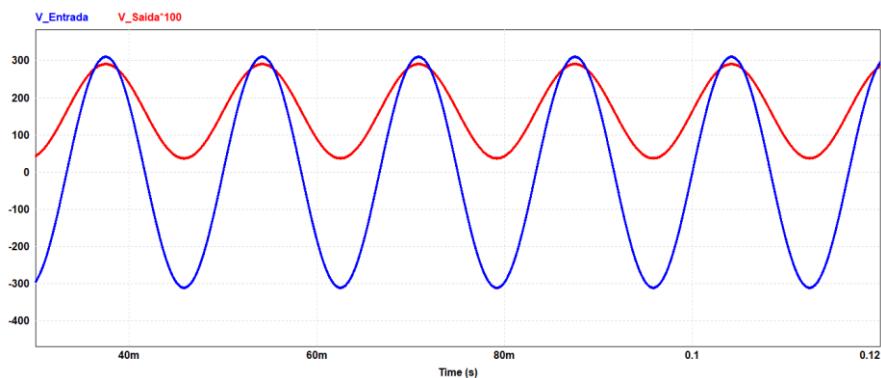
Figura 41 – Forma de onda simulada na saída do circuito



Fonte: O AUTOR (2022).

Comparando-se o sinal de entrada e o sinal de saída, é possível verificar, que ao contrário do módulo, inicialmente analisado, no novo sensor a onda de saída tem o mesmo ângulo de fase que a onda de entrada, tornando seu resultado mais atrativo ao trabalho. A Figura 42 confirma a constatação, em que o sinal de saída foi aumentado em 100 vezes para que a comparação fosse possível.

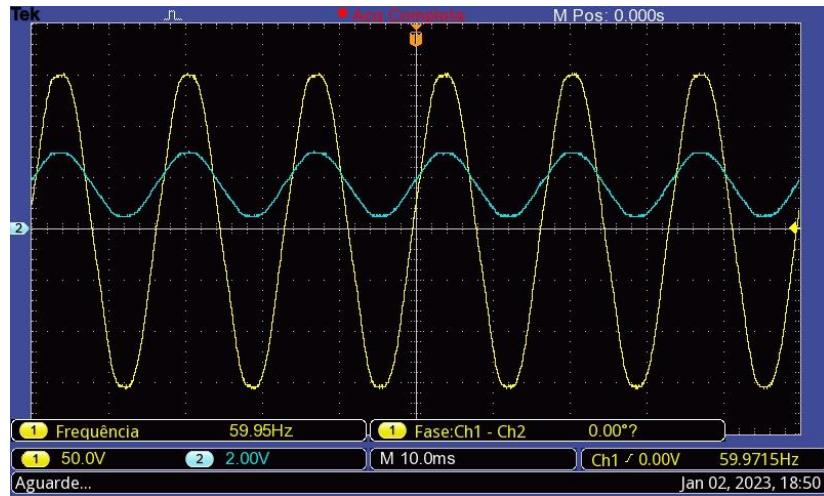
Figura 42 – Forma de onda simulada na entrada e saída do circuito



Fonte: O AUTOR (2022).

Realizada a montagem prática do circuito, é possível analisar, através da Figura 43, com auxílio de um osciloscópio, que as duas ondas estão em fase, e a amplitude da onda de saída é inferior a 3,3 V.

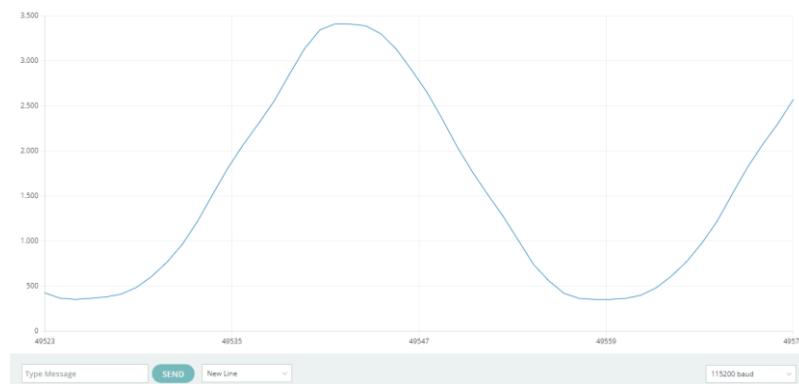
Figura 43 – Medida do osciloscópio do circuito proposto



Fonte: O AUTOR (2022).

Dessa forma, com a comprovação do seu funcionamento, conectou-se o sensor à entrada analógica do ESP32. Com o comando *analogRead()* realizou-se a medição do pino em que foi conectado o sensor e, com o auxílio do monitor serial, foi possível visualizar a onda de entrada, através do comando *Serial.print()*, conforme demonstra a Figura 44.

Figura 44 – Forma de onda lida pelo ESP32 – Sensor de tensão



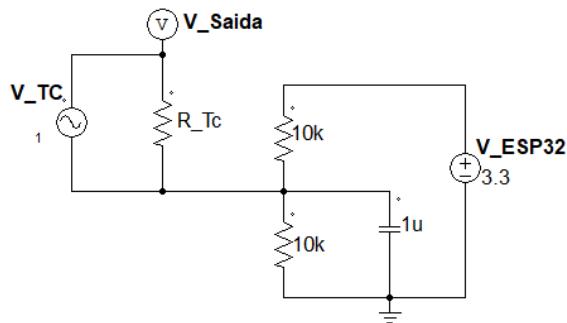
Fonte: O AUTOR (2022).

4.1.2 Sensor de Corrente

O segundo sensor testado foi o de corrente, o SCT013-020. Com capacidade de medir correntes de até 20 A_{RMS}, o sensor, que em sua essência é um transformador. Apresenta na saída ± 1 V com sua corrente nominal no primário. Como

sua saída apresenta valores negativos de tensão, devido ao semi-ciclo negativo da onda alternada, se torna necessário, assim como no circuito do sensor de tensão, condicionar o sinal de forma a não se obter valores negativos de tensão, que são incompatíveis com o microcontrolador. Assim, inseriu-se um *off-set* no circuito, de modo idêntico ao circuito do sensor de tensão, sendo seu circuito final apresentado na Figura 45.

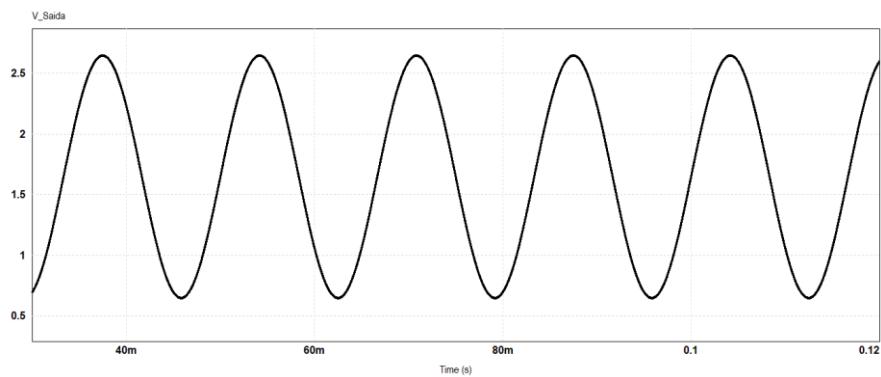
Figura 45 – Circuito para medição de corrente



Fonte: Adaptado de OpenEnergyMeter, (2022).

Posteriormente, simulou-se o circuito apresentado na Figura 45 no software PSIM, supondo a corrente nominal no primário. Na Figura 46 é apresentada a forma de onda resultante.

Figura 46 – Forma de onda simulada quando a corrente do primário é de 20 A

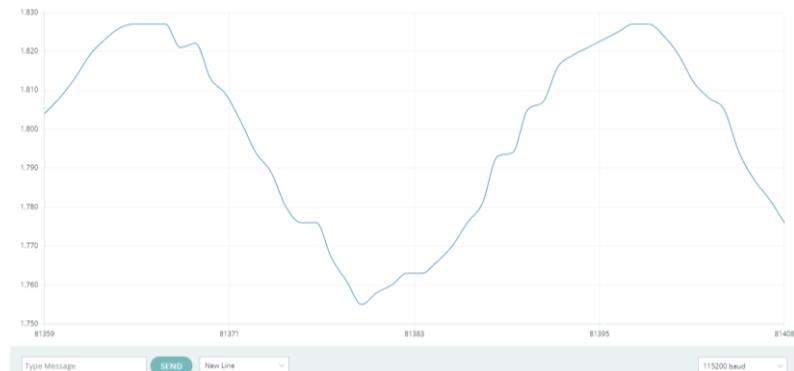


Fonte: O AUTOR (2022).

Dessa forma, com a comprovação do seu funcionamento, conectou-se o sensor a entrada analógica do ESP32. Com o comando *analogRead()* realizou-se a medição do pino em que foi conectado o sensor, e com o auxílio do monitor serial foi possível

visualizar a onda de entrada, através do comando `Serial.print()`, validando seu funcionamento, conforme demonstra a Figura 47.

Figura 47 – Forma de onda lida pelo ESP32 – Sensor de corrente



Fonte: O AUTOR (2022).

4.1.3 Sensor de Velocidade

O último sensor analisado foi o de velocidade, onde desenvolveu-se um *encoder*, impresso em impressora 3D, com 16 aberturas, sendo conectado ao eixo do motor. Para fixação do módulo sensor ao motor, projetou-se um suporte regulável, sendo o mesmo impresso em uma impressora 3D. A Figura 48 traz a montagem do sensor junto ao motor e a fixação do *encoder* ao acoplamento.

Figura 48 – Fixação do módulo sensor e do *encoder* no motor



Fonte: O AUTOR (2022).

Foi utilizada a função `attachInterrupt()`, presente no ESP32, que na essência conta o número de vezes que houve alteração no estado de um pino. Como o sensor de velocidade é digital, ou seja, quando não detecta nada sua saída é 0 V e quando detecta a passagem de um material sua saída é 3,3 V, para calcular a velocidade do motor, é suficiente contar o número de vezes que o sinal de entrada se altera e qual o tempo entre um sinal alto e um sinal baixo. Para validar o seu funcionamento, instalou-se o sensor e o *encoder* junto ao motor, e acoplou-se ao eixo do mesmo um módulo de carga variável CC, de modo a ser possível variar a carga no eixo do motor e por consequência variar a sua velocidade. Ainda, foi desenvolvido um código no ESP32, visando registrar o valor das Rotações Por Minuto (RPM). Para comparar a medida realizada pelo sensor com o valor real da velocidade, utilizou-se também um tacômetro digital. A Tabela 5 demonstra os valores encontrados durante o ensaio, tanto de velocidade medida via ESP32 e velocidade medida via tacômetro digital.

Tabela 5: Medidas de velocidade

Medida	ESP32	Tacômetro	Erro Absoluto	Erro Relativo (%)
1	1194 RPM	1193 RPM	1 RPM	0,08 %
2	1106 RPM	1105 RPM	1 RPM	0,09 %
3	1121 RPM	1123 RPM	2 RPM	0,18 %
4	1150 RPM	1148 RPM	2 RPM	0,17 %
5	1155 RPM	1157 RPM	2 RPM	0,17 %
6	1170 RPM	1171 RPM	1 RPM	0,09 %
7	1185 RPM	1183 RPM	2 RPM	0,17 %
8	1190 RPM	1191 RPM	1 RPM	0,08 %
9	1082 RPM	1079 RPM	3 RPM	0,28 %
10	1111 RPM	1108 RPM	3 RPM	0,27 %
11	1136 RPM	1134 RPM	2 RPM	0,18 %
12	1155 RPM	1153 RPM	2 RPM	0,17 %
13	1194 RPM	1195 RPM	1 RPM	0,08 %

Fonte: O AUTOR (2022).

4.2 DESENVOLVIMENTO MEDIDOR MONOFÁSICO DE ENERGIA

Na primeira etapa validou-se a medição dos instrumentos utilizados, adequando-se seus valores de amplitude e de fase, de modo a garantir a correta

operação do ESP32. Na segunda etapa, desenvolveu-se um *sketch* para realização de um monitor de energia monofásico, com auxílio da biblioteca EmonLib.h, criada pelo projeto Open Energy Monitor, sendo o mesmo uma comunidade *open source* voltada a criação de projetos envolvendo medição de energia elétrica. Para criação de um monitor de energia, com o auxílio da biblioteca, é necessário criar uma instância no *sketch*, no caso denominada EnergyMonitor.emon1. Posteriormente, no *loop* do programa, é inicializada a função que realiza os cálculos de corrente, tensão, potência ativa, potência aparente e fator de potência. A função foi denominada de emon1.calcVI e nela são inseridos dois parâmetros:

- *Number of wavelengths*: o número de meio comprimentos de onda que serão analisados por ciclo;
- *Time-Out*: o tempo máximo para realização dos cálculos.

No medidor desenvolvido, o valor de *number of wavelengths* foi definido como 100, ou seja, o cálculo é realizado a cada 100 meios comprimentos de onda, sendo amostrados 53 pontos a cada ciclo, ou seja, a cada onda e o tempo máximo para realização dos calculados foi de 150 ms.

Ainda, no *setup* do programa, são realizadas as definições a respeitos dos sensores de corrente e de tensão.

Ao definir-se a entrada de corrente, são necessários dois valores:

- *Input pin*: O pino no qual está conectado o sensor de corrente;
- *Calibration*: Uma constante que informa ao programa por qual valor deve ser multiplicada a corrente calculada, tendo em vista que o ESP32 suporta apenas 3,3 V em sua entrada;

Para o medidor, utilizou-se a porta de entrada 12 do ESP32 como entrada de corrente. Para o valor de calibração, o valor determinado foi de 21,25. Para obter-se o presente valor, utilizou-se como auxílio um amperímetro digital. Dessa forma, conectou-se o amperímetro em série com um circuito de cargas resistivas, conectando-se também o sensor de corrente ao circuito. Assim, com a assistência do monitor serial verificou-se o valor de corrente calculado pelo medidor proposto, comparando-o com o valor apresentado no amperímetro. Alterou-se os valores de *calibration* até que o valor lido no monitor serial fosse o mais próximo possível do valor apresentado no amperímetro.

De maneira semelhante, ao definir-se a entrada de tensão, são necessários três valores:

- *Input pin*: O pino no qual está conectado o sensor de tensão;
- *Calibration*: Uma constante que informa ao programa por qual valor deve ser multiplicada a tensão calculada, tendo em vista que o ESP32 suporta apenas 3,3 V em sua entrada;
- *Phase shift*: Uma constante que desloca no tempo a forma de onda amostrada, utilizada para corrigir o fator de potência do medidor.

Para o medidor monofásico, utilizou-se o pino 14 do ESP32 como entrada de tensão e como valor de calibração, utilizou-se 243. Para obter o valor de 243 conectou-se o sensor de tensão a rede elétrica, aferindo-se o valor da tensão com um multímetro digital e analisando-se em paralelo através do monitor serial o valor de tensão calculado. Alterou-se o valor da constante de calibração até o ponto que o valor apresentado no monitor serial fosse o mais próximo possível do valor apresentado no multímetro, ou seja, 220 V. Para determinar o valor de *phase shift*, aferiu-se os valores de corrente e tensão uma carga puramente resistiva (lâmpada incandescente), tendo em vista que o fator de potência desta carga é unitário. Assim, novamente através do monitor serial aferiu-se o valor de fator de potência calculado pelo *software*, alterando-se o valor de *phase shift* até que o monitor serial apresentasse fator de potência unitário. O valor de *phase shift* encontrado foi de 3,4.

Como o analisador implementado é trifásico, foi realizado o procedimento de declaração e calibração de cada um dos três sensores de corrente e dos três sensores de tensão, criando-se dessa maneira três medidores monofásicos, mantendo-se o cuidado de enumerar os sensores, de modo que alguns fatores, como resistência do TC e valor dos resistores do sensor de tensão podem sofrer uma variação de um equipamento para outro, não tendo desse modo, a mesma calibração. A Tabela 6 traz um resumo dos parâmetros determinados em cada um dos sensores.

Tabela 6: Parâmetros dos sensores de corrente e tensão

Medidor	emon1		emon2		emon3	
Parâmetro	Tensão	Corrente	Tensão	Corrente	Tensão	Corrente
<i>Input Pin</i>	14	12	25	26	34	35
<i>Calibration</i>	242	21,25	352	21,5	246	20,2
<i>Phase shift</i>	3,4	-	0,5	-	3,4	-

Fonte: O AUTOR (2022).

Para validar os medidores e os parâmetros utilizados, utilizou-se uma bancada de cargas resistivas (lâmpadas) monofásicas, e conectou-se todos os sensores de tensão e os sensores de corrente a referida carga. Conectou-se ainda ao circuito um multímetro na função de amperímetro e um multímetro na função de voltímetro, além de um wattímetro na função de fator de potência, de modo a serem as medidas de referência, conforme demonstra a Figura 49.

Figura 49 – Ensaio para medição de corrente e tensão



Fonte: O AUTOR (2022).

Variou-se o valor de potência da carga através de inclusão e/ou retirada de lâmpadas, sendo os valores de corrente, tensão, fator de potência e erro relativo em cada fase apresentados nas Tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7: Calibração Fase U

Medida de Referência			Medida ESP32 Fase U					
Tensão (V)	Corrente (A)	FP	Tensão		Corrente		Fp	
			Valor Lido (V)	Erro Relativo	Valor Lido (A)	Erro Relativo	Valor Lido	Erro Relativo
218,6	0,469	0,99	217,7	0,41 %	0,47	0,21 %	1,00	1,01 %
217,5	0,950	0,99	217,2	0,14 %	0,95	0 %	1,00	1,01 %
216,8	1,409	0,99	216,5	0,14 %	1,41	0,07 %	1,00	1,01%
216,5	1,581	0,99	216	0,23 %	1,58	0,06 %	1,00	1,01 %

Fonte: O AUTOR (2022).

Tabela 8: Calibração Fase V

Medida de Referência			Medida ESP32 Fase V					
Tensão (V)	Corrente (A)	FP	Tensão		Corrente		Fp	
			Valor Lido (V)	Erro Relativo	Valor Lido (A)	Erro Relativo	Valor Lido	Erro Relativo
218,6	0,469	0,99	217,2	0,64 %	0,48	2,35 %	0,96	3,03 %
217,5	0,950	0,99	216,8	0,32 %	0,96	1,05 %	0,96	3,03 %
216,8	1,409	0,99	216,2	0,28 %	1,41	0,07 %	0,97	2,02 %
216,5	1,581	0,99	215,4	0,51 %	1,60	1,20 %	0,96	3,03 %

Fonte: O AUTOR (2022).

Tabela 9: Calibração Fase W

Medida de Referência			Medida ESP32 Fase W					
Tensão (V)	Corrente (A)	FP	Tensão		Corrente		Fp	
			Valor Lido (V)	Erro Relativo	Valor Lido (A)	Erro Relativo	Valor Lido	Erro Relativo
218,6	0,469	0,99	220,0	0,64 %	0,47	0,21 %	1,00	1,01 %
217,5	0,950	0,99	219,0	0,69 %	0,93	2,10 %	1,00	1,01 %
216,8	1,409	0,99	218,2	0,65 %	1,36	3,48 %	1,00	1,01 %
216,5	1,581	0,99	218	0,69 %	1,54	2,59 %	1,00	1,01 %

Fonte: O AUTOR (2022).

Através das medidas realizadas, é notável que o erro relativo encontrado durante as medições é baixo, sendo o pior caso encontrado na medição da fase W, quando na medida padrão determinou-se 1,409 A, já na medida com o ESP32 o valor encontrado foi de 1,36 A, ocasionando um erro relativo de 3,48%, que representa 0,049 A. Além disso, é perceptível durante a medição do fator de potência na fase V uma pequena discrepância do seu valor com as demais fases, o que porém, não se trata de um erro crítico.

4.3 LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Etapa importante para o desenvolvimento do trabalho, a aquisição dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico de 0,16 CV foi realizado junto ao laboratório do curso de engenharia elétrica da UFSM-CS. A placa com os dados pertinentes ao motor analisado é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Dados de placa do motor analisado

Dado	Valor
Tensão	220/380 V
Corrente	0,834/0,483 A
Potência	0,16 CV
Velocidade Nominal	1200 RPM
Rendimento Nominal	64%
Fator de Potência	0,59

Fonte: O AUTOR (2022).

Foram realizados os ensaios de tensão CC para encontrar a resistência do estator, ensaio com rotor bloqueado para determinar o valor das reatâncias do estator e do rotor e o ensaio a vazio para determinar a reatância do ramo de magnetização e a resistência do rotor. Os instrumentos utilizados para realização das práticas são apresentados na Figura 50.

Figura 50 – Instrumentos utilizados para determinar os parâmetros do circuito equivalente



Fonte: O AUTOR (2022).

Todos os procedimentos necessários para a obtenção dos parâmetros do circuito equivalente foram enunciados durante o referencial teórico, e os cálculos realizados para a obtenção dos resultados bem como as medidas realizadas se encontram disponíveis no Apêndice A desse documento, de modo que a Tabela 11 traz o resumo do valor dos parâmetros determinados.

Tabela 11: Parâmetros do circuito equivalente do motor analisado

Parâmetro	Valor (Ω)
R1	72,15 Ω
R2	39,51 Ω
j.X1	68,98 Ω
j.X2	68,98 Ω
j.Xm	439,90 Ω

Fonte: O AUTOR (2022).

O cálculo dos valores equivalentes do circuito de motor de indução trifásico são fundamentais ao projeto, tendo em vista que para realização de cálculos como rendimento e torque, é necessário o conhecimento prévio desses parâmetros. Assim destaca-se a importância de consolidar a metodologia de ensaios e cálculos afim de se obter o circuito equivalente de um motor de indução trifásico.

4.4 DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO EM PYTHON

No trabalho, o programa desenvolvido na linguagem Python tem a função de demonstrar ao usuário os valores medidos através do ESP32, ele é responsável pela Interface Homem Máquina (IHM) do projeto. Desse modo, é importante que a interface seja simples e autoexplicativa. Se encontram disponíveis diversas bibliotecas gráficas a serem utilizadas junto ao Python, optando-se no trabalho pela utilização da biblioteca Tkinter, sendo a mesma nativa do programa.

A partir da seleção da biblioteca, cria-se uma tela principal, no programa denominada Master = Tk(). Como o programa proposto possui apenas uma tela, a partir dela são inseridos todos os blocos, seja de entrada, ou de saída do programa.

De modo a facilitar ao usuário no momento de preenchimento dos dados, optou-se pela cor amarela nas caixas de texto em que devem ser inseridos valores. Foram utilizados 3 modos distintos de entradas no programa desenvolvido, sendo:

- *Entry*: são entradas de texto;
- *Button*: são botões em que o usuário tem a opção de clicar;
- *CheckButton*: são botões de checagem, que podem ou não ser marcados.

Já para as funções de saída do programa, que se constituem na sua totalidade por saídas de texto, utilizou-se a cor de fundo azul, sendo que para inseri-las no código utilizou-se a função *Label*.

De modo a realizar a conexão entre o *script* em Python e dados recebidos via ESP32, fez-se a utilização da biblioteca Serial disponível na linguagem Python. A partir dela e dos dados de entrada fornecidos pelo usuário, cria-se uma comunicação serial entre os dispositivos a partir da porta COM selecionada, com um *Baud Rate* de 1152000 bps. O comando *read.line()* permite ao *script* realizar a leitura da linha advinda via comunicação serial. Em cada linha do serial proveniente do ESP32 se encontram 16 valores distintos, enviados através do comando *Serial.print()*, sendo que o primeiro valor corresponde a velocidade, do segundo ao sexto são valores da fase U, do sétimo ao décimo primeiro são valores da fase V e do décimo segundo ao décimo sexto são valores da fase W, conforme demonstra a Figura 51.

Figura 51 – Valores recebidos via serial

		Fase U					Fase V					Fase W				
Posição	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Variável	RPM	P_U	S_U	V_U	I_U	Fp_U	P_V	S_V	V_V	I_V	Fp_V	P_W	S_W	V_W	I_W	Fp_W

Fonte: O AUTOR (2022).

Como o valor de cada variável é separado por um espaço “ “, utiliza-se o comando *split*, no código em Python para “quebrar” o serial recebido. Dessa forma, cria-se um vetor com 16 posições, sendo cada posição correspondente a uma variável lida.

Assim torna-se simples a manipulação das variáveis, tendo em vista que são isoladas. No código desenvolvido, são calculados uma série de valores, apresentados a seguir:

- Correntes de fase: Caso o motor seja conectado em triângulo, é necessário dividir por $\sqrt{3}$ o valor de corrente medido, de modo a se obter uma leitura de fase, conforme seção 3.4;

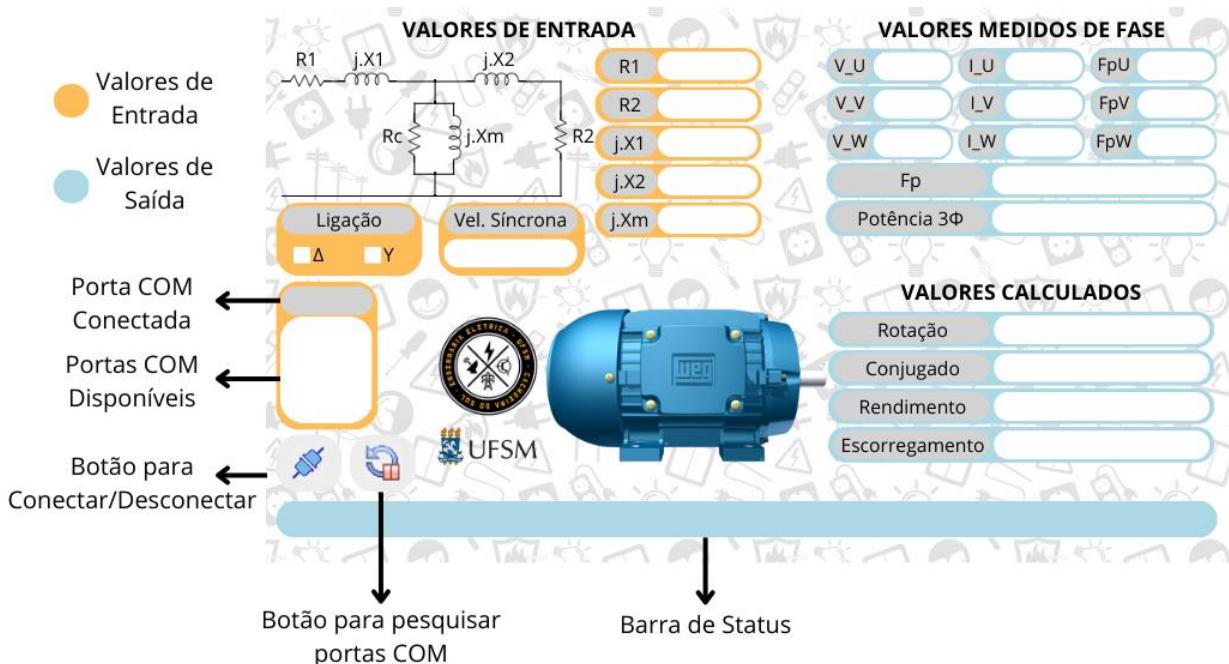
- Fator de potência: Caso o motor seja conectado em triângulo é necessário se diminuir o valor do ângulo de fator de potência em 30° , devido a diferença do fator de potência de linha e de fase;

- Potência Real Trifásica: Caso o motor seja conectado em estrela, a potência real total é a soma das potências medidas, caso contrário, é necessário calcular o seu valor para conexão em triângulo;

- Escorregamento: A partir do valor inserido de rotação síncrona e do valor de rotação instantânea do motor, é determinado seu escorregamento;
- Fator de potência trifásico: É calculado o valor total do fator de potência, levando-se em consideração a potência ativa e aparente trifásicas;
- Torque: O valor de torque é calculado através de parâmetros medidos e inseridos pelo usuário;
- Rendimento: O valor de rendimento é calculado através de parâmetros medidos e inseridos pelo usuário.

Além das etapas, de leitura e inserção de parâmetros, é necessária a realização de uma etapa burocrática para o correto funcionamento do software. Conforme demonstra a Figura 52, ao se conectar o ESP32 ao computador, deve-se clicar no botão de modo a pesquisar as portas COM disponíveis no computador, e assim que a porta em que o micro foi conectado for exibida na janela de portas disponíveis, deve-se clicar duas vezes na porta selecionada e ainda clicar no botão de conectar. Assim o programa está apto a ser utilizado e realizar leituras. Todos os códigos desenvolvidos durante o trabalho, bem como o arquivo executável do software se encontram disponíveis no repositório do GitHub através do link: <https://github.com/GustavoSteffen/TCC-GUSTAVO>.

Figura 52 – Interface do programa



Fonte: O AUTOR (2022).

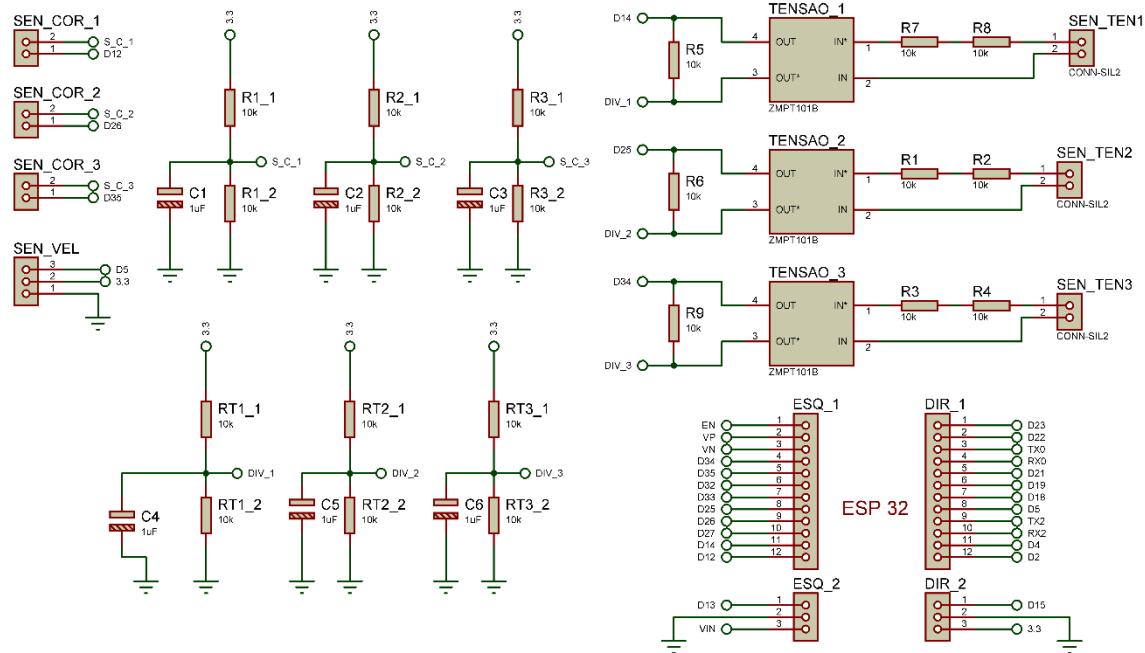
Além de todas as funcionalidades apresentadas, a biblioteca Tkinter permite ainda a inserção de alguns adornos ao programa, como: ícone, título, imagem de fundo e tamanho da tela.

De modo a facilitar a utilização do *software* pelos usuários, criou-se um arquivo executável. Desta forma, para que o *software* funcione, não é necessário que o usuário possua um compilador de Python em sua máquina, tornando assim o programa mais flexível.

4.5 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO FINAL

Após a validação dos sensores utilizados, e da confirmação da correta comunicação entre o ESP32 e o programa em Python via serial, desenvolveu-se uma placa de circuito impresso de modo a englobar todos os sensores em apenas um local. A Figura 53 demonstra o circuito eletrônico desenvolvido no software Proteus 8.0.

Figura 53 – Circuito eletrônico desenvolvido

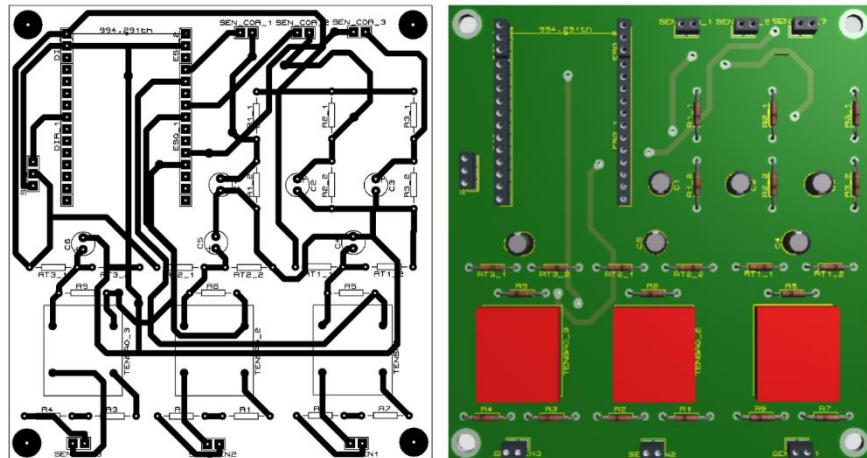


Fonte: O AUTOR (2022).

Todos os sensores são conectados a placa via conectores, e na placa estão os circuitos de instrumentação de cada modelo de sensor. A Figura 54 demonstra as trilhas da placa desenvolvida, que é de dupla face, contando com trilhas na sua face

inferior e superior. A Figura 54 apresenta ainda a visualização 3D da placa com os componentes.

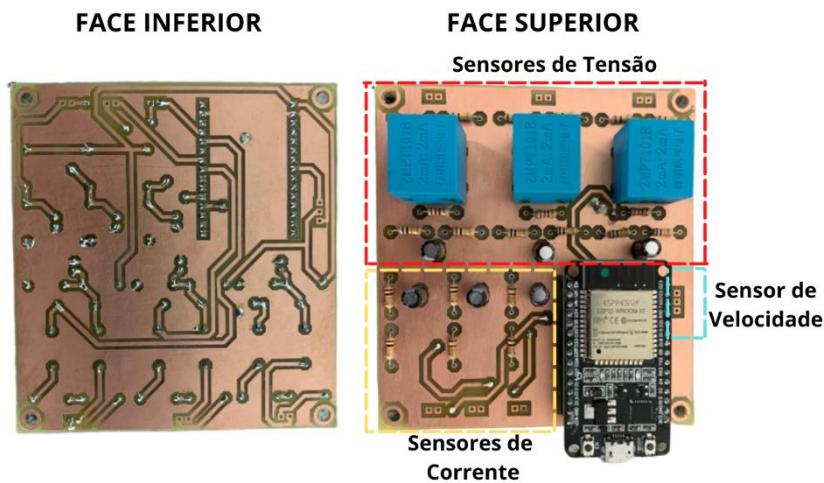
Figura 54 – Placa de circuito impresso desenvolvida



Fonte: O AUTOR (2022).

A placa foi desenvolvida com a fresadora disponível no laboratório do curso de Engenharia Elétrica da UFSM-CS e o resultado final é demonstrado na Figura 55.

Figura 55 – Montagem final da placa



Fonte: O AUTOR (2022).

De modo a proteger tanto a placa, como o usuário, com o auxílio da impressora 3D disponível no laboratório do curso de Engenharia Elétrica da UFSM-CS, produziu-se um suporte para a placa, sendo que em sua face frontal foram inseridos bornes para facilitar a conexão dos cabos e preservar a placa. Além disso, grifou-se na face

frontal o nome de cada sensor e sua numeração, de forma a facilitar a montagem do equipamento. A Figura 56 traz a versão final da case.

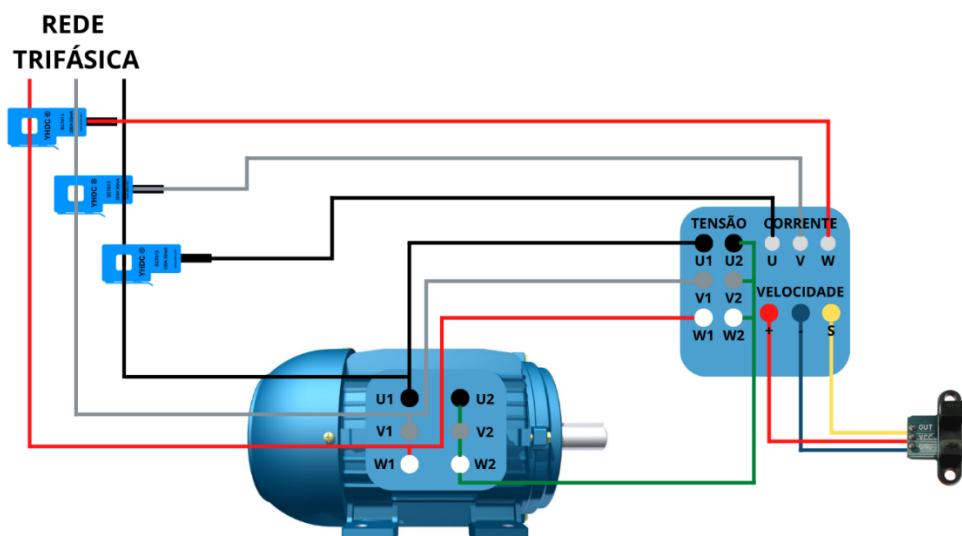
Figura 56 – Protótipo Final



Fonte: O AUTOR (2022).

O analisador, como já exposto, é projetado para operar com dois modos de conexão distintos: estrela e triângulo, sendo que a ligação dos cabos junto ao analisador difere para as ligações. Sendo assim, a Figura 57 traz as conexões que devem ser realizadas de modo ao analisador operar na ligação em estrela, quando o motor estiver na mesma configuração. É importar ressaltar, que nesse modo de conexão, é medida a tensão entre fase e neutro, pois uma tensão fase-fase ultrapassaria o limite do sensor de tensão proposto.

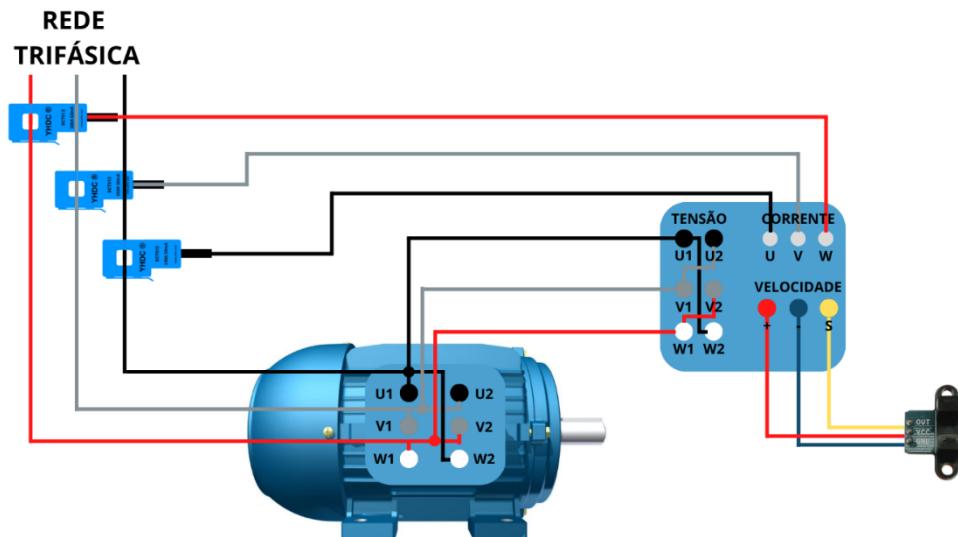
Figura 57 – Conexão do analisador em estrela



Fonte: O AUTOR (2022).

Já a Figura 58 demonstra as conexões que devem ser realizadas de modo ao analisador operar na ligação em triângulo, quando o motor estiver na mesma configuração.

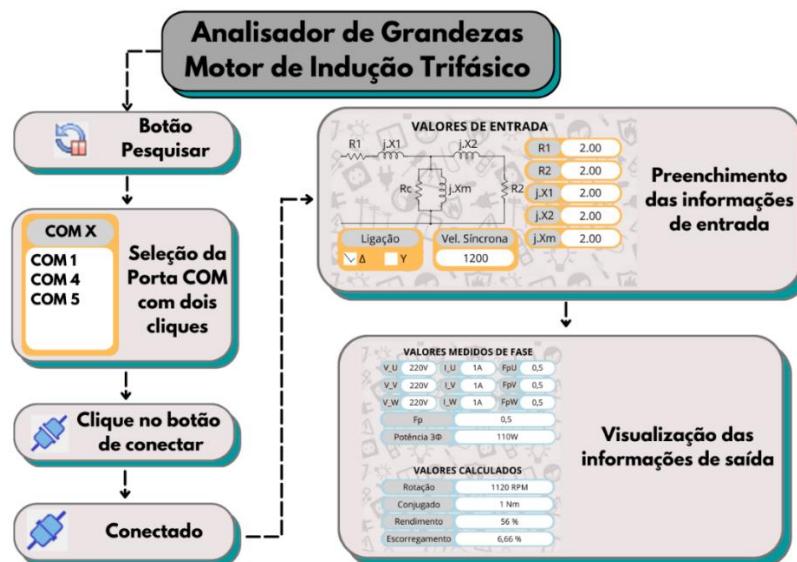
Figura 58 – Conexão do analisador em triângulo



Fonte: O AUTOR (2022).

Realizadas as conexões apropriadas de acordo com a ligação do motor, conecta-se o ESP32 em uma porta COM disponível no computador e segue-se os passos conforme a Figura 59 para o início do funcionamento do analisador.

Figura 59 – Passo a passo do funcionamento do analisador



Fonte: O AUTOR (2022).

É importante ressaltar, que caso o usuário não possua os valores de entrada referente ao motor a ser analisado, é possível executar o programa da mesma forma, embora alguns valores de saída, que dependem das variáveis inseridas pelo usuário não serão calculados, como o escorregamento, torque e rendimento, embora os valores de corrente, tensão, fator de potência, potência ativa e rotação estarão disponíveis para visualização.

5.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

Durante o capítulo foram realizadas abordagens a respeito do funcionamento do analisador desenvolvido, desde a validação dos sensores/circuitos de medição até o desenvolvimento dos códigos, tanto o código do ESP32, como o código em Python, para o funcionamento da componente gráfica do trabalho. Além disso foram expostas as conexões a serem realizadas no analisador nos modos distintos de operação, além de uma explicação do passo a passo do seu funcionamento.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A etapa 6 da metodologia tem como objetivo validar as medições do analisador desenvolvido, dessa forma foram realizados uma série de ensaios, tanto das medições elétricas, como mecânicas.

6.1 ENSAIOS ELÉTRICOS

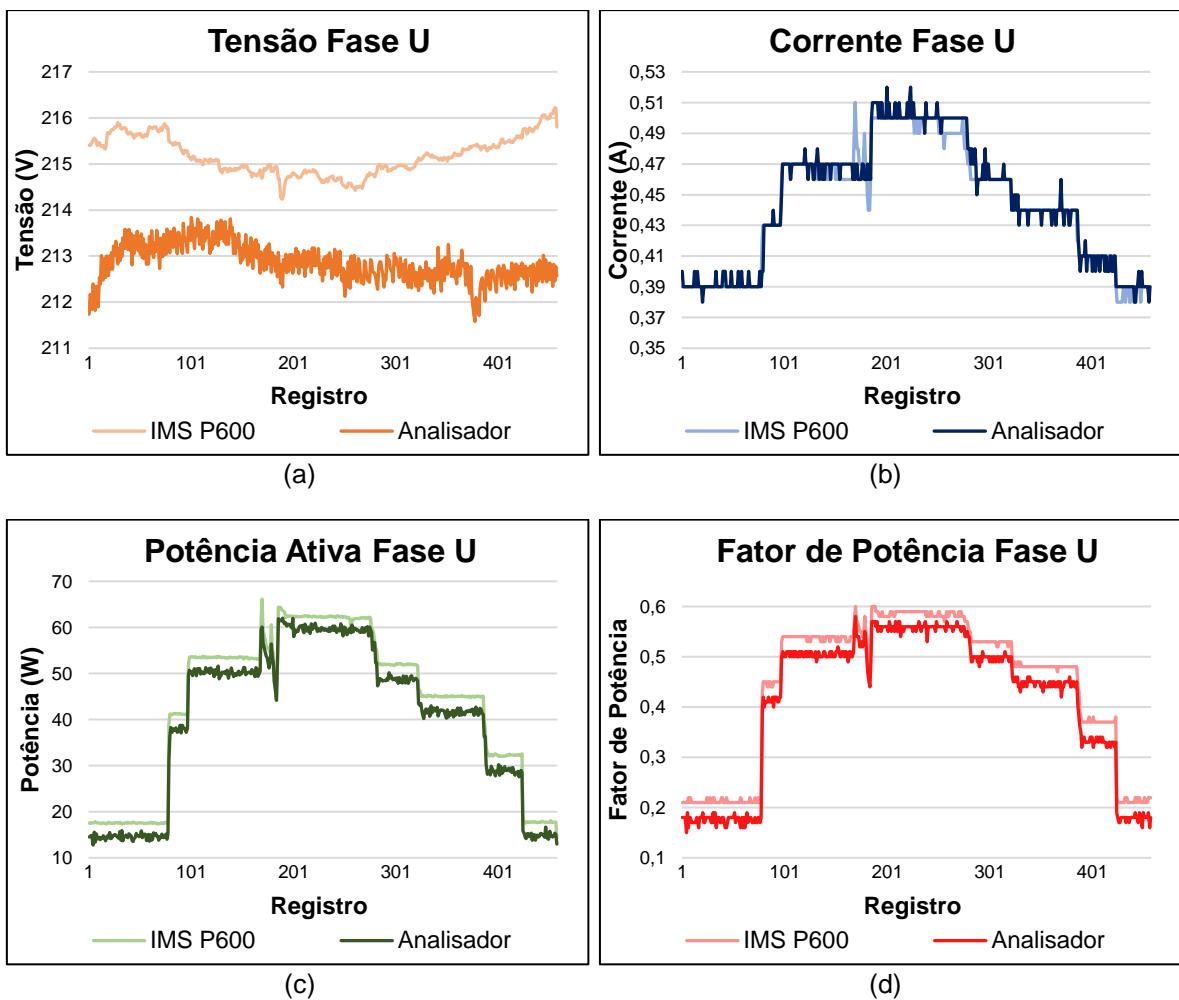
Para analisar a exatidão das medições obtidas com o analisador proposto, foram realizados dois ensaios com diferentes conexões do motor: estrela e triângulo.

No primeiro ensaio conectou-se o motor em estrela, com tensão entre fase-neutro de 220 V. Conectou-se ao eixo do motor um módulo de carga variável, de modo a simular diferentes condições de carga do motor. Para comparar as medidas realizadas, utilizou-se o analisador de energia IMS PQ600 disponível no laboratório do curso de engenharia elétrica da UFSM-CS. Neste ensaio, foram coletadas 458 amostras válidas no analisador IMS PQ600, sendo o intervalo de amostragem de 1s. Já no analisador desenvolvido, coletou-se o dobro de amostras, pois o intervalo entre amostras é de 0,5s. Para igualar o número de amostras, tendo em vista que as duas amostragens tiveram início no mesmo instante, descartou-se metade das amostras do analisador desenvolvido. Com o objetivo de viabilizar a comparação de resultados, leu-se uma amostra válida do analisador proposto e descartou-se a próxima, sendo validada a amostra subsequente e assim sucessivamente. Assim, as amostras resultantes do analisador desenvolvido foram realizadas no mesmo instante da amostra do analisador IMS PQ600. Para realizar a coleta de amostras do analisador desenvolvido, utilizou-se o software CoolTerm, que salva as amostragens em um arquivo em formato .TXT, gerando no total 916 amostras, sendo 458 válidas.

Foram analisados os valores de tensão, entre fase-neutro, corrente, potência ativa por fase e fator de potência em cada fase. As seções subsequentes trazem os resultados amostrados em cada fase, bem como uma tabela contendo os erros absolutos máximo e mínimos e o valor do erro médio percentual absoluto.

A Figura 60, traz um resumo dos valores medidos tanto no analisador IMS PQ600 como no analisador desenvolvido na fase U do sistema.

Figura 60 – Valores obtidos na fase U – Conexão estrela



Fonte: O AUTOR (2022).

É possível visualizar a partir de (a) da Figura 60, que o valor da tensão no analisador proposto variou entre a faixa de 211V e 214V, já do analisador IMS PQ600 variou entre 214V e 217V, constatando-se que a tensão no analisador desenvolvido esteve sempre abaixo do valor da tensão de referência. Já a Figura 60 (b) aponta uma grande similaridade entre as curvas de corrente medida pelos analisadores, sendo em alguns pontos inclusive difícil distinguir as duas curvas. A Figura 60 (c) indica um mesmo padrão de curva de potência ativa entre os analisadores, porém com a curva do analisador desenvolvido ligeiramente menor. Isso é justificado pela sua tensão menor medida e também pelo seu menor fator de potência medido, como é evidenciado na Figura 60 (d). A Tabela 12 demonstra os valores de erros calculados para as medidas através das Equações 53, 54 e 55.

Tabela 12 – Erros de medida Fase U – Conexão estrela

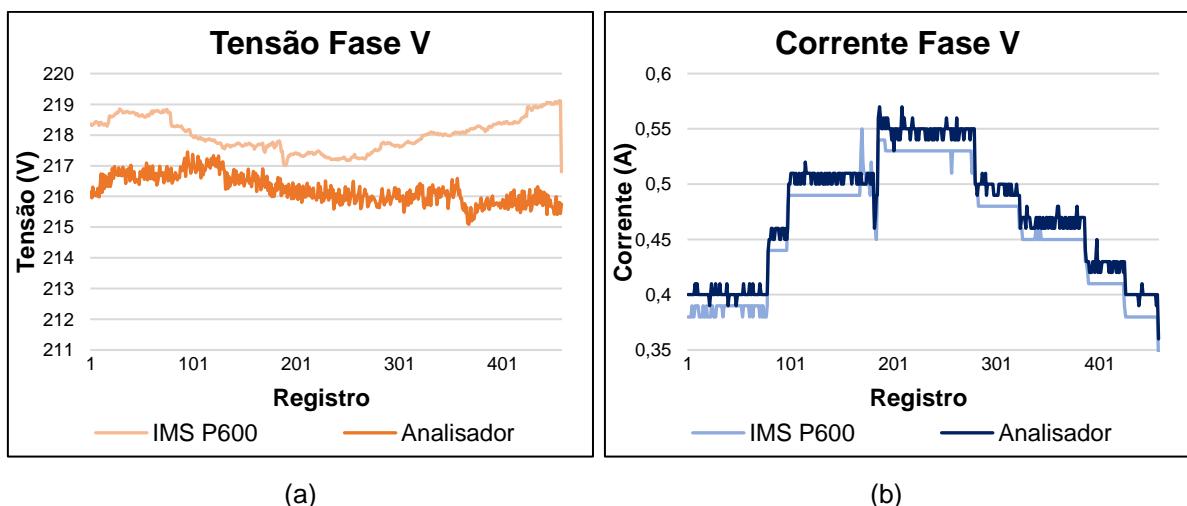
	Erro Min.	Erro Máx	Erro Médio	Erro Médio
	Abs.	Abs.	Abs.	% Rel.
Tensão	1,09 V	3,83 V	2,32 V	1,08 %
Corrente	0,00 A	0,05 A	0,004 A	0,92 %
Potência Ativa	0,01 W	7,71 W	3,01 W	8,84 %
Fator de Potência	0,01	0,06	0,03	8,98 %

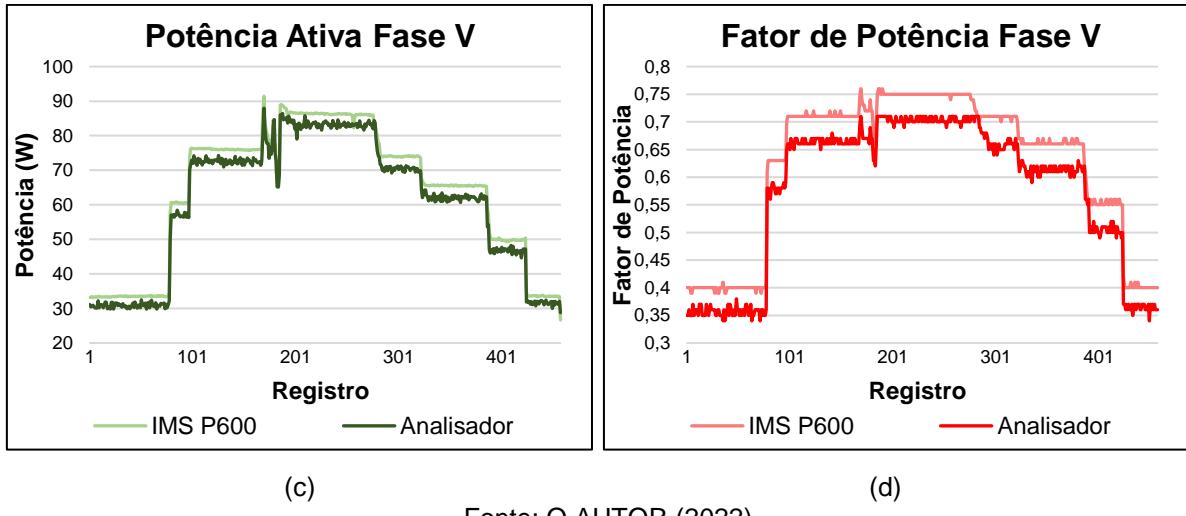
Fonte: O AUTOR (2022).

A partir da Tabela 12 é possível observar que o valor de erro, tanto o médio absoluto como o médio percentual relativo estiveram baixos nas medidas de tensão e corrente, sendo um bom resultado. Porém, tanto na potência ativa como no fator de potência, os erros médios relativos foram superiores a 8%. Apesar de não ser um resultado excelente, ao analisar-se o erro médio absoluto, é possível verificar que o desvio médio absoluto na potência foi de apenas 3,01W. Já no fator de potência de 0,03. Em ambos os casos, são resultados plausíveis. O erro médio relativo teve valores maiores devido aos valores pequenos de potência ativa e fator de potência medidos, dessa forma, pequenos erros geram elevadas porcentagens.

A Figura 61, traz um resumo dos valores medidos tanto no analisador IMS PQ600 como no analisador desenvolvido na fase V do sistema.

Figura 61 – Valores obtidos na fase V – Conexão estrela





Fonte: O AUTOR (2022).

A análise da Figura 61 é semelhante a análise realizada na fase U, sendo que na fase V foram medidos valores maiores de tensão e de potência ativa comparados a fase U. A Tabela 13 demonstra os valores de erros calculados para as medidas.

Tabela 13 – Erros de medida Fase V – Conexão estrela

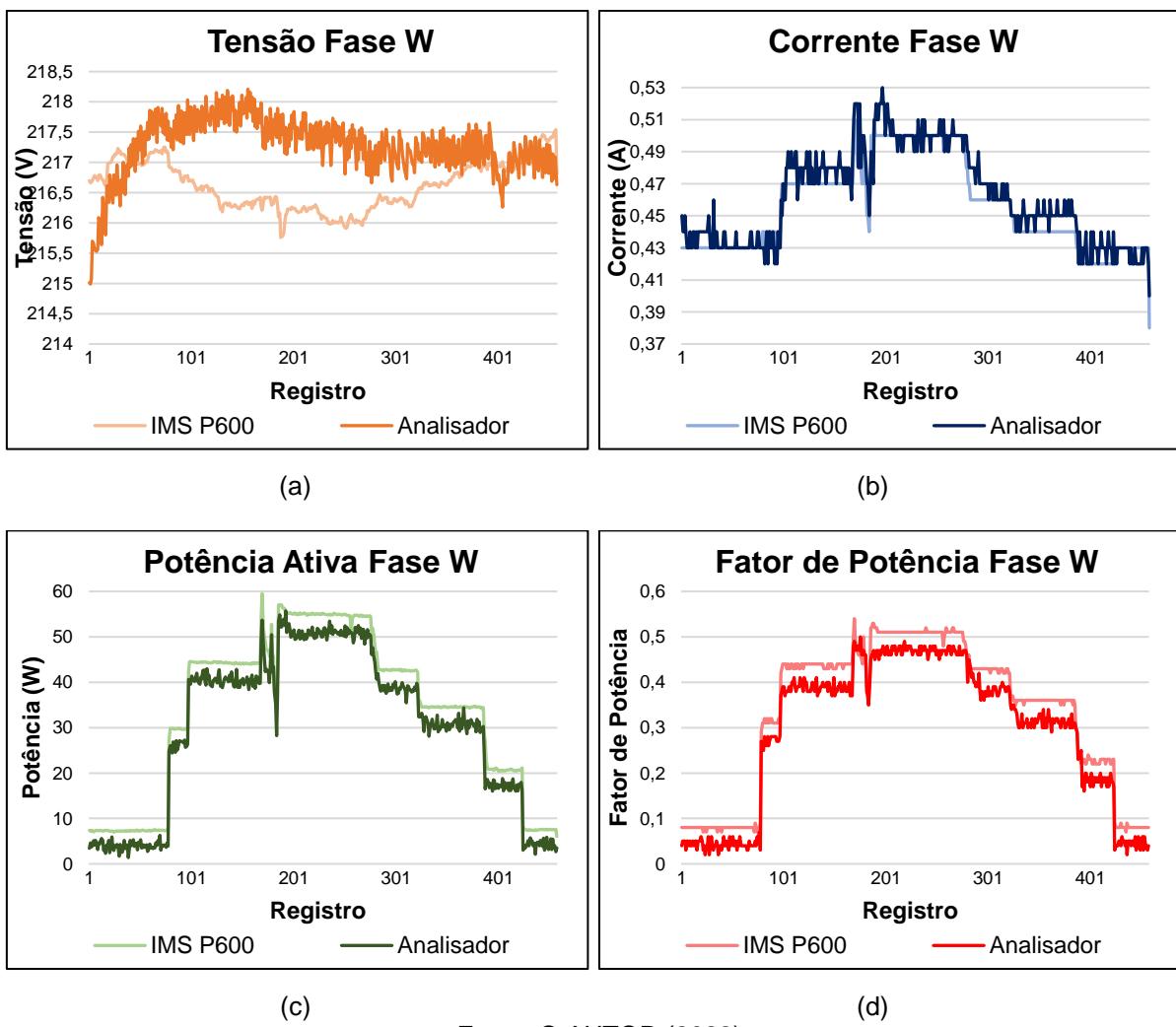
	Erro Min.	Erro Máx	Erro Médio	Erro Médio
	Abs.	Abs.	Abs.	% Rel.
Tensão	0,41 V	3,67 V	1,78 V	0,82 %
Corrente	0,00 A	0,05 A	0,016 A	3,65 %
Potência Ativa	0,13 W	7,79 W	3,11 W	5,32 %
Fator de Potência	0,00	0,07	0,04	7,63 %

Fonte: O AUTOR (2022).

A partir da Tabela 13, é possível verificar que o erro relativo médio percentual teve valor abaixo de 1% para as medidas de tensão, que demonstra uma boa exatidão. Já os valores de corrente, potência ativa e fator de potência demonstraram erro médio percentual absoluto acima de 3%. Apesar dos erros, é importante ressaltar que a curva de potência ativa e fator de potência do analisador desenvolvido seguiram a mesma tendência dos registros do analisador IMS PQ600, ou seja, com a detecção do aumento de potência do IMS PQ600, o mesmo acontecia com o analisador desenvolvido.

A Figura 62, traz um resumo dos valores medidos tanto no analisador IMS PQ600 como no analisador desenvolvido na fase W do sistema.

Figura 62 – Valores obtidos na fase W – Conexão estrela



Ao analisar-se a Figura 62 (a), do comportamento da tensão na fase W, é possível visualizar uma mudança frente as medidas anteriores. Na fase W, aproximadamente após o septuagésimo registro, o valor de tensão medido no analisador desenvolvido é superior a tensão aferida no IMS PQ600, voltando a estarem próximas ao final da série de registros. Já os demais valores, de corrente, potência ativa e fator de potência apresentam comportamento muito semelhantes as medições em fases anteriores, com o analisador desenvolvido medindo valores ligeiramente menores que o IMS PQ600. A Tabela 14 demonstra os valores de erros calculados para as medidas.

Tabela 14 – Erros de medida Fase W – Conexão estrela

	Erro Min.	Erro Máx	Erro Médio	Erro Médio
	Abs.	Abs.	Abs.	% Rel.
Tensão	0,00 V	2,02 V	0,82 V	0,38 %
Corrente	0,00 A	0,04 A	0,007 A	1,67 %
Potência Ativa	0,24 W	10,5 W	3,73 W	18,45 %
Fator de Potência	0,00	0,07	0,04	19,13 %

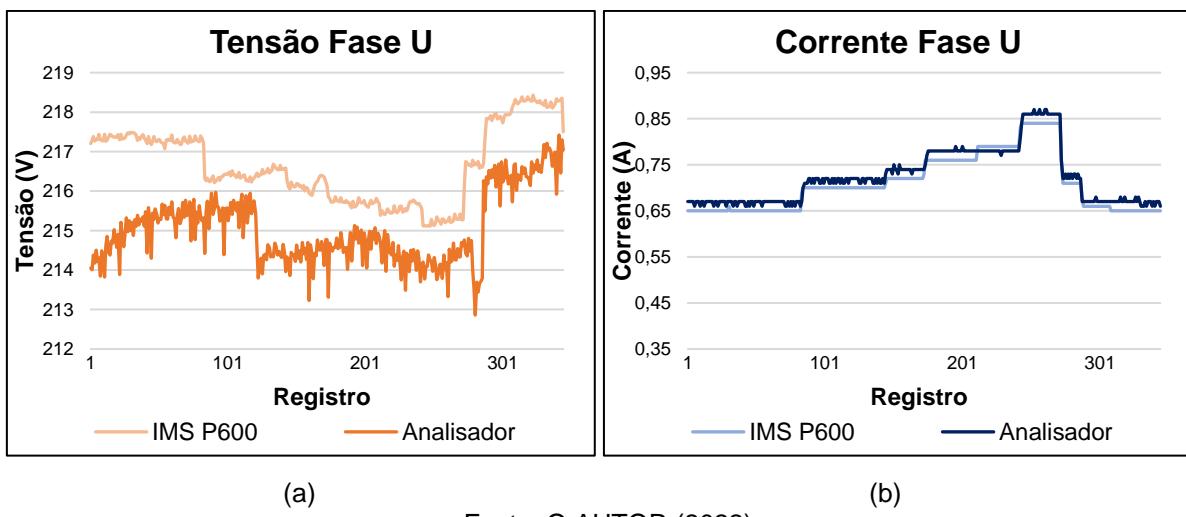
Fonte: O AUTOR (2022).

Através da Tabela 14, é possível visualizar que o erro médio percentual relativo foi extremamente baixo, inferior a 0,5%, sendo o valor de erro médio absoluto nas medidas de corrente igualmente baixo, em média 0,007 A. Já no fator de potência observa-se um erro médio percentual relativo alto, o que reflete nos valores altos de erro de potência ativa. O erro máximo absoluto na medida de potência ativa foi de 10,5 W, considerando-se um valor alto, tendo em vista que o maior valor de potência ativa medida teve aproximadamente 60 W.

No segundo ensaio, realizou-se a conexão do motor em triângulo, com tensão entre fase-fase de 220 V. Efetuou-se o mesmo procedimento de amostragem do ensaio em estrela, porém, neste ensaio, foram coletadas 345 amostras válidas no analisador IMS PQ600, que também foi parametrizado a fim de realizar leituras no sistema em triângulo. Devido às limitações do analisador IMS PQ600, neste ensaio, foram coletados os valores de tensão entre fase-fase, corrente de linha, fator de potência trifásico e potência ativa trifásica. As seções subsequentes trazem os resultados amostrados em cada fase, bem como uma tabela contendo os erros absolutos máximo e mínimos e o valor do erro médio percentual absoluto.

A Figura 63, traz um resumo dos valores medidos tanto no analisador IMS PQ600 como no analisador desenvolvido na fase U do sistema.

Figura 63 – Valores obtidos na fase U – Conexão triângulo



Fonte: O AUTOR (2022).

De acordo com a Figura 63 (a), o valor de tensão medido na fase U foi sempre inferior nas medidas do analisador proposto, embora as curvas de tensão possuam semelhanças. Já na Figura 63 (b) é perceptível que o valor medido de corrente no analisador proposto foi ligeiramente maior na maioria das medições que o valor lido pelo IMS PQ600, embora os valores analisados estejam próximos. A Tabela 15 demonstra os valores de erros calculados para as medidas.

Tabela 15 – Erros de medida Fase U – Conexão triângulo

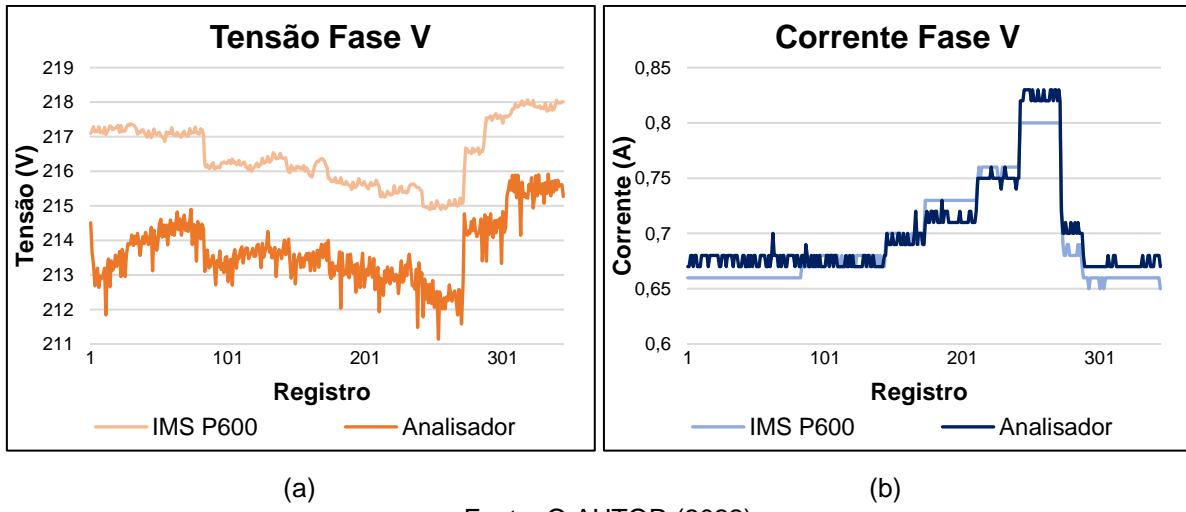
	Erro Min.	Erro Máx	Erro Médio	Erro Médio
	Abs.	Abs.	Abs.	% Rel.
Tensão	0,28 V	3,85 V	1,62 V	0,75 %
Corrente	0,00 A	0,03 A	0,016 A	2,39 %

Fonte: O AUTOR (2022).

Os erros médios calculados apontam valores baixos, que indicam a boa exatidão das medições realizadas, destacando-se o erro médio percentual relativo da tensão, abaixo de 1%.

A Figura 64, traz um resumo dos valores medidos tanto no analisador IMS PQ600 como no analisador desenvolvido na fase V do sistema.

Figura 64 – Valores obtidos na fase V – Conexão triângulo



Fonte: O AUTOR (2022).

O gráfico da figura 64 (a) demonstra, assim como no ensaio da fase V na conexão em estrela, um valor de tensão lido pelo analisador abaixo do valor medido pelo IMS PQ600, sendo esse valor abaixo contínuo ao longo das medidas. Já no gráfico da Figura 64 (b), que demonstra a curva de corrente, é possível visualizar grande similaridade entre os analisadores, alternando-se o analisador com maior valor, porém com uma diferença baixa entre medidas. A Tabela 16 demonstra os valores de erros calculados para as medidas.

Tabela 16 – Erros de medida Fase V – Conexão triângulo

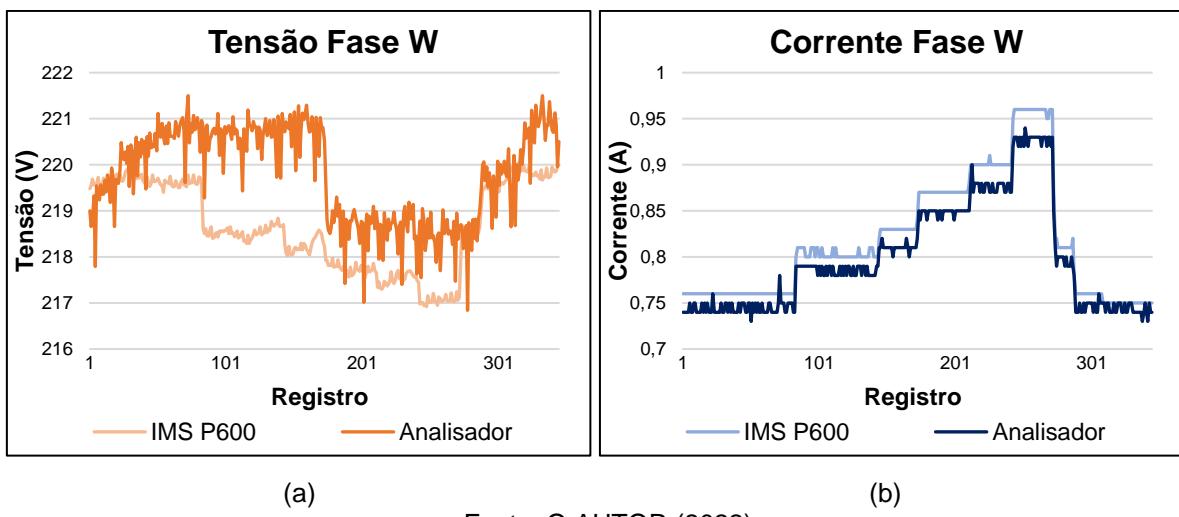
	Erro Min.	Erro Máx	Erro Médio	Erro Médio
	Abs.	Abs.	Abs.	% Rel.
Tensão	1,23 V	5,23 V	2,77 V	1,28 %
Corrente	0,00 A	0,04 A	0,013 A	1,88 %

Fonte: O AUTOR (2022).

Embora o valor do erro médio percentual relativo se mostre maior na medição de corrente, seu valor médio absoluto é extremamente baixo, de 0,013 A. Já nas medições de tensão chama a atenção o valor de erro máximo absoluto, atingindo 5,23 V, porém o erro médio percentual relativo teve um bom resultado, abaixo de 1,5%.

A Figura 65, traz um resumo dos valores medidos tanto no analisador IMS PQ600 como no analisador desenvolvido na fase W do sistema.

Figura 65 – Valores obtidos na fase W – Conexão triângulo



Fonte: O AUTOR (2022).

Na Figura 65, o gráfico (a) apresenta tendência semelhante ao gráfico de tensão da fase W na ligação em estrela, em que o valor de tensão medido pelo analisador é, na maioria das amostras, superior ao valor medido pelo IMS PQ600. Já no gráfico (b), é perceptível o maior valor lido pelo IMS PQ600 em comparação ao analisador. A Tabela 17 demonstra os valores de erros calculados para as medidas.

Tabela 17 – Erros de medida Fase W – Conexão triângulo

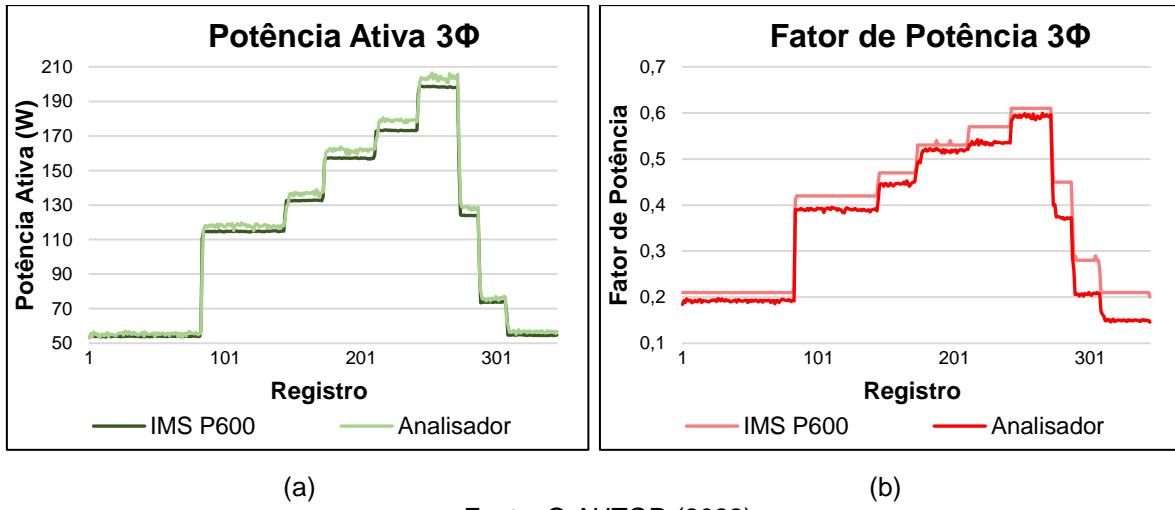
	Erro Min.	Erro Máx	Erro Médio	Erro Médio
	Abs.	Abs.	Abs.	% Rel.
Tensão	0,00 V	3,13 V	1,22 V	0,56 %
Corrente	0,00 A	0,04 A	0,018 A	2,17 %

Fonte: O AUTOR (2022).

Um resultado interessante apresentado na Tabela 17 é do erro médio percentual relativo da tensão, ficando próximo de 0,5%, que representa uma boa medição. Novamente, embora o erro médio percentual relativo seja superior a 2% na medição de corrente, o valor médio de erro absoluto é de apenas 0,018 A, sendo considerado um resultado admissível.

Por fim, analisou-se os valores de potência ativa trifásica e fator de potência trifásica do motor na ligação triângulo. Não é possível realizar esta análise por fase, como realizado no ensaio em estrela, devido ao fato do analisador IMS PQ600 não possuir esta funcionalidade para conexão em triângulo. A Figura 66 traz os valores amostrados durante o ensaio.

Figura 66 – Potência ativa e fator de potência – Conexão triângulo



Fonte: O AUTOR (2022).

É possível visualizar uma boa similaridade entre os valores de potência ativa medidos, tanto pelo analisador proposto como pelo IMS PQ600. Já no fator de potência, é perceptível uma diferença relativamente maior entre os valores, sendo em alguns pontos relevante esta diferença. A Tabela 18 demonstra os valores de erros calculados para as medidas.

Tabela 18 – Erros de medida potência ativa e fator de potência – Conexão triângulo

	Erro Min.	Erro Máx	Erro Médio	Erro Médio
	Abs.	Abs.	Abs.	% Rel.
Potência Ativa	0,01 W	14,44 W	3,30 W	3,20 %
Fator de Potência	0,00	0,08	0,03	10,08 %

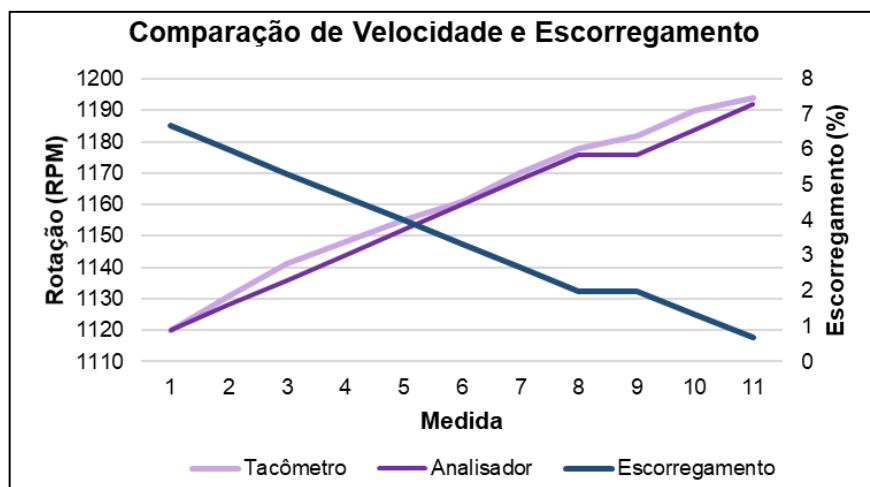
Fonte: O AUTOR (2022).

Destacam-se na Tabela 18 valores consideráveis de erro máximo absoluto, de 14,44 W para a potência ativa, e 0,08 para o fator de potência. Embora o erro máximo absoluto seja considerado alto, o valor de erro médio relativo percentual foi de 3,20% na medida de potência, sendo um resultado satisfatório. Já no erro médio relativo do fator de potência, o erro foi maior, ultrapassando 10%, o que diminui a confiabilidade do resultado.

6.2 ENSAIOS MECÂNICOS

De modo a analisar as componentes mecânicas do analisador proposto, realizou-se um teste de carga no motor. O mesmo foi conectado em estrela e acoplou-se ao seu eixo um módulo de carga variável. No *software* desenvolvido, inseriu-se os parâmetros calculados na Etapa 3 do desenvolvimento, e de modo a testar o *software*, realizou-se a variação de carga. Para verificar a exatidão das medidas de velocidade, comparou-se os valores lidos pelo *software* com um tacômetro digital, sendo realizadas 11 medidas com cargas distintas. A Figura 67 traz um resumo dos resultados.

Figura 67 – Velocidade e escorregamento medidos



Fonte: O AUTOR (2022).

Analisou-se também o valor do escorregamento apresentado pelo *software*, sendo o mesmo calculado através da Equação 6 no programa. É possível verificar que com o aumento da velocidade, houve a diminuição do escorregamento, o que era esperado. A Tabela 19 traz um resumo dos erros de medida de velocidade entre o analisador e o tacômetro.

Tabela 19 – Erros de medida velocidade

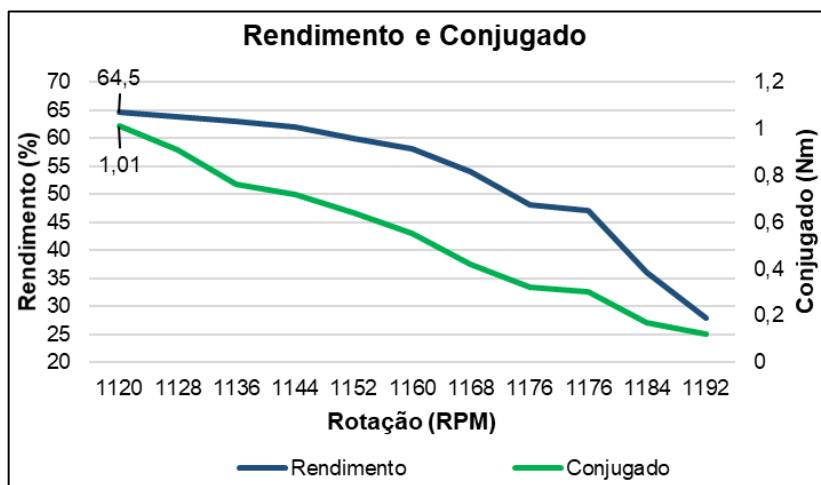
Velocidade	
Erro Min. Abs.	0 RPM
Erro Máx Abs.	6 RPM
Erro Médio Abs.	3 RPM
Erro Médio % Rel.	0,25 %

Fonte: O AUTOR (2022).

Ao analisar-se a Tabela 19, é possível constatar que o valor de erro médio absoluto foi de 3 RPM, considerado um valor baixo, tendo em vista que a velocidade síncrona do motor é de 1200 RPM. Esse resultado reflete em um erro médio percentual relativo de apenas 0,25%, sendo altamente satisfatório.

Para a análise dos demais parâmetros mecânicos, como rendimento e conjugado, não havia disponível no momento do ensaio equipamentos de modo a se comparar os valores medidos pelo analisador, dessa forma, utilizou-se a ficha de dados técnicos do motor, disponibilizada pelo fabricante, que pode ser visualizada no Anexo A. As medidas foram realizadas na condição de regime permanente, desde à vazio até a condição de carga nominal, considerando-se como referência a corrente. A Figura 68 traz as curvas de rendimento e conjugado medidas com o analisador.

Figura 68 – Curva de rendimento e conjugado calculados



Fonte: O AUTOR (2022).

As curvas apresentadas seguem a tendência de motores com classe de conjugado tipo N. O rendimento nominal do motor, segundo sua ficha de dados, em velocidade nominal (1120 RPM) é de 64%, sendo que durante as medições, na velocidade de 1120 RPM, obteve-se um valor de rendimento de 64,5%, sendo muito próximo ao esperado. Já o conjugado, em velocidade nominal, é de 1,02 Nm segundo sua ficha de dados, sendo medido com o analisador 1,01 Nm na mesma situação. Embora não seja possível afirmar que os valores de rendimento e conjugado estejam de acordo com a realidade, nos pontos onde foi possível realizar a análise, os resultados se demonstraram muito próximos a ficha de dados do motor.

6.3 CUSTO-BENEFÍCIO DO ANALISADOR

De modo a realizar uma comparação entre as medidas realizadas pelo analisador desenvolvido, e o analisador IMS PQ600, resumiu-se o valor dos erros médios percentuais relativos na Tabela 20.

Tabela 20 – Erros médios % Relativos

Ensaio	Grandeza	Fase		
		U	V	W
Estrela	Tensão	1,08 %	0,82 %	0,38 %
Estrela	Corrente	0,92 %	3,65 %	1,67 %
Estrela	Potência Ativa	8,84 %	5,32 %	18,45 %
Estrela	Fator de Potência	8,98 %	7,63 %	19,13 %
Triângulo	Tensão	0,75 %	1,28 %	0,56 %
Triângulo	Corrente	2,39 %	1,88 %	2,17 %

Fonte: O AUTOR (2022).

Com relação a exatidão dos valores medidos de tensão, o resultado se mostra satisfatório, tendo em vista que independente do ensaio e da fase analisada, em nenhum dos casos o valor do erro médio percentual relativo foi superior a 1,3%. Valores de corrente também demonstraram um bom comportamento: o erro médio percentual relativo ficou abaixo de 3,7 % em todas as condições analisadas. Os valores de potência ativa e fator de potência apresentaram erros maiores, porém é importante ressaltar que o motor analisado tem baixa potência (0,16 CV), logo, os valores de potência ativa apresentam valores pequenos (abaixo de 150 W), e pequenas discrepâncias entre o valor medidor pelo analisador desenvolvido e o analisador IMS PQ600 resultam em altos valores de erro médio percentual relativo. Além disso, é importante ressaltar que o fundo de escala do analisador IMS PQ600 é de 100A, logo, o mesmo estava operando fora de sua faixa ideal, portanto, o próprio IMS PQ600 pode ter apresentado erros durante as medições.

Ao término da montagem do protótipo e da realização dos ensaios realizou-se um levantamento dos custos referentes a implementação do mesmo, sendo demonstrados na Tabela 21.

Tabela 21 – Custo para o desenvolvimento do analisador

Material	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
ESP32	1	R\$ 53,00	R\$ 53,00
Resistor 10 kΩ	12	R\$ 0,08	R\$ 0,96
Resistor 100 kΩ	6	R\$ 0,08	R\$ 0,48
Resistor 860 Ω	3	R\$ 0,08	R\$ 0,24
Capacitor 1 µF 50V	6	R\$ 0,22	R\$ 1,32
ZMPT101b	3	R\$ 4,50	R\$ 13,50
SCT-013-020	3	R\$ 59,66	R\$ 178,98
Módulo <i>Encoder</i>	1	R\$ 8,90	R\$ 8,90
Demais Componentes	-	R\$ 40,00	R\$ 40,00
TOTAL			R\$ 297,38

Fonte: O AUTOR (2022).

A cargo de comparação, em janeiro de 2023, o valor do Analisador IMS PQ600, segundo a loja Gama Instruments, era de R\$ 14.750,00. De acordo com os valores apresentados, o analisador desenvolvido teve apenas 2% do custo do Analisador IMS PQ600, o que pode ser considerado um resultado bastante positivo. Existem grandes diferenças entre os dois analisadores, sendo que o IMS PQ600 realiza a medições de diversos outros parâmetros, possui maior capacidade de corrente e tem embutido um *datalogger*. Porém, um grande diferencial do analisador desenvolvido é a sua capacidade de medir velocidade, o que torna possível o cálculo de diversos outros parâmetros, sendo mais atrativo para medições em motores de indução trifásicos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentou um estudo sobre motores de indução trifásicos e o desenvolvimento de um analisador de grandezas, tanto elétricas quanto mecânicas de um motor.

O desenvolvimento do referido trabalho partiu do estudo da bibliografia disponível a respeito de motores de indução trifásicos, avaliando seus aspectos construtivos, seu circuito equivalente, curvas características de torque e métodos de ligação, estrela e triângulo. Foram analisados também sensores compatíveis com o propósito do projeto, além da exploração do ESP32 e da linguagem de programação Python.

Posteriormente desenvolveu-se a metodologia, segmentando as etapas do projeto, de modo a validar separadamente cada um dos instrumentos e softwares do trabalho para ao final unir-se todo o projeto de modo a realizar comparações de medição com equipamentos disponíveis no mercado. Ao decorrer do projeto, observou-se uma lacuna para a inserção do analisador desenvolvido no mercado, tendo em vista que a grande maioria dos instrumentos de medição disponíveis está atrelado somente a parâmetros, ou elétricos, ou mecânicos. Assim, com a união dos parâmetros, como no analisador desenvolvido, é possível realizar uma análise mais precisa de motores de indução trifásicos.

Para alcançar os resultados apresentados, foram realizados o desenvolvimento do *hardware* do analisador, por meio de uma placa de circuito impresso, além de uma case para conexão dos condutores e proteção do equipamento. Desenvolveu-se também o *software* do analisador, tanto o código para a aquisição dos dados via ESP32, como um código em linguagem Python para apresentação dos valores obtidos em uma interface gráfica em um computador. A realização dessa etapa tornou possível apresentar os dados obtidos através do analisador de forma simples e didática, facilitando o entendimento do usuário.

Os resultados obtidos com esse trabalho, comparados com as medições realizadas com outros aparelhos (analisador de energia e tacômetro), se mostraram adequados. Dentre os componentes elétricos, destacam-se principalmente as medições de corrente, que apresentaram os menores valores de erro absoluto durante o ensaio. Já o fator de potência foi quem mais apresentou oscilações, sendo em alguns casos superiores a 10%, o que acabou elevando também as imprecisões nas

medidas de potência ativa, já que as duas variáveis estão diretamente relacionadas. As medições mecânicas se mostraram igualmente aceitáveis, principalmente a de velocidade, tendo um erro médio relativo percentual de apenas 0,25%, comparado ao tacômetro utilizado. Tendo em vista o custo para o desenvolvimento e implantação do analisador e o custo dos equipamentos padrão, pode-se concluir que o analisador desenvolvido apresenta excelentes características

Por fim, vale ressaltar que o trabalho apresenta o desenvolvimento completo do sistema, tanto de *hardware* como de *software*, onde é possível ter acesso a todos os dados e códigos sem necessidade de licença alguma para a utilização, tornando assim o sistema e o código utilizado aberto a qualquer pessoa.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Com a finalidade de aprimorar o analisador de energia desenvolvido neste trabalho, podem ser realizados diversos refinamentos, tanto nos circuitos como no software.

No quesito circuito, pode-se desenvolver um circuito em paralelo para realizar a medição do fator de potência do sistema, tendo em vista que este foi o parâmetro que apresentou os maiores índices de erro durante o projeto. Além disso, é possível efetuar melhoria na leitura de velocidade, buscando-se a troca do sensor utilizado por outro, em que não seja necessário o acoplamento de um *encoder* junto ao rotor da máquina.

Já no quesito *software*, é possível realizar uma gama de melhorias, como por exemplo alterar o meio de comunicação entre o ESP32 e o computador, podendo a conexão ser realizada sem cabos, por meio de *Wi-fi* ou *Bluetooth* por exemplo. Além disso, é possível realizar melhoria também na própria interface gráfica, como com a inclusão de gráficos em tempo real dos parâmetros. Também é possível a criação de mais um *layout*, dedicado aos testes do motor de indução de forma a se obter os parâmetros do seu circuito equivalente.

.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Yure. **ESP32 pinout – Guia Básico de GPIOs.** 2020. Disponível em <https://blog.smartkits.com.br/esp32-pinout-guia-basico-de-gpios/#:~:text=Pinos%20GPIO%20do%20ESP32,DevKit%20v1%20de%2030%20pins>. Acesso em: 19 nov. 2022;
- APRENENDENDO ELÉTRICA. **O que é fator de potência e como calcular?** [S. I.], 2018. Disponível em: <https://aprendendoeletrica.com/o-que-e-fator-de-potencia>. Acesso em: 01 jul. 2022;
- ANEEL, Brasil. **Módulo 8 – qualidade da energia elétrica.** Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2010;
- ARDUINO. **Software.** [S. I.], 2022. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/software>. Acesso em: 15 jul. 2022;
- BATISTA, Thiago de Carvalho. **Transformadores de corrente com núcleo de liga nanocristalina utilizados para serviços de medição e proteção em sistemas elétricos.** 2014. Tese (Doutorado em ciências de engenharia elétrica) - Programa de pós-graduação em engenharia elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2014;
- BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos.** 11. ed. São Paulo: Pearson, 2013;
- BUFFON, Paulo Otávio. **Perdas no Motor.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo. 2021;
- CARDOSO, Matheus. **O que é um microcontrolador?** 2020. Disponível em <<https://edu.ieee.org/br-ufcgras/o-que-e-um-microcontrolador/>> Acesso em: 10 dez. 2022;
- CARVALHO, Alexandre Figueiredo; MILLÉO, Lucas Martins. **Desenvolvimento de sensor de corrente elétrica a partir de um sensor efeito hall.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Automação Industrial) – Departamento Acadêmico de Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, 2017;
- CARVALHO, Marcelo de Fraga; **Hall, sensor angular baseado em efeito.** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica ULBRA, Universidade Luterana do Brasil, Canoas, RS, 2011;
- CRAVO, Edilson. Kalatec. **O que é torque do motor, para que serve e como calcular.** [S. I.], 2020. Disponível em: <https://blog.kalatec.com.br/o-que-e-torque-do-motor/>. Acesso em: 20 jun. 2022;
- DAMASCENO, Mariana Ferreira et al. **Proposta de medidor inteligente de consumo de energia elétrica.** XIV CEEL, Uberlândia, v. 7, 2016;

DE LIMA, Gustavo Fernandes *et al.* **Aplicação de um tacômetro magnético no monitoramento de rotação utilizando Arduino.** Holos, v. 2021, n. 1, p. 1f-1f, 2021;

DÍAZ, Eduardo Machado; FUENTES, Hesner Coto. **Sistema de adquisición de datos con Python y Arduino.** 2017;

DE SOUZA, Jefferson Jardem Izaias; DO NASCIMENTO, Luís Bruno Pereira; DOS SANTOS FILHO, Paulo Rodrigues. **Arduino e Python: Do It Yourself.** ENUCOMP, Parnaíba, 2012;

ELECTRONIC, Qingxian Zeming Langxi. **DATASHEET ZMCT103C.** 2015;

EPE, Brasil. **Anuário estatístico de energia elétrica 2022:** Ano base 2021. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>. Acesso em: 25 jul. 2022;

FILHO, Carlos Roberto da Silva. **Transformadores para instrumentos.** UFP. Apostila 93p. 2015;

FLORES, Gabriel Cima Flores. **Desenvolvimento de um sistema de monitoramento da qualidade de energia elétrica de baixo custo.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Departamento das Engenharias e Ciência da Computação, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo, RS, 2017;

FRANCISCO, António MS. **Motores de indução trifásicos.** Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, 1. ed. Portugal: ETEP, 2006;

GUEDES, Danila Branco. **Linguagem de programação Python e Arduino como ferramenta para motivar estudantes iniciantes em programação.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Automação Industrial) - Departamento acadêmico de eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2018;

JOAO. **Tkinter: Interfaces gráficas em Python.** 2016. Disponível em <<https://www.devmedia.com.br/tkinter-interfaces-graficas-em-python/33956>> Acesso em: 19 nov. 2022;

KIRGER, Daniel. KENZIE. **O que é python, para que serve e por que aprender?** [S. l.], 2022. Disponível em: <https://kenzie.com.br/blog/o-que-e-python>. Acesso em 01 jul. 2022;

KUROISHI, Alex Makoto. **Projeto e desenvolvimento de um medidor de fator de potência com Arduino UNO e ARM Cortex-M4FMO.** 2018. Tese (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia e Urbanismo Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, 2018;

MALANGE, Fábio. **Experiência 09: Parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico.** UNESP. 2018;

MELO, Diego. TECNOBLOG. **O que é Python?**. [S. I.], 2020. Disponível em: <https://tecnoblog.net/responde/o-que-e-python-guia-para-iniciantes/>. Acesso em 24 jun. 2022;

MENEZES, Nilo Ney Coutinho. **Introdução à Programação com Python Algoritmos e lógica de programação para iniciantes**. 1. ed. São Paulo: Novatec, 2010;

OLIVEIRA, Euler. **Como usar com Arduino**: Sensor Hall de Campo Magnético KY-024. BLOG MASTERWALKER SHOP. [S. I.], 2019. Disponível em: <https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-sensor-hall-de-campo-magnetico-ky-024>. Acesso em 26 mai. 2022;

PEREIRA, Luís Alberto. **Introdução a Máquina de Indução**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Porto Alegre, RS, 2008;

PRADANA, Lukman Dika Setyo. **Perancangan monitoring RPM motor induksi tiga fasa pada penggerak generator**. JUPITER (JURNAL PENDIDIKAN TEKNIK ELEKTRO), v. 6, n. 2, p. 44-52, 2021;

PYCHARM. **The Python IDE for Professional Developers**. 2022. Disponível em <https://www.jetbrains.com/pycharm/promo/?source=google&medium=cpc&campaign=14123076847&term=pycharm&content=536947779492&gclid=Cj0KCQiAtbqdBhDvARIsAGYnXBO7fVMgc3CXbAzlcA0nUVdq8RbCQ5Hd1pt8jYqJk05R7zgool7v5e4aAv-pEALw_wcB> Acessado em: 10 nov. 2022;

RUVIARO, Maurício. **Máquina assíncrona trifásica de rotor bobinado duplamente alimentada por meio de transformador rotativo**. 2011. Dissertação (Mestre em engenharia elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2011;

SANTOS, Erik Thauan Mendes et al. **Protótipo trifásico para monitoramento de consumo de energia elétrica utilizando a plataforma arduino**. Brazilian Applied Science Review, v. 4, n. 5, p. 2939-2953, 2020;

SANTOS, Nuno Pessanha. **Arduino e a aquisição de dados**: a problemática na taxa de amostragem. PROGRAMAMAR. 20. ed. 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/337877703_Arduino_e_a_Aquisicao_de_Dados_-_A_Problematica_na_taxa_de_amostragem. Acesso em: 20 jul. 2022;

SCARPIN, Bruno. CUBI Energia. **Fator de Potência e sua Energia**. [S. I.], 2017. Disponível em: <https://www.cubienergia.com/o-que-e-fator-de-potencia/#:~:text=Segundo%20a%20Legisla%C3%A7%C3%A3o%20Brasileira%20o,al%C3%A9m%20dos%208%25%20m%C3%A1ximos%20permitidos>. Acesso em: 20 jun. 2022;

SENS, Moacyr. Diretor Técnico da WEG. **Avanços tecnológicos nos motores elétricos**. 2001. WEG EM REVISTA, p. 11-13, 2001;

SILVA, Judson Praxedes da. **Protótipo para medição de energia elétrica residencial utilizando plataforma arduino.** 2018. Tese (Bacharel em Engenharia Elétrica) – Curso de Ciências e Tecnologia, Universidade Rural do Semi-Árido, Caraúbas, RN, 2018;

SILVA, Victor de Paula e. **Análise comparativa do desempenho do motor de indução trifásico de alto rendimento e linha padrão em condições de alimentação ideal e não ideal.** 2012. Tese (Mestrado em ciências) - Programa de pós-graduação em engenharia elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2012;

VEIGA, Tiago Natan Ardaia. **Projeto de geradores síncronos a imãs permanentes para aplicações em sistemas eólicos.** 2011. Dissertação (Mestre em engenharia elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2011;

VIANA, Carol Correia. **Como programar a placa ESP32 no Arduino IDE.** 2021. Disponível em <<https://www.blogdarobotica.com/2021/08/24/como-programar-a-placa-esp32-no-arduino-ide/>> Acesso em: 20 dez. 2022;

VIDAL, Vitor. **Medidor de corrente e energia com Arduino.** [S. l.], 2017. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/medidor-de-corrente-e-energia-com-arduino-sensor-de-corrente-e-tensao/#:~:text=O%20sensor%20de%20corrente%20SCT,eletricamente%20conecta%20ao%20circuito%20medido>. Acesso em: 30 mai. 2022;

YAMACHITA, Roberto Akira. **Determinação de perdas e rendimento em motores elétricos empregando termografia infravermelha.** 2013. Tese (Doutorado em ciências de energia elétrica) - Programa de pós-graduação em engenharia elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2013;

WEG. **Motores eficientes geram economia de energia na indústria.** 2019. Revista Valor. Disponível em: <https://valor.globo.com/patrocinado/weg/weg/noticia/2019/12/02/motores-eficientes-geram-economia-de-energia-na-industria.ghtml>. Acesso em: 26 jul. 2022;

WEG AUTOMAÇÃO. **Manual Para Correção do Fator de Potência.** Jaraguá do Sul, 2009.

APÊNDICE A – Determinação dos parâmetros do circuito equivalente

Ensaio CC para resistência do estator

Nesta prática, para medição da resistência média do enrolamento da máquina de indução trifásica, são desempenhadas três etapas, sendo que cada uma corresponde a medição de resistência de um enrolamento. O procedimento das etapas é semelhante, variando-se apenas o enrolamento em que a tensão contínua é injetada. Dessa forma, alimenta-se o enrolamento da máquina com tensão continua, até que o mesmo atinja o valor de sua corrente nominal (0,483 A). A Figura 1 demonstra a medição dos parâmetros no enrolamento W1-W2 do motor analisado.

Figura 1 – Medição no enrolamento W



Fonte: O AUTOR (2022).

Dessa forma, verificam-se os valores de corrente e tensão. A Tabela 1 apresenta os valores encontrados via medição, bem como o valor de resistência calculado a partir da Equação 34.

Tabela 1 – Resistências do estator

Enrolamento	Corrente (A)	Tensão CC (V)	Resistência (Ω)
U1 – U2	0,483	29,51	61,09
V1 – V2	0,483	29,14	60,33
W1 – W2	0,481	28,90	60,08

Fonte: O AUTOR (2022).

Com o valor de resistência de cada enrolamento determinado, se faz necessário o cálculo do seu valor médio através da Equação 35.

$$R_1 = \frac{61,09 + 60,33 + 60,08}{3}$$

$$R_1 = 60,50 \Omega$$

Ainda de acordo com a NBR 17094-3, 2018, deve-se corrigir o valor final de resistência encontrado de acordo com a temperatura, sendo que no momento do ensaio, o valor de temperatura no laboratório era de 25 °C. A correção é realizada através da Equação 36.

$$R_{\text{corrigida}} = 60,50 \cdot \frac{(75 + 234,5)}{(25 + 234,5)}$$

$$R_{\text{corrigida}} = 72,15 \Omega$$

Ensaio de rotor bloqueado

Neste ensaio, que visa determinar o valor das reatâncias em série do motor de indução, o mesmo é conectado em triângulo (Δ) e a característica desse ensaio é que o seu rotor é travado, através da inserção de um alicate bloqueando o movimento do seu eixo e seu escorregamento é máximo, ou seja, $s = 1$. O ensaio tem início com a injeção da tensão mínima no motor, elevando-se seu valor até que se atinja o valor nominal de corrente (0,834 A). A Figura 2 demonstra os equipamentos utilizados para realização do ensaio.

Figura 2 – Ensaio de rotor bloqueado



Fonte: O AUTOR (2022).

Ao atingir-se o valor de corrente pré-estabelecido, realizou-se o registro dos valores de corrente, tensão, potência ativa trifásica e fator de potência, conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Medidas ensaio de rotor bloqueado trifásicas

Parâmetro	Valor
Tensão (V)	85,5 V
Corrente (A)	0,830 A
Potência Ativa (W)	1524,60 W
Fator de Potência	0,66

Fonte: O AUTOR (2022).

A potência medida é trifásica, e as tensões e correntes são parâmetros de linha além da medição do fator de potência. O motor está conectado em delta. O circuito equivalente do motor é obtido por fase, por consequência deve-se realizar a correção dos parâmetros medidos. Tendo em consideração que o Wattímetro utilizado possui fundo de escala de 100 A, valor muito superior aos valores de corrente avaliados, utilizou-se do artifício de aumentar o valor de corrente lido pelo aparelho, enrolando o condutor 18 vezes ao redor do alicate amperímetro do Wattímetro. Assim, para determinar o valor real da potência ativa trifásica, foi necessário dividir o valor apresentado no visor do aparelho por 18. A Tabela 3 demonstra os valores recalcados para cada fase.

Tabela 3 – Medidas ensaio de rotor bloqueado monofásicas

Parâmetro	Valor
Tensão (V)	85,5 V
Corrente (A)	0,4792 A
Potência Ativa (W)	26,6666 W
Fator de Potência	0,634

Fonte: O AUTOR (2022).

De acordo com a Equação 38, excluindo-se o parâmetro $\sqrt{3}$, tendo em vista que os valores da Tabela 2 já estão na forma monofásica, é possível determinar a impedância total do ensaio.

$$|Z_{1bl}| = \frac{85,5}{0,4792}$$

$$|Z_{1bl}| = 178,42 \Omega$$

Dessa forma, a reatância indutiva total devido as indutâncias X_1 e X_2 pode ser obtida através da equação 40.

$$X = 178,42 \cdot \text{sen}(\cos^{-1} 0,634)$$

$$X = 137,97 \Omega$$

Utilizando-se das relações apresentadas na Tabela 1 do trabalho, para as proporções de X_1 e X_2 de acordo com a classe do motor (Classe A), obtém-se as respectivas reatâncias indutivas de acordo com a equação 41.

$$X_1 = X_2 = \frac{137,97}{2}$$

$$X_1 = X_2 = 68,9890 \Omega$$

Ensaio a vazio

A primeira etapa da prática, consiste em realizar as devidas conexões no motor de forma a operar na ligação em triângulo, à vazio, ou seja, sem carga acoplada em seu eixo, a fim de determinar a reatância do ramo de magnetização do motor. Assim, forneceu-se tensão nominal ao motor (220V na ligação em triângulo), através de um Variac trifásico, e verificou-se os valores de corrente de linha, tensão, potência ativa trifásica e fator de potência, conforme demonstra a Tabela 4.

Tabela 4 – Medidas ensaio a vazio com tensão nominal trifásicas

Parâmetro	Valor
Tensão (V)	219,6 V
Corrente (A)	0,711 A
Potência Ativa (W)	1.413 W
Fator de Potência	0,28

Fonte: O AUTOR (2022).

De forma análoga ao ensaio anterior, necessitou-se recalcular o valor dos parâmetros medidos para um sistema monofásico, conforme demonstra a Tabela 5.

Tabela 5 – Medidas ensaio a vazio com tensão nominal monofásicas

Parâmetro	Valor
Tensão (V)	219,6 V
Corrente (A)	0,4105 A
Potência Ativa (W)	26,16 W
Fator de Potência	0,28

Fonte: O AUTOR (2022).

O valor da potência reativa por fase do ensaio é expresso através da Equação 44.

$$Q_{\text{Vazio}} = 219,6 \cdot 0,4105 \cdot \text{sen}(\cos^{-1} 0,28)$$

$$Q_{\text{Vazio}} = 86,53 \text{ VAr}$$

A potência reativa sobre o ramo de magnetização é determinada através da Equação 45.

$$Q_M = 86,53 - 0,4105^2 \cdot 68,9890$$

$$Q_M = 74,91 \text{ VAr}$$

E a tensão sobre a indutância do ramo de magnetização E_{10} é expressa através da Equação 46.

$$E_{10} = 219,6 < 0^\circ - (72,15 + j.68,9890) \cdot 0,4105 < -63,33^\circ$$

$$E_{10} = 181,53 < 4,34^\circ \text{ V}$$

Assim, o valor de X_M pode ser estabelecido através da Equação 47.

$$X_M = \frac{181,53^2}{74,91}$$

$$X_M = 439,90 \Omega$$

Na última etapa do ensaio a vazio, determina-se o valor de R_2 , para isso adequa-se o valor de tensão para que o motor atinja a sua velocidade nominal, conforme aponta o tacômetro da Figura 3.

Figura 3 – Ensaio a vazio com velocidade nominal



Fonte: O AUTOR (2022).

Quando a velocidade foi atingida, registraram-se os valores de tensão, corrente, velocidade e fator de potência. A Tabela 6 demonstra os resultados encontrados.

Tabela 6 – Medidas ensaio a vazio com velocidade nominal trifásicas

Parâmetro	Valor
Tensão (V)	44,1 V
Corrente (A)	0,166 A
Potência Ativa (W)	162 W
Fator de Potência	0,62
Velocidade (RPM)	1122 RPM

Fonte: O AUTOR (2022).

De forma análoga ao ensaio anterior, necessitou-se recalcular o valor dos parâmetros medidos para um sistema monofásico, conforme demonstra a Tabela 7.

Tabela 7 – Medidas ensaio a vazio com velocidade nominal monofásicas

Parâmetro	Valor
Tensão (V)	44,1 V
Corrente (A)	0,0960 A
Potência Ativa (W)	3 W
Fator de Potência	0,62
Velocidade (RPM)	1122 RPM

Fonte: O AUTOR (2022).

Determinou-se então (Equação 49) o valor da tensão sobre o ramo do núcleo.

$$E_{1s} = 44,1 < 0^\circ - (72,15 + j \cdot 68,9890) \cdot 0,0960 < -51,68^\circ$$

$$E_{1s} = 34,63 < 2,1967^\circ V$$

Assim, a corrente, no ramo de magnetização sobre o indutor X_M é calculada através da Equação 50.

$$IM_s = \frac{34,63 < 2,1967}{438,95 < 90^\circ}$$

$$IM_s = 0,07087 < -87,8033^\circ A$$

Dessa forma, a corrente que flui sobre o resistor R_2 pode ser obtida, de acordo com a Equação 51.

$$I2_s = 0,0960 < -51,68^\circ - 0,0788 < -87,8033$$

$$I2_s = 0,05660 < 3,47^\circ A$$

Assim, pode ser determinado o valor da impedância equivalente do rotor através da Equação 52.

$$|ZR_s| = \frac{34,63 < 2,1967^\circ}{0,05660 < 3,47^\circ}$$

$$|ZR_s| = 611,83 \Omega$$

O valor do escorregamento do motor, no momento da medição é dado pela equação 6.

$$s = \frac{1200 - 1122}{1200}$$

$$s = 0,065$$

Como o valor da reatância X_2 já é conhecido, através do ensaio de rotor bloqueado, é possível determinar o valor da resistência R_2 , de acordo com a Equação 53.

$$R_2 = 0,065 \cdot \sqrt{611,83^2 - 68,9890^2}$$

$$R_2 = 39,5158 \Omega$$

ANEXO A – Folha de dados do motor analisado

FOLHA DE DADOS

Motor Trifásico de Indução - Rotor de Gaiola



Cliente :				
Linha do produto : W22			Código do produto : 11836621	
Carcaça : 63 Potência : 0.12 kW (0.16 HP-cv) Número de polos : 6 Frequência : 60 Hz Tensão nominal : 220/380 V Corrente nominal : 0.834/0.483 A Corrente de partida : 2.84/1.64 A Ip/In : 3.4 Corrente a vazio : 0.700/0.405 A Rotação nominal : 1120 rpm Escorregamento : 6.67 % Conjugado nominal : 1.02 Nm Conjugado de partida : 190 % Conjugado máximo : 200 % Classe de isolamento : F Fator de serviço : 1.25 Momento de inércia (J) : 0.0007 kgm ² Categoria : N			Tempo de rotor bloqueado : 77s (frio) 43s (quente) Elevação de temperatura : 80 K Regime de serviço : S1 Temperatura ambiente : -20°C a +40°C Altitude : 1000 m Grau de proteção : IP55 Método de refrigeração : IC411 - TFVE Forma construtiva : B14D Sentido de rotação ¹ : Ambos Nível de ruído ² : 47.0 dB(A) Método de partida : Partida direta Massa aproximada ³ : 8.0 kg	
Potência	50%	75%	100%	
Rendimento (%)	48.0	54.0	64.0	
Cos φ	0.41	0.50	0.59	
Esforços na fundação Tração máxima : 42 N Compressão máxima : 121 N				
Dianteiro : 6201 ZZ Vedação : VRing Intervalo de lubrificação : - Quantidade de lubrificante : - Tipo de lubrificante : Mobil Polyrex EM				
Observações				
Esta revisão substitui e cancela a anterior, a qual deverá ser eliminada. (1) Olhando a ponta de eixo dianteira do motor. (2) Medido a 1m e com tolerância de +3dB(A). (3) Massa aproximada sujeito a alteração após fabricação. (4) Em 100% da carga nominal.		Os valores indicados são valores médios com base em ensaios e para alimentação em rede senoidal, sujeitos as tolerâncias da norma ABNT NBR 17094.		
Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data
Executor				
Verificador				
Data	06/01/2023	Página 1 / 2	Revisão	