



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DÓNOVAN PEREIRA JACOBINA
MATHEUS ÁVILA MOTA

SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE CORRENTE E TEMPERATURA DE UM MOTOR
DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.

Palmas – TO
2021

**DÓNOVAN PEREIRA JACOBINA
MATHEUS ÁVILA MOTA**

**SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE CORRENTE E TEMPERATURA DE UM MOTOR
DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, *Campus Palmas*.

Orientador: Mestre Kaisson Teodoro de Souza.

Coorientador: Mestre Felipe Tozzi Bittencourt.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Márcio Augusto Tamashiro

Prof. Dr. Élcio Precioso de Paiva

Palmas – TO

2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins**

J16s Jacobina, Dónovan Pereira
 Sistema para medição de corrente e temperatura de um motor de
 indução trifásico / Dónovan Pereira Jacobina, Matheus Ávila Mota. –
 Palmas, TO, 2021.
 105 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2021.

Orientador: Me. Kaison Teodoro de Souza
Coorientador: Me. Felipe Tozzi Bittencourt

1. Monitoramento de temperatura e corrente elétrica. 2. Motor de
indução trifásico. 3. Plataforma mobile. I. Mota, Matheus Ávila. II.
Souza, Kaison Teodoro de. III. Bittencourt, Felipe Tozzi. IV. Título.

CDD 621

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).


**DÓNOVAN PEREIRA JACOBINA
MATHEUS ÁVILA MOTA**

**SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE CORRENTE E TEMPERATURA DE UM MOTOR
DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Elétrica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins –
Campus Palmas, como exigência à obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

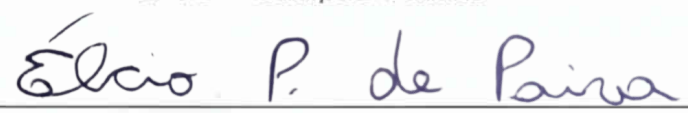
Aprovado em: 14/12/2021

BANCA AVALIADORA


Mestre Kaison Teodoro de Souza (Orientador)
IFTO – Campus Palmas

Mestre Felipe Tozzi Bittencourt (Coorientador)
IFTO – Campus Palmas


Doutor Márcio Augusto Tamashiro
IFTO – Campus Palmas


Doutor Élcio Precioso de Paiva
IFTO – Campus Palmas

Aos nossos familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a Deus por todas as oportunidades e pelo privilégio da vida.

O mais sincero agradecimento a confiança que o nosso orientador professor Kaison Teodoro de Souza depositou em nosso trabalho e capacidade. Ao nosso coorientador professor Felipe Tozzi Bittencourt, pela amizade e tranquilidade. As nossas famílias e amigos que nos deram o apoio emocional necessário para conseguir desenvolver o projeto. Ao João Emanuel Câmara Castro e Bernardo Souza Ferreira da Silva pela amizade e ajuda nos momentos mais difíceis.

A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim último, melhorar a humanidade.

Nikola Tesla

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de medição e aquisição dos parâmetros de um motor de indução trifásico. O sistema de medição é composto por um protótipo de dispositivo medidor, banco de dados e plataforma *mobile*. A confecção do *hardware* se dá através de um circuito auxiliar para a obtenção de valores de correntes por meio do sensor SCT-013-000, um módulo sensor MAX31865 e sensor de temperatura RTD PT100. E a implementação do software se dá utilizando a ferramenta node.js permitindo a aquisição de dados bem como a apresentação das informações. Realizou-se três testes para a validação do sistema, que consistiu nas aquisições das correntes e temperaturas de um motor de indução trifásico operando: com ausência do rotor, como rotor bloqueado e a vazio. O monitoramento dos parâmetros ocorreu com a captura de amostras dos valores medidos e a apresentação na tela do aplicativo, com a exibição de gráficos dos respectivos dados de corrente e temperatura do motor. Para os três testes, foram realizadas análises dos resultados obtidos, com o intuito de verificar o grau de precisão das medidas efetuadas pelo protótipo.

Palavras-chave: Motor. Monitoramento. Sensor.

ABSTRACT

This work describes the development of a system for measuring and acquiring the parameters of a three-phase induction motor. The measurement system is composed of a prototype measuring device, database and mobile platform. The hardware is built using an auxiliary circuit for obtaining current values using the SCT-013-000 sensor, a MAX31865 sensor module, and an RTD PT100 temperature sensor. The software implementation is done using the node.js tool, allowing the acquisition of data and the presentation of the information. Three tests were performed to validate the system, which consisted of the acquisition of currents and temperatures of a three-phase induction motor operating: with the rotor absent, as a locked rotor and at no load. The monitoring of the parameters occurred with the capture of samples of the measured values and the presentation on the application screen, with the display of graphs of the respective motor current and temperature data. For the three tests, analyses of the results obtained were performed, in order to verify the degree of accuracy of the measurements made by the prototype.

Keywords: Motor. Monitoring. Sensor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Vista em corte de um motor de indução de rotor bobinado.....	19
Figura 2 – Vista em corte longitudinal de um motor de indução com rotor gaiola de esquilo.....	20
Figura 3 – Partes que compõe um motor de indução trifásico.	21
Figura 4 - Enrolamentos monofásico e trifásico atravessados por correntes.	22
Figura 5 - Diagrama do fluxo de potência de um motor de indução.....	23
Figura 6 - Placa de identificação de um motor de indução trifásico.	24
Figura 7 - Enrolamentos expostos a sobreaquecimento.	26
Figura 8 - Enrolamentos expostos a desbalanceamento de tensão.....	28
Figura 9 - WEG <i>Motor Scan</i> fixado nas aletas de um motor elétrico.....	33
Figura 10 - <i>Software</i> de manutenção <i>Tractian</i>	34
Figura 11 - <i>Arduino IDE</i>	38
Figura 12 - Modelo de publicações e assinaturas (inscrição) para sensores <i>IoT</i>	39
Figura 13 - Pinagem do ESP-WROOM-32.....	42
Figura 14 - Sensor SCT-013-000.	45
Figura 15 - Esquemático do sensor SCT-013-000.	45
Figura 16 - Curva característica com diferentes valores de resistência.	46
Figura 17 - Arquitetura física de um RTD.....	47
Figura 18 - Curva característica R x T de um RTD PT100.....	47
Figura 19 - Sensor de temperatura RTD PT100.....	48
Figura 20 - Diagrama do sistema implementado.....	49
Figura 21 - Circuito auxiliar para realização do deslocamento da forma de onda da tensão sobre o resistor de carga.....	50
Figura 22 - Forma de onda de tensão no resistor de carga com deslocamento no eixo da tensão.....	52
Figura 23 - Circuito para a aquisição das correntes trifásicas.....	53
Figura 24 - Módulo sensor MAX31865.....	54
Figura 25 - Módulo sensor MAX31865, <i>jumpers</i> para configuração.....	55
Figura 26 - RTD PT100 de bulbo metálico na configuração de três fios.	55
Figura 27 - Conexões dos fios do RTD na configuração de três fios.	56

Figura 28 - Módulo sensor MAX31865 configurado para receber o sensor de temperatura RTD PT100.	56
Figura 29 - Protótipo do circuito desenvolvido.....	57
Figura 30 - Fluxograma do código implementado na Arduino <i>IDE</i>	59
Figura 31 - Gráfico de corrente medida versus fator de calibração.....	61
Figura 32 - Modelagem do banco de dados.	62
Figura 33 - Interface do programa de simulação de requisições.....	63
Figura 34 - Fluxograma do <i>front-end</i> desenvolvido.	64
Figura 35 - Telas do aplicativo desenvolvido.....	65
Figura 36 - <i>Fluke Thermal Imager</i> Ti32.	66
Figura 37 - Alicates amperímetro digital modelo: ET-3201A.....	67
Figura 38 - Motor de indução trifásico	68
Figura 39 - (a) Inserção do sensor de temperatura RTD PT100 no enrolamento do estator; (b) Motor já montado com a presença do sensor de temperatura RTD PT100.	68
Figura 40 - Arranjo das conexões entre o protótipo, motor de indução trifásico e variador de tensão trifásico.	69
Figura 41 - Imagem térmica dos enrolamentos do estator com a circulação de correntes nominais.....	71
Figura 42 - Gráfico da temperatura sob condições de correntes nominais e ausência do rotor.....	72
Figura 43 – Medição das correntes nas fases no motor sem o rotor: (a) Corrente na fase a; (b) Corrente na fase b e (c) Corrente na fase c.	72
Figura 44 - Gráficos das correntes das fases medidas pelo dispositivo e apresentadas na tela de histórico do aplicativo.	73
Figura 45 - Temperatura no ponto mais quente na carcaça do MIT.....	74
Figura 46 - Gráfico da temperatura sob condições de rotor bloqueado e de correntes nominais.....	75
Figura 47 – Medição das correntes nas fases no motor com o rotor bloqueado: (a) Corrente na fase a; (b) Corrente na fase b e (c) Corrente na fase c.	75
Figura 48 - Gráficos das correntes das fases medidas pelo dispositivo do motor com rotor bloqueado.	76

Figura 49 - Gráfico da temperatura com 250 amostras sob condições de rotor bloqueado e de correntes nominais.	77
Figura 50 - Gráficos das correntes das fases medidas pelo dispositivo com 250 amostras.....	77
Figura 51 - Tela de medição do aplicativo.....	78
Figura 52 - Temperatura na carcaça do motor antes de efetuar o teste com o motor funcionando a vazio.	79
Figura 53 - Gráfico da temperatura com o motor a vazio sob condições de correntes nominais.....	80
Figura 54 – Medição das correntes nas fases no motor com o motor operando a vazio: (a) Corrente na fase a; (b) Corrente na fase b e (c) Corrente na fase c.....	80
Figura 55 - Gráficos das correntes a vazio das fases medidas pelo dispositivo com 250 amostras.....	81
Figura 56 - Gráfico da temperatura com o motor a vazio sob condições de correntes nominais, com 1000 amostras medidas.	82
Figura 57 - Gráficos das correntes a vazio das fases medidas pelo dispositivo com 1000 amostras.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da temperatura em função da classe de isolamento.	27
Tabela 2 - Características da queima de motores e possíveis causas.....	29
Tabela 3 - Especificações do ESP-WROOM-32.	41
Tabela 4 - Relação entre valores medidos pelo protótipo e os medidores de referência no teste com a ausência do rotor.	73
Tabela 5 - Relação entre valores medidos pelo protótipo e os medidores de referência no teste com o rotor bloqueado.....	76
Tabela 6 - Relação entre valores medidos pelo protótipo e os medidores de referência no teste com o motor operando a vazio.	81
Tabela 7 - Custo total do protótipo com componentes comprados em território nacional.....	83
Tabela 8 - Custo total do protótipo com componentes comprados na China.	84

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVO GERAL	16
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3. JUSTIFICATIVA	17
1.4. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO (MIT).....	18
2.1.1. <i>Características construtivas e de funcionamento</i>	19
2.1.2. <i>Características técnicas</i>	23
2.2. FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	25
2.2.1. <i>Falhas de estator em motores de indução trifásicos</i>	25
2.2.2. <i>Relação das causas e efeitos das falhas</i>	29
2.3. MONITORAMENTO DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	31
2.3.1. <i>Tipos de monitoramento</i>	31
2.3.2. <i>Soluções comerciais de monitoramento</i>	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1. LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO, SOFTWARES E OUTRAS TECNOLOGIAS	35
3.1.1. <i>ECMAScript</i>	36
3.1.2. <i>Node.js</i>	36
3.1.3. <i>Engines e V8</i>	37
3.1.4. <i>Banco de dados</i>	37
3.1.5. <i>Arduino IDE</i>	37
3.1.6. <i>MQTT</i>	38
3.1.7. <i>React Native</i>	39
3.1.8. <i>Front-end</i>	39
3.1.9. <i>Back-end</i>	40
3.1.10. <i>Application Programming Interface (API)</i>	41
3.2. MICROCONTROLADOR ESP-WROOM-32	41
3.3. TRANSFORMADOR DE CORRENTE: SENSOR DE CORRENTE NÃO INVASIVO SCT-013-000	44

3.4. SENSOR DE TEMPERATURA RTD PT100	46
3.5. O SISTEMA PROPOSTO	48
3.5.1. <i>Circuito auxiliar do SCT-013-000</i>	49
3.5.2. <i>Módulo sensor MAX31865</i>	53
3.5.3. <i>Implementação do código na plataforma Arduino</i>	57
3.5.4. <i>Cálculo para aquisição dos valores das medições dos sensores de corrente</i>	60
3.5.5. <i>Calibração do sensor SCT-013-000</i>	60
3.5.6. <i>Desenvolvimento do front-end e back-end</i>	62
3.6. EQUIPAMENTOS MEDIDORES DE REFERÊNCIA	66
3.7. MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZADO PARA OS TESTES	67
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	70
4.1. TESTES E RESULTADOS NO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	70
4.1.1. <i>Teste no motor operando com o rotor ausente</i>	70
4.1.2. <i>Teste no motor operando com rotor bloqueado</i>	74
4.1.3. <i>Teste no motor operando a vazio</i>	78
4.2. CUSTO DO PROJETO.....	83
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
REFERÊNCIAS.....	86
APÊNDICE A – CÓDIGO PARA AQUISIÇÃO DE CORRENTE E TEMPERATURA ATRAVÉS DO MICROCONTROLADOR ESP-WROOM-32.....	96
APÊNDICE B – PROJETO DE <i>HARDWARE</i> DO PROTÓTIPO “TECO”	105

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento acelerado de novas tecnologias, é necessário cada vez mais a busca por conhecimento, principalmente na engenharia. O desenvolvimento de dispositivos e a implementação de plataformas por meio do *framework React Native* ou de outras linguagens de programação, é feito de forma a integrar a necessidade do usuário com o objetivo prático do sistema de *internet* das coisas (IoT – *Internet of Things*).

Para Perin (2017), as “máquinas de indução são largamente utilizadas devido a inúmeros fatores”, pois o custo-benefício é vantajoso em relação às alternativas disponíveis, apresentando relação satisfatória entre tamanho e potência. Assim, para utilização de motores de indução trifásicos na indústria é necessário o monitoramento de importantes parâmetros para observar o comportamento do motor. Dessa maneira sistemas de monitoramentos são ferramentas essenciais para a análise e aumento da vida útil das máquinas elétricas.

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de medição, chamado de “Teco”, que atua como medidor de correntes trifásicas e temperatura. Esse sistema pode ser utilizado para mensuração e análises de máquinas elétricas ou outros tipos de aplicação que não exigem um grau elevado de precisão. É capaz de coletar e armazenar as informações em um banco de dados e apresentar em um aplicativo desenvolvido por meio do *framework React Native* e auxílio da biblioteca *Expo* para simulação da aplicação *mobile* no computador.

O “Teco” foi desenvolvido com três elementos principais: a *API back-end*, o *front-end* e o circuito medidor. Pela simplicidade do circuito desenvolvido faz-se necessário uma programação robusta para compensação dos erros obtidos pela medição, a elaboração de uma equação de calibração que aproxima os valores medidos pelos sensores aos valores reais dos parâmetros mensurados.

Para a verificação do sistema de medição de correntes e temperatura, foi realizado testes experimentais para a avaliação de desempenho em um motor de indução trifásico, e observados os parâmetros de corrente e temperatura identificados pelo protótipo de circuito comparando-os com os resultados obtidos por instrumentos de medição utilizados como referência. O algoritmo de medição e conexão foi adaptado com funções implementadas para o cálculo da corrente e utilizando a função

para medição de temperatura que está presente no código aberto disponibilizado pela *Adafruit Industries*.

1.1. Objetivo geral

Desenvolver uma plataforma *mobile* conjuntamente com um sistema de medição e aquisição de dados, utilizando o microcontrolador ESP-WROOM-32. Os parâmetros monitorados serão a corrente elétrica trifásica e a temperatura de um motor de indução trifásico, medidos através dos sensores SCT-013-000 e RTD PT100.

1.2. Objetivos específicos

- Estudo do funcionamento do sensor de corrente não invasivo SCT-013-000 em conjunto com ESP-WROOM-32;
- Equacionamento do fator de calibração do sensor de corrente SCT-013-000;
- Estabelecimento da comunicação do microcontrolador ESP-WROOM-32 com os circuitos de medição;
- Efetuar a programação da plataforma microcontrolada para a obtenção das grandezas medidas;
- Desenvolvimento da plataforma *mobile* e efetuar a comunicação com o microcontrolador;
- Obtenção dos valores da corrente elétrica trifásica e temperatura no enrolamento do estator;
- Validação do sistema de medição por meio de ensaios experimentais.

1.3. Justificativa

Através das medições de corrente e temperatura é possível analisar alguns comportamentos do motor de indução trifásico em determinadas condições de operação, possibilitando por exemplo, o controle de carga e a indicação de possíveis falhas associadas a elevação de temperatura e sobrecarga.

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo propor um sistema de medição utilizando a corrente elétrica e a temperatura como grandezas principais para a realização do monitoramento. Com isso, o dispositivo desenvolvido junto a plataforma *mobile* implementada poderão auxiliar profissionais e alunos em medições práticas e ensaios laboratoriais.

As medições experimentais de validação do sistema são centradas no monitoramento de um motor de indução trifásico presente no IFTO *campus* Palmas, que através dos sensores de corrente elétrica não invasivos e sensor de temperatura possibilitam a captação de informações relevantes sobre o funcionamento da máquina elétrica. O desenvolvimento e as questões relacionadas a implementação do sistema de monitoramento como um todo são expostas no capítulo materiais e métodos.

1.4. Apresentação do trabalho

O trabalho foi organizado em cinco tópicos principais:

1. **Introdução:** apresenta a contextualização do trabalho;
2. **Fundamentação teórica:** descreve os conceitos teóricos para o entendimento do trabalho;
3. **Materiais e Métodos:** descreve todo o desenvolvimento do projeto e as etapas realizadas;
4. **Análise dos resultados:** apresenta os testes realizados no motor de indução trifásico utilizando o medidor de corrente e temperatura desenvolvido, e exibindo os resultados obtidos;
5. **Considerações finais:** apresenta as considerações finais e prováveis trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será apresentado sobre a importância do motor de indução trifásico no contexto do setor elétrico e industrial brasileiro, além das características técnicas, construtivas e de funcionamento do motor. Também será apresentado as principais causas de falhas e sobre o monitoramento dos parâmetros do MIT.

2.1. Motores de indução trifásico (MIT)

Um dos fatores importantes para o uso do motor de indução trifásico é o fato de que são máquinas que possuem facilidades construtivas pela inexistência de contatos móveis e ímãs permanentes. Esses fatores impactam diretamente no custo do processo de fabricação da máquina, tornando-os mais atrativos. Desse modo o MIT é amplamente utilizado em diversos segmentos industriais no Brasil. Segundo informações disponibilizadas pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) os motores representam mais de 26% do consumo total de eletricidade no país, sendo responsáveis por cerca de 68% de toda energia do setor industrial brasileiro (ANASTACIO *et al.*, 2020).

Segundo Umans (2014) a circulação de correntes induzidas nos enrolamentos do rotor de uma máquina de indução, acontecem por meio da combinação da variação, no tempo, das correntes de estator e do movimento do rotor em relação ao estator. O MIT se torna robusto devido a inexistência de conexão elétrica entre a máquina e o rotor diminuindo os riscos causados por possíveis danos provocados pela produção de faíscas. Muitos fatores levam a vasta utilização de máquinas indutivas, como o seu custo-benefício apresentando uma boa relação entre a potência, o tamanho e a facilidade de operação.

Contudo o mau funcionamento das máquinas elétricas pode prejudicar todo o sistema elétrico na indústria, comprometendo a produção de bens ou serviços para os consumidores finais. O desperdício de energia por meio de motores de rendimentos insatisfatórios deve ser minimizado pela manutenção ou a substituição do MIT, para que motores mais eficientes entrem em operação.

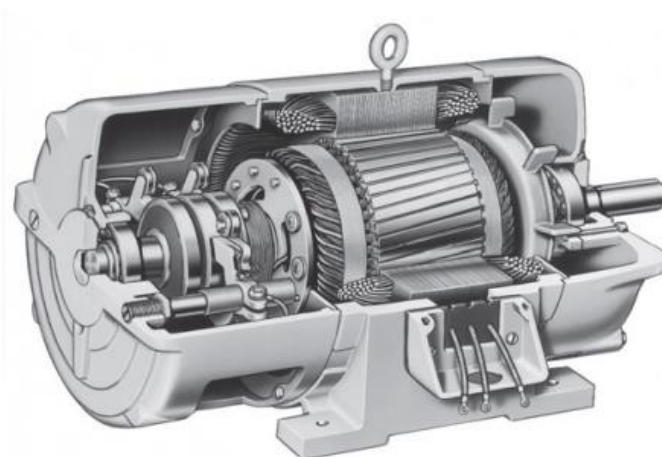
2.1.1. Características construtivas e de funcionamento

Por ser um equipamento muito importante, o MIT é uma máquina de indução em corrente alternada, sendo construído com duas partes importantes: o estator que é a parte estacionária do motor, chamada de enrolamentos de armadura, sendo usado para se referir a um enrolamento ou grupo de enrolamentos que conduzam corrente alternada; e o rotor (parte girante) também chamado de enrolamentos de campo, podendo ser de dois tipos diferentes, o em gaiola de esquilo e o bobinado (UMANS, 2014). De acordo com Umans (2014, p. 244):

O rotor enrolado ou bobinado é construído na forma de um enrolamento polifásico semelhante ao estator tendo o mesmo número de polos. Os terminais do enrolamento do rotor são conectados a anéis deslizantes isolados montados sobre o eixo. Escovas de carvão apoiadas sobre esses anéis permitem que os terminais do rotor se tornem disponíveis externamente ao motor.

Segundo Umans (2014, p. 244) “as máquinas de indução de rotor bobinado são relativamente incomuns, encontradas apenas em um número limitado de aplicações especializadas”. Pois estes motores são aplicados nos casos em que a carga possui alto conjugado resistente ou alta inércia na partida, possibilitando o aumento de sua resistência do rotor, dessa maneira aumentando o conjugado de partida com corrente relativamente baixa (WEG, 2021). A Figura 1 ilustra um motor de indução de rotor bobinado.

Figura 1 - Vista em corte de um motor de indução de rotor bobinado.



Fonte: Chapman (2013).

O outro tipo de rotor é denominado rotor de gaiola de esquilo, cujo enrolamentos apresentam baixa resistência entre si, ou seja, estão eletricamente em curto-circuito e não apresentam conexões externas, funcionando com velocidade constante e variando ao passo que a carga mecânica aplicada ao eixo se altera. Para Chapman (2013), a “forma construtiva é conhecida como rotor de gaiola de esquilo porque, se os condutores fossem examinados isoladamente, seriam semelhantes às rodas nas quais os esquilos ou os *hamsters* correm fazendo exercício.” A Figura 2 apresenta a vista em corte longitudinal de um motor de indução trifásico.

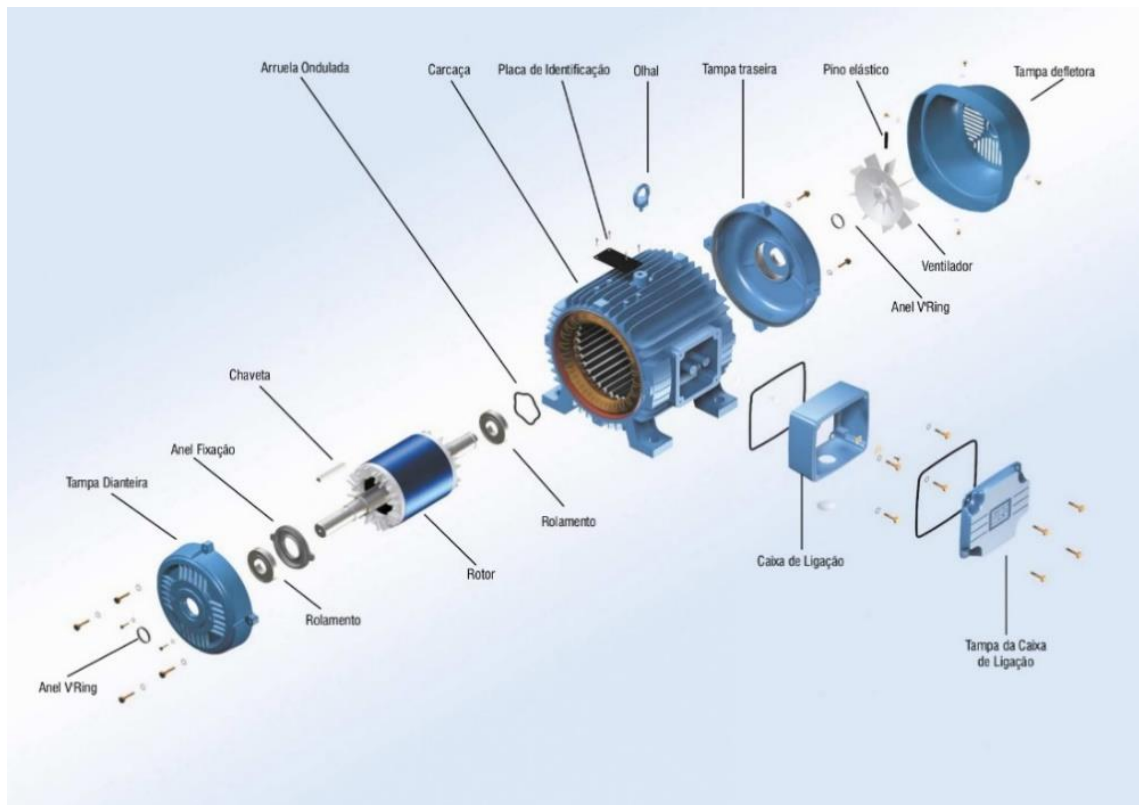
Figura 2 – Vista em corte longitudinal de um motor de indução com rotor gaiola de esquilo.



Fonte: Umans (2014).

A forma como é construído o rotor de um motor de indução contribui na confiabilidade de utilização e no custo, pois, segundo Umans (2014) os enrolamentos do estator são basicamente barras sólidas de alumínio fundidas nas ranhuras do rotor e colocadas em curto circuito por anéis de alumínio fundido em cada extremidade do rotor. É apresentado na Figura 3 a visão das partes construtivas que compõem um MIT.

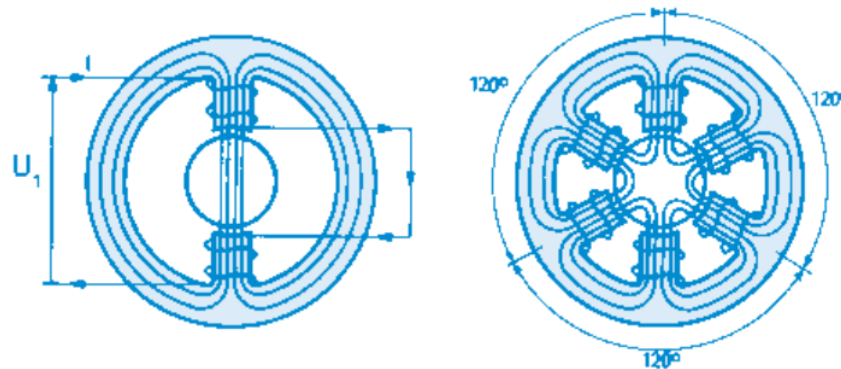
Figura 3 – Partes que compõe um motor de indução trifásico.



Fonte: Catálogo WEG (2005).

Quando o estator de um motor trifásico é ligado a uma fonte de potência trifásica, correntes circulam por seus enrolamentos que originam o aparecimento de um campo magnético girante. Estas correntes de excitação fornecem a potência reativa necessária para estabelecer esse campo magnético (KNÜPPE, 2013). A Figura 4 ilustra as correntes trifásicas que percorrem os enrolamentos (fases) do estator gerando, em cada fase, campos pulsantes, defasados de um ângulo igual ao defasamento entre as tensões aplicadas, cujos eixos de simetria são fixos no espaço, mas cuja resultante é um campo que gira num determinado sentido, denominado campo girante (KNÜPPE, 2013).

Figura 4 - Enrolamentos monofásico e trifásico atravessados por correntes.



Fonte: Catálogo WEG (2005).

Desse modo um campo girante é criado no rotor com uma tensão alternada aplicada nos terminais dos enrolamentos do estator, ao passo que o campo girante corta os condutores do enrolamento de armadura (rotor), produzindo uma corrente elétrica induzida, dessa forma o esperado é que o motor opere de maneira adequada.

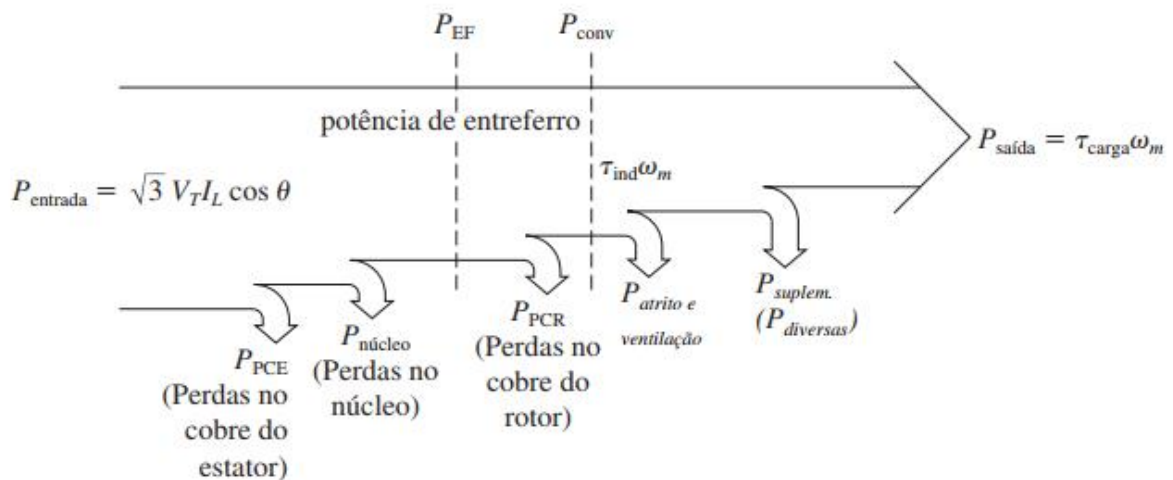
Para Chapman (2013) o movimento relativo do rotor em relação ao campo magnético do estator produz uma tensão induzida em uma barra do rotor, tal tensão induzida dependerá da velocidade do rotor em relação aos campos magnéticos. O termo escorregamento é usado para descrever o movimento relativo, sendo a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor, ou seja, expressa a perda da velocidade do rotor, representado em uma base por unidade ou porcentagem.

Para atingir um certo grau de eficiência um motor deve funcionar com rendimento satisfatório, o rendimento por sua vez é expresso pela relação entre a saída e a entrada de potência. Estas determinações de valores a partir de medições podem ser utilizadas para comparar uma máquina com outra, pois o resultado da diferença entre a potência de entrada e a potência de saída de uma máquina corresponde às perdas que ocorrem em seu interior. Conforme Chapman (2013, p. 321):

A potência de entrada de um motor de indução P_{entrada} é na forma de tensões e correntes trifásicas. As primeiras perdas encontradas na máquina são perdas I^2R nos enrolamentos do estator (as perdas no cobre do estator P_{PCE}). Então, certa quantidade de potência é perdida como histerese e corrente parasita no estator ($P_{\text{núcleo}}$).

Dessa forma, a potência remanescente é transferida ao rotor por intermédio do entreferro entre o estator e o rotor, sendo denominada potência de entreferro (P_{EF}). De acordo com Chapman (2013), “após a potência ser transferida ao rotor, uma parte dela é perdida como perdas P_R (as perdas no cobre do rotor P_{PCR}) e o restante é convertido da forma elétrica para a forma mecânica (P_{conv})”. A potência de saída do motor apresenta-se após serem subtraídas as perdas por atrito e ventilação e as perdas suplementares, respectivamente P_{AeV} e $P_{suplem.}$. A Figura 5 possui o diagrama de fluxo de potência com relação entre a potência elétrica de entreferro e a potência mecânica de saída de um motor de indução.

Figura 5 - Diagrama do fluxo de potência de um motor de indução.



Fonte: Chapman (2013).

As perdas nos motores de indução ocorrem durante o processo de conversão de energia, impactando no aumento da temperatura induzida pelas fontes de calor relacionadas ao tipo de material e as tecnologias utilizadas em sua fabricação, sendo denominadas como perdas por efeito *Joule* (P_{PCR}). Essas perdas variam conforme a temperatura se altera, tal variação das perdas deve-se ao aumento da resistência elétrica (MUXIRI, 2018).

2.1.2. Características técnicas

Algumas características são inerentes a máquinas elétricas, as quais são apresentadas na placa de identificação mostrada na Figura 6, pois contém todas a

informações sobre os parâmetros de fabricação do motor. De acordo com Pedrini (2021, p. 9) “nos dados de placa do motor de indução geralmente constam dados da tensão de entrada, corrente de estator, fator de potência, velocidade do rotor, entre outros”.

Figura 6 - Placa de identificação de um motor de indução trifásico.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

Os esquemas de ligações indicados nos dados de placa do motor são geralmente em Δ (delta ou triângulo) e em Y (estrela ou ípsilon), com níveis de tensão de 220V e 380V respectivamente.

2.2. Falhas em motores de indução trifásicos

Segundo Baccharini (2005, p. 13) “os fatores que afetam o comportamento do motor podem ser agrupados em problemas de origem magnética ou elétrica e problemas de origem mecânica”, ou seja, dividem-se em falhas elétricas e mecânicas internas e falhas elétricas, mecânicas e ambientais na parte externa do motor. Internamente no motor podem ocorrer falhas no estator, estas falhas são denominadas elétricas.

Existem vários tipos de danos em enrolamentos em motores trifásicos, pois mesmo com as especificações do motor não se pode garantir seu correto funcionamento. Tensão, frequência, polaridade, grau de proteção e outras especificações são importantes parâmetros a serem considerados antes de colocar o MIT em funcionamento, “caso ocorra a queima de um motor elétrico, a primeira providência a ser tomada é diagnosticar a causa [...]” (WEG, 2019).

2.2.1. Falhas de estator em motores de indução trifásicos

As falhas de estator interferem na corrente que circula em seu enrolamento, sendo uma anomalia interessante para que se efetue uma análise, pois de acordo com Guedes (2019, p. 26) “a evolução desse tipo de dano leva ao rompimento da isolação dos condutores, o que gera um curto-circuito entre as espiras, fazendo com que a corrente de falta circule pelas espiras danificadas”. Os danos na isolação dos condutores da bobina, podem ser originados devido ao sobreaquecimento do motor, além de outros motivos, como desbalanceamento de tensão, rotor travado etc.

2.2.1.1. Sobreaquecimento

De acordo com Guedes (2019, p. 26, *apud* RIERA-GUASP et al., 2015) “com o efeito térmico da corrente de falta, consideravelmente maior do que a corrente de condições normais de operação, o isolamento se degrada progressivamente, podendo levar a uma falha irreparável rapidamente”. A temperatura é uma grandeza do Sistema Internacional de Medidas (SI), sendo importante parâmetro para determinação da vida útil de um motor elétrico. Quando a temperatura máxima for excedida, essa elevação

da temperatura em um motor de corrente alternada, tanto interna quanto externa limita a potência nominal e deteriora os materiais isolantes rapidamente, rompendo a camada de verniz dos enrolamentos e causando curto entre as bobinas, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Enrolamentos expostos a sobreaquecimento.



Fonte: WEG (2019).

Para motores elétricos a classe de isolamento se faz necessária para regulamentação de limites máximos de operação em determinadas temperaturas. “A elevação máxima de temperatura que uma máquina pode suportar depende da classe de isolamento de seus enrolamentos” (CHAPMAN, 2013). Essas classes de isolamento são padronizadas conforme a ABNT NBR 17094 e IEC 60034-1, e divididas em quatro classes, sendo elas: A, E, B, F e H, respectivamente elevações de temperatura com valores de 105, 120, 130, 155 e 180 °C acima da temperatura ambiente. Dependendo da construção da máquina e do tipo de medição da temperatura, quanto maior for a classe de isolamento, maior será a potência que a máquina poderá fornecer sem sobreaquecer seus enrolamentos. (CHAPMAN, 2013).

O sobreaquecimento dos enrolamentos é um problema relevante, por isso o principal objetivo da isolamento é diminuir, limitar e direcionar o fluxo de corrente em um condutor para um potencial mais baixo, protegendo assim o condutor contra a degradação provocada pela transferência de calor do meio externo para a parte

interna do condutor. Um material isolante que suporte grandes elevações de temperatura é de extrema importância para a delimitação das dimensões físicas de um motor, protegendo a vida útil e principalmente resguardando o motor contra muitas intempéries do ambiente externo.

As normas de motores elétricos estabelecem a máxima elevação de temperatura e também um máximo para a temperatura ambiente, especificando uma elevação de temperatura para cada classe de isolamento. Portanto, essas normas limitam os valores para o ponto mais quente da máquina (WEG, 2021). A Tabela 1 apresenta os valores numéricos e composição da temperatura permitida no ponto com temperatura mais elevada.

Tabela 1 - Composição da temperatura em função da classe de isolamento.

Classe de isolamento		A	E	B	F	H
Temperatura ambiente	°C	40	40	40	40	40
Δt = elevação de temperatura (método da resistência)	°C	60	75	80	105	125
Diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média	°C	5	5	10	10	15
Total: temperatura do ponto mais quente	°C	105	120	130	155	180

Fonte: Guia de especificação: motores elétricos, WEG (2021).

2.2.1.2. Desequilíbrio de fase

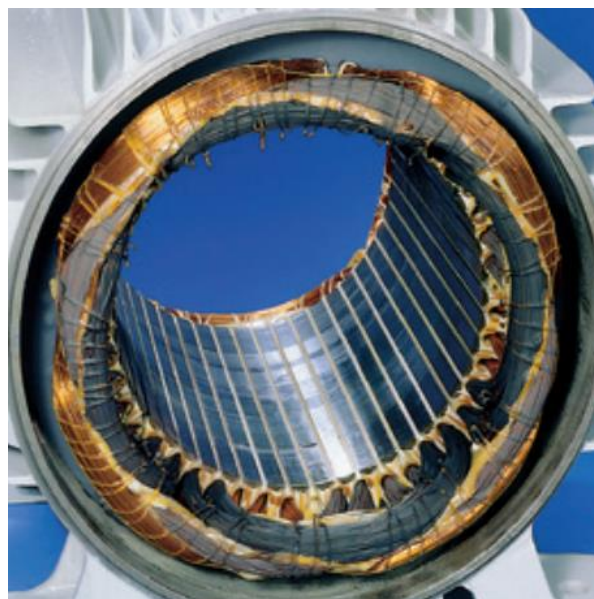
A identificação do desequilíbrio de fase é geralmente realizada através da análise da corrente. A corrente ou a tensão em desequilíbrio entre as fases ocasionam o desbalanceamento da tensão. Ao apresentar valores diferentes de 120° elétricos em módulo ou defasagem angular entre as fases, o desequilíbrio se agrava ocasionando graves danos nos motores de indução trifásico. Paulilo (2013) afirma que “os desequilíbrios de tensão afetam fortemente o nível de distribuição de energia elétrica se comparado com os demais níveis. Por este motivo, as fontes destes estão diretamente associadas com as cargas elétricas e com os arranjos utilizados para sua alimentação neste nível de tensão”.

As consequências provocadas pelo desequilíbrio de tensões, são danosas para a máquina elétrica, incidindo no desempenho e também na vida útil. Os motores de indução trifásicos possuem um conjunto de grandezas eletromecânicas e térmicas que determinam o comportamento sob determinadas condições (PAULILO, 2013). Dessa forma Paulilo (2013) afirma que:

“[...] quando as tensões de alimentação apresentam desequilíbrios, seja em módulo ou em ângulo, ocorrem alterações nas características térmicas, elétricas e mecânicas dos motores de indução, afetando o seu desempenho e comprometendo a sua vida útil”.

Ao aplicar tensões de linha desequilibradas aos motores de indução, haverá uma deformação no campo magnético girante produzindo o desequilíbrio magnético do motor de tal forma a originar uma operação não uniforme do motor. Dessa maneira Paulilo (2013) assegura que “a deformação do campo magnético girante é resultado da composição dos campos de sequência positiva e negativa”, refletindo em valores de impedâncias de sequência negativa muito pequenas, ocasionando um desequilíbrio elevado de corrente. Ao operar sob tais condições de desequilíbrios de corrente e tensão o motor apresentará sobreaquecimento que diminuirá sua vida útil e ocasionará impactos econômicos (PAULILO, 2013). A Figura 8 apresenta enrolamentos defeituosos do estator devido ao desbalanceamento da tensão.

Figura 8 - Enrolamentos expostos a desbalanceamento de tensão.



Fonte: WEG (2019).

2.2.2. Relação das causas e efeitos das falhas

Existem outras causas para falhas e queimas de motores elétricos, todas prejudiciais para o desempenho do setor elétrico, que necessita do funcionamento eficaz de um motor. Por isso é fundamental que o motivo da queima seja identificado e corrigido, evitando dessa maneira outras queimas do motor (WEG, 2019). A Tabela 2 apresenta algumas das principais causas para a queima de um motor trifásico.

Tabela 2 - Características da queima de motores e possíveis causas.

Característica da queima	Possíveis causas
Curto entre espiras ou bobina curto-circuitada	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminação interna do motor; • Falha do esmalte de isolamento do fio; • Falha do verniz de impregnação; • Rápidas oscilações na tensão de alimentação.
Curto entre fases	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminação interna do motor; • Degradação do material isolante por ressecamento, ocasionada por excesso de temperatura; • Falha do material isolante.
Curto na conexão	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminação interna do motor; • Falha do material isolante; • Superaquecimento da conexão devido a mau contato
Curto na saída da ranhura ou curto no interior da ranhura	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminação interna do motor; • Degradação do material isolante por ressecamento, ocasionada por excesso de temperatura. • Falha do esmalte de isolamento do fio; • Falha do verniz de impregnação; • Falha do material isolante; • Rápidas oscilações na tensão de alimentação.

Pico de tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Motor acionado por inversor de frequência com alguns parâmetros incorretos (amplitude do pulso de tensão, rise time, dV/dt, distância entre pulsos, frequência de chaveamento); • Oscilação violenta na tensão de alimentação, por exemplo, descargas atmosféricas; • Surtos de manobra de banco de capacitores.
Desbalanceamento de tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Desequilíbrio de tensão e/ou de corrente entre as fases; • Falha em banco de capacitores; • Maus contatos em conexões, chaves, contadores, disjuntores, etc.; • Oscilações de tensão nas três fases.
Rotor travado	<ul style="list-style-type: none"> • Excessiva dificuldade na partida do motor, devido a elevada queda de tensão, inércia e torque de carga muito elevados; • Travamento do eixo da carga.
Sobreaquecimento	<ul style="list-style-type: none"> • Cabos de alimentação muito longos e/ou muito finos; • Conexão incorreta dos cabos de ligação do motor; • Excessivo número de partidas em tempo curto; • Excesso de carga na ponta de eixo (permanente ou eventual/periódico); • Sobretensão ou subtensão na rede de alimentação (permanente ou eventual/periódico); • Ventilação deficiente (tampa defletora danificada ou obstruída, sujeira sobre a carcaça, temperatura ambiente elevada, etc.).
Falta de fase: ▪ <i>Estrela (Y)</i> : queima de duas fases	<ul style="list-style-type: none"> • Mau contato em chave, contator ou disjuntor; • Mau contato em conexões; • Mau contato nos terminais de uma fase do transformador;

<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Triângulo</i> (Δ): queima de uma fase 	<ul style="list-style-type: none"> • Queima de uma fase do transformador de alimentação; • Queima de um fusível; • Rompimento de um cabo alimentador
--	---

Fonte: Adaptada do catálogo: Danos em Enrolamentos, WEG (2019).

Para uma análise que apresente resultados satisfatórios concernentes ao estado em que a máquina se encontra, é primordial averiguar o evento causador, tais eventos incidirão na queima do motor. A elevação da temperatura pode ser ocasionada por vários tipos de fatores, sendo um deles o desbalanceamento de corrente, dessa maneira é importante averiguar estes parâmetros para a prevenir o mal funcionamento do MIT.

2.3. Monitoramento de máquinas e equipamentos

Um monitoramento serve para acompanhar, medir e analisar determinadas informações. Segundo Neto (2006) a importância de monitorar máquinas e equipamentos está no fato de conhecer melhor a condição de operação, evidenciando o aumento da confiança dos dados monitorados para uma aplicação específica. De acordo com Neto (2006, p. 99, *apud* SOUZA, 2002) “entende-se por monitoramento de máquinas todo e qualquer processo, onde se possam acompanhar parâmetros indicadores das reais condições da máquina”. Dessa maneira, o monitoramento executa uma avaliação do equipamento, administrando as informações para apresentarem as condições regulares dos itens analisados.

2.3.1. Tipos de monitoramento

Nos trabalhos apresentados por Neto (2006) e Ferreira (2019) são descritos alguns tipos de monitoramentos:

- Monitoramento subjetivo – Geralmente é executada por uma equipe de manutenção, tendo como finalidade acompanhar equipamentos e máquinas. De acordo com Ferreira (2019, *apud* KARDEC E NASCIF, 2015) “este tipo de

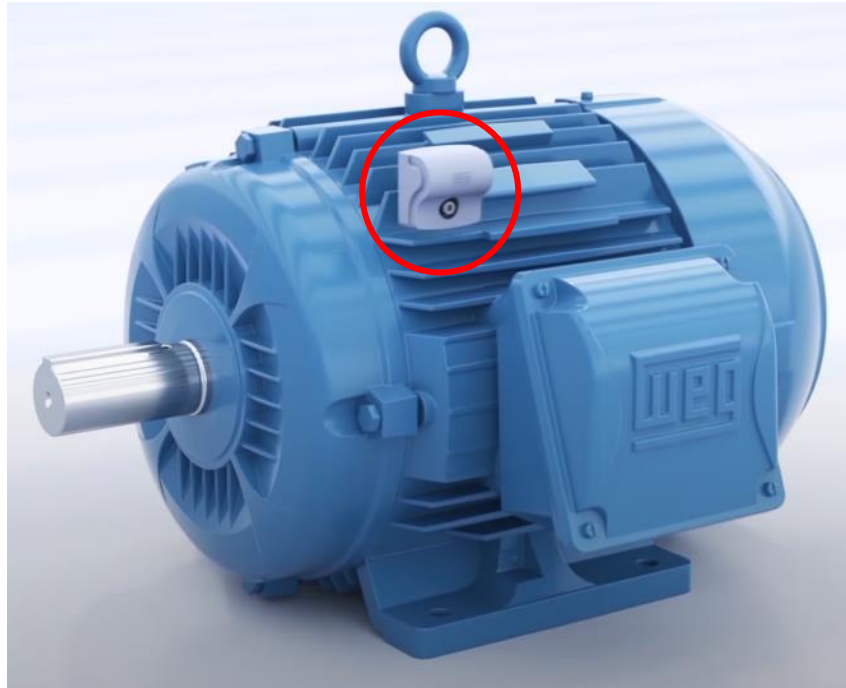
monitoramento ocorre quando o profissional da manutenção possui muita experiência e conhecimento no equipamento”.

- Monitoramento objetivo – A determinação da periodicidade é feita de forma prévia, sendo utilizado métodos específicos e medições em pontos desejados e dados comparados a parâmetros predeterminados. Um exemplo é a instalação de sensores nas máquinas, possibilitando a leitura dos parâmetros desejados pelo operador.
- Monitoramento contínuo – Neto (2006, p. 100) afirma que no monitoramento contínuo “são instalados sensores nas máquinas, cabos e um sistema de gerenciamento com acompanhamento em tempo integral de cada ponto de medição”. É um tipo de monitoramento que é aplicado quando o tempo de desenvolvimento do defeito é curto, em que um conjunto de dispositivos promovem o acesso e interação em tempo real entre o operador e o equipamento (FERREIRA, 2019). É possível controlar variáveis típicas como corrente elétrica e a temperatura em motores elétricos (FERREIRA, 2019, p. 25, *apud* KARDEC E NASCIF, 2015).

2.3.2. Soluções comerciais de monitoramento

Alguns equipamentos presentes no mercado realizam o monitoramento de parâmetros em máquinas elétricas, como é o caso da WEG *Motor Scan* e da *Tractian*. A WEG *Motor Scan* é um dispositivo que faz o diagnóstico, monitoramento e indica manutenções preditivas em motores elétricos por meio de uma inteligência artificial chamada de *Weg Motor Specialist*. O dispositivo é fixado na carcaça do motor sem a necessidade de conexões elétricas entre o sensor e o motor. As informações coletadas via *Bluetooth* para o aplicativo *mobile*, sendo enviadas e armazenadas na nuvem, como apresentado na Figura 9. Para uma análise mais detalhada utiliza-se o WEG *Motor Fleet Management*.

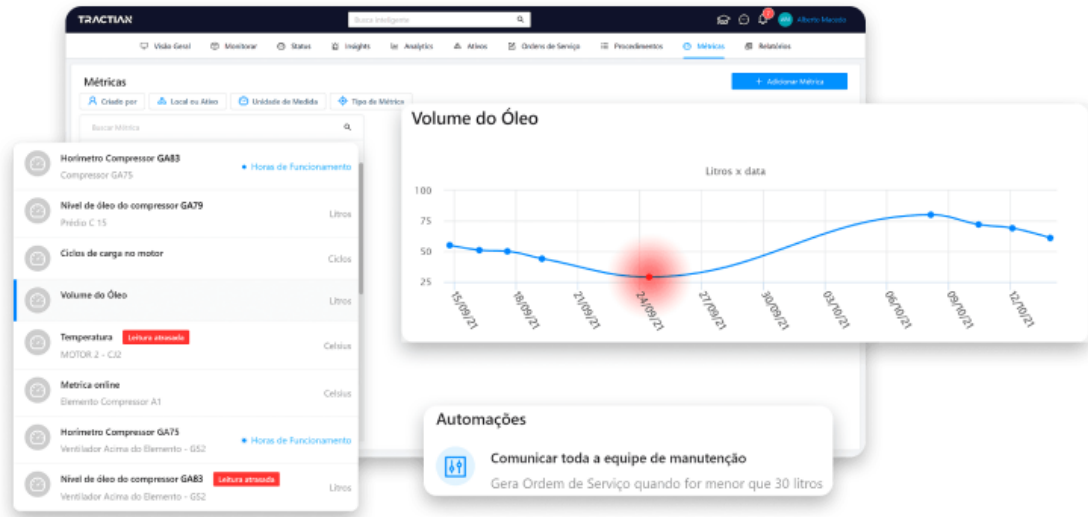
Figura 9 - WEG Motor Scan fixado nas aletas de um motor elétrico.



Fonte: WEG (2021).

A *Tractian* foi fundada em 2019 com o intuito de otimizar o monitoramento de máquinas elétricas por meio de uma plataforma *online* de equipamentos, como apresentada na Figura 10, que analisa por meio de sensores dados como: a vibração, temperatura e consumo de energia, possibilitando a detecção de falhas e de informações sobre as máquinas conectadas ao sistema em tempo real. Não há a necessidade da utilização de *Wi-Fi*, pois a comunicação dos dados é feita via 3G/4G. Dessa forma a *Tractian* identifica qualquer anomalia e otimiza o tempo de resposta do operador, permitindo a intervenção antes que ocorra o dano.

Figura 10 - Software de manutenção *Tractian*.



Fonte: *Tractian* (2021).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será apresentada as definições concernentes as tecnologias utilizadas para concepção e implementação do sistema proposto, junto as características técnicas, construtivas e de funcionamento dos componentes que constitui o sistema.

3.1. Linguagens de programação, *softwares* e outras tecnologias

As linguagens permitem delimitar como a comunicação pode ser feita, seja através de pessoas ou máquinas. Linguagens de programação são importantes para o desenvolvimento de novas tecnologias, melhorando dispositivos e contribuindo para a evolução em inúmeras áreas.

Ao aprender os conceitos de linguagens de programação, é tão interessante quanto necessário abordar aspectos de implementação que afetam esses conceitos. Em alguns casos, um entendimento de questões de implementação leva ao motivo pelo qual as linguagens foram projetadas de determinada forma. Por sua vez, esse conhecimento leva à habilidade de usar uma linguagem de maneira mais inteligente, conforme foi projetada para ser usada. (SEBESTA, 2018, p. 4).

Dessa forma, Sebesta (2018) afirma que linguagem de programação auxilia o programador na concepção e implementação de uma ideia, porém ao estudar os conceitos de linguagens de programação, os programadores podem aprender sobre partes antes desconhecidas e não utilizadas das linguagens, e com o conhecimento das construções de linguagens é possível reduzir as limitações no desenvolvimento do *software*.

O ambiente de programação, é a ferramenta em que a linguagem de programação é utilizada para desenvolver um *software*. É necessário que seu funcionamento satisfaça as aplicações que fora programado, levando em consideração a lógica utilizada e o tempo de interação com o ambiente em análise.

Para o desenvolvimento, deve-se utilizar a linguagem de programação, o ambiente em que será programado, *frameworks*, *engines* e outras ferramentas que

auxiliam a implementação. A seguir será descrito algumas ferramentas que serão utilizados para a concepção, programação e aplicação.

3.1.1. *ECMAScript*

JavaScript é a linguagem de programação da *web*. A ampla maioria dos *sites* modernos usa *JavaScript* e todos os navegadores modernos – em computadores de mesa, consoles de jogos, *tablets* e *smartphones* – incluem interpretadores *JavaScript*, tornando-a a linguagem de programação mais onipresente da história. *JavaScript* faz parte da tríade de tecnologias que todos os desenvolvedores *web* devem conhecer: *HTML*, para especificar o conteúdo de páginas *web*; *CSS*, para especificar a apresentação dessas páginas; e *JavaScript*, para especificar o comportamento delas (FLANAGAN 2013).

O *ECMAScript (ES)* é a especificação da linguagem de *script* que o *JavaScript* implementa. Isto é, a descrição de uma linguagem de *script*, sendo padronizado pela *Ecma International* — associação criada em 1961 dedicada à padronização de sistemas de informação e comunicação — na especificação ECMA-262 (PINHO 2017).

3.1.2. *Node.js*

Node.js não é uma linguagem de programação nem tampouco um *framework*. A definição mais apropriada seria: um ambiente de *runtime* para *javascript* que roda em cima de uma *engine* conhecida como *Google v8*. O *Node.js* nasceu de uma ideia do Ryan Dahl que buscava uma solução para o problema de acompanhar o progresso de *upload* de arquivos sem ter a necessidade de fazer *pooling* no servidor. Em 2009 na JSConf EU ele apresentou o *Node.js* e introduziu o *javascript server side* com *I/O* não bloqueante, ganhando assim o interesse da comunidade que começou a contribuir com o projeto desde a versão 0.x (NETO, 2020).

3.1.3. *Engines* e V8

Engines ou motores, na programação são bibliotecas desenvolvidas para fornecer suporte à linguagem e a *API* gráfica, com o intuito de reduzir a quantidade de funções comum a aplicação que está sendo construída (OLIVEIRA, 2013).

Com isso o V8 é uma *engine* (motor) criada pela *Google* para ser usada no *browser chrome*. Em 2008 a *Google* tornou o V8 *open source* e passou a chamá-lo de *Chromium project*. Essa mudança possibilitou que a comunidade entendesse a *engine* em si, além de compreender como o *javascript* é interpretado e compilado pela mesma (NETO, 2020).

3.1.4. Banco de dados

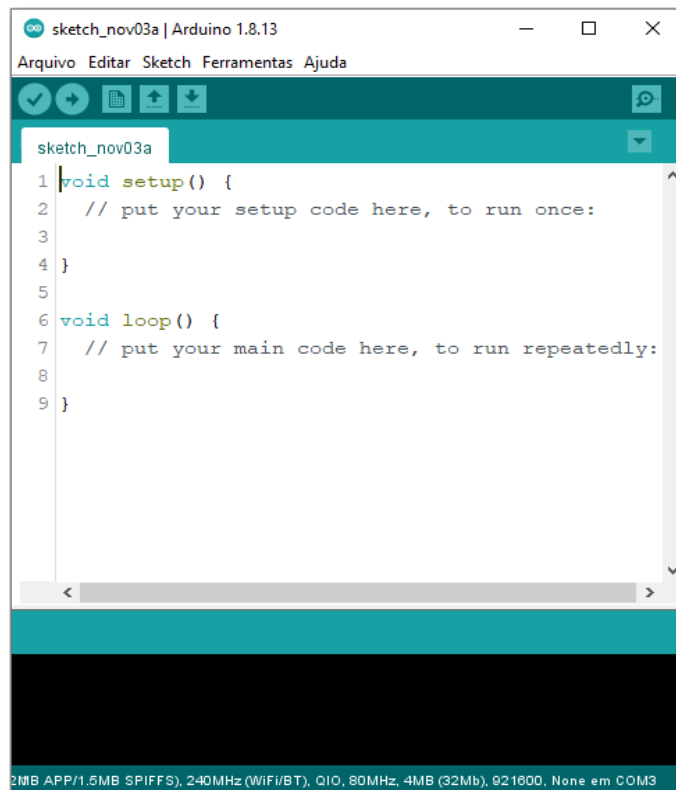
Segundo Date (2004) os bancos de Dados, *DBMS* (*Data Base Management System*) ou SGBD (Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados) são sistemas de armazenamento de dados baseados em dispositivos ou equipamentos, utilizados para esta tarefa, ou seja, um sistema cujo objetivo global é registrar e manter informação. Esta informação é um dado considerado necessário para ser armazenado.

O banco de dados *MongoDB* é um exemplo de sistema de gerenciamento de dados, *software*, não relacional orientado a documentos escrito no formato *JSON*, em que cada documento escrito é agrupado em coleções. Foi desenvolvida pela empresa 10gen, em 2007 que passou a ser chamada de *MongoDB, Inc* (*MONGODB, INC.*, 2021).

3.1.5. Arduino *IDE*

É uma interface de desenvolvimento de ambiente (*Interface Development Environment*) como ilustrado na Figura 11, a programação utiliza um código aberto, denominado linguagem Arduino que é semelhante a linguagem C e C++. É um *software* livre com o objetivo de envio e execução do código para uma plataforma eletrônica (*hardware*), podendo ser implementado nos sistemas operacionais *Linux*, Mac e o mais utilizado, *Windows*.

Figura 11 - Arduino IDE.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

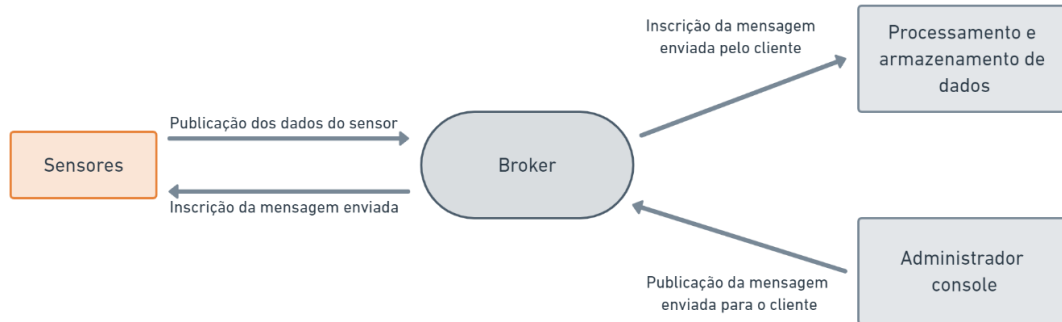
3.1.6. MQTT

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) é um protocolo de comunicação de uma máquina para outra com foco em *Internet of Things (IoT)* e funcionamento com base nos protocolos TCP/IP. Um sistema *MQTT* se baseia na comunicação entre cliente e servidor, em que o primeiro pode realizar tanto “postagens” quanto “captação” de informação e o segundo administra os dados a serem recebidos e enviados. Para isso, é utilizado um paradigma chamado *Publish-Subscribe*, que será mais bem explicado nos próximos tópicos (NERI, *et al.* 2019).

Em modelos de publicações e assinaturas do protocolo *MQTT* para sensores de *Internet das Coisas (IoT)*, o sensor se torna um cliente que interage com o *broker*, que é um servidor que recebe as mensagens dos clientes. Após receber as mensagens roteia as mensagens para os clientes de destino, ou seja, faz a intermediação das mensagens entre os dados medidos pelos sensores e o envio para o processamento e armazenamento de dados. O *broker* também é bidirecional, pois o trânsito das mensagens pode acontecer via cliente/servidor ou servidor/cliente. A

Figura 12 mostra o modelo de publicação e assinatura do *MQTT* para sensores de IoT.

Figura 12 - Modelo de publicações e assinaturas (inscrição) para sensores *IoT*.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

Conforme Yuan (2017) o modelo de trânsitos de mensagens feito através do *broker* segue o seguinte fluxo:

- O cliente se conecta ao *broker*, assinando o tópico destinado as mensagens;
- Ocorre a publicação das mensagens do cliente, enviando tanto a mensagem quanto o tópico;
- É encaminhada a mensagem pelo *broker* para todos os clientes que assinam o tópico cadastrado.

3.1.7. React Native

É um *Framework* desenvolvido pelo *Facebook* que consiste em diversas funções a facilitar o desenvolvimento *mobile* nativo como por exemplo plataformas *iOS* e *Android*, fazendo uso das linguagens de *HTML*, *CSS* e *JS* (ESCUDELARIO, et al. 2020).

3.1.8. Front-end

É a parte visual da aplicação na qual o usuário interage, pode ser conceituado como a camada de apresentação da aplicação. De acordo com Robbins (2012) *front-*

end refere-se a qualquer aspecto do processo de *design* que aparece ou se relaciona diretamente com o navegador, possuindo as seguintes tarefas normalmente utilizadas:

- *Design* gráfico e produção de imagens;
- *Design* de interface;
- *Design* da informação no que se refere à experiência do usuário no *site*;
- Documento *HTML* e desenvolvimento de folha de estilo;
- *JavaScript*.

Para a visualização da aplicação é utilizada uma biblioteca *EXPO* que faz a configuração padrão da aplicação *mobile*, e auxilia no desenvolvimento de aplicações *React Native* (ESCUDELARIO, et al. 2020).

3.1.9. Back-end

O *back-end* é o responsável por organizar os dados necessários, e enviá-los para o *front-end*. O *back-end* refere-se aos programas e *scripts* que funcionam no servidor nos bastidores para tornar as páginas da *web* dinâmicas e interativas. Em geral, o desenvolvimento *back-end* da *web* cai nas mãos de programadores experientes, porém é bom para toda a *web* ter *designers* familiarizados com a funcionalidade de *back-end* (ROBBINS, 2012). As tarefas relacionadas a essa parte têm-se:

- Design de informações no que se refere à forma como as informações são organizadas no servidor;
- Processamento de formulários;
- Programação de banco de dados;
- Sistemas de gerenciamento de conteúdo;

Outros aplicativos da *web* do lado do servidor usando *PHP*, *JSP*, *Ruby*, *ASP.NET*, *Java* e outras linguagens de programação.

3.1.10. Application Programming Interface (API)

Interface de programação de aplicações é a tradução do acrônimo em inglês para *API*, sendo a forma de comunicação entre sistemas. As *API's* são uma maneira de conectar a própria infraestrutura por meio do desenvolvimento de aplicações nativas em nuvem, permitindo a integração entre dois ou mais sistemas e possibilitando o compartilhamento de informação com os usuários (*API*, 2019).

3.2. Microcontrolador ESP-WROOM-32

Os microcontroladores são circuitos integrados que podem executar muitas tarefas dependendo da aplicação, tendo um conjunto de recursos e suporte para vários protocolos de comunicação, como os protocolos UART, I²S e I²C que são alguns dos protocolos utilizados pelo ESP-WROOM-32, também chamado de ESP32. O ESP32 é microcontrolador desenvolvido pela empresa chinesa *Espressif Systems* cujo a sede é em Xangai e dispõe de saídas e entradas elétricas diretas chamadas de *GPIO's* e rede *Wi-Fi* autônoma possibilitando executar aplicativos independentes.

Abaixo é apresentada a Tabela 3, que contém algumas especificações do microcontrolador ESP-WROOM-32.

Tabela 3 - Especificações do ESP-WROOM-32.

<i>Wi-Fi</i>	Alcance de frequência	2.4 GHz ~ 2.5 GHz
<i>Hardware</i>	Tensão operacional	3,0 V ~ 3,6 V
	Corrente operacional	80 mA
	Corrente mínima fornecida por fonte de energia	500 mA
	Faixa de temperatura de operação recomendada	-40 °C ~ +85 °C
	Dimensões do encapsulamento	(18,00±0,10) mm × (25,50±0,10) mm × (3,10±0,10) mm

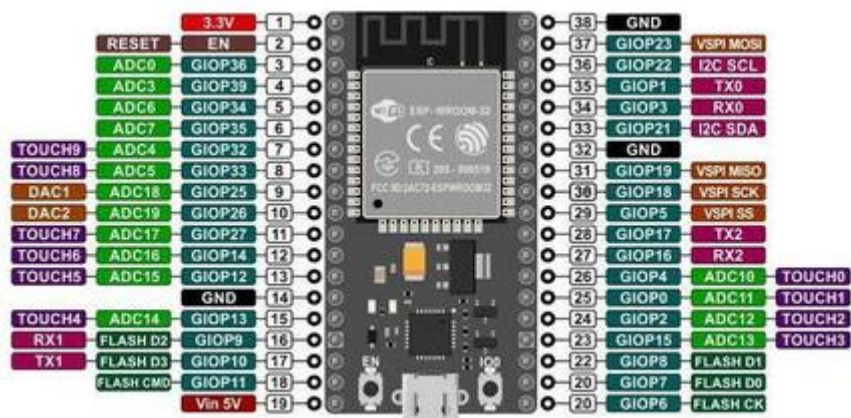
Fonte: Adaptado da tabela 1 do *datasheet* do ESP-WROOM-32 v3.1.

Segundo o *datasheet* do fabricante, o ESP-WROOM-32 possui o *freeRTOS* como sistema operacional, que é um sistema cujo a posse pertence a *Amazon*, e pode ser aplicado sem custos de licença, sendo capaz de executar várias tarefas ao mesmo tempo. O ESP32 também possui dois núcleos da CPU que podem ser controlados individualmente, conseguindo ajustar a frequência de *clock* de 80 MHz a 240 MHz. Como algumas aplicações não requerem muito poder de computação, o *chip* utiliza um coprocessador de baixo consumo no lugar da CPU e com isso economiza se energia.

O módulo *Wi-Fi* do ESP-WROOM-32 permite um amplo alcance físico, pois suporta uma taxa de dados de até 150 Mbps e 0,1 W de potência de saída. Além de conectar na rede *Wi-Fi*, esse microcontrolador também é capaz de criar a própria rede, ou seja, permite que outros dispositivos possam ser ligados diretamente nessa rede criada.

Como mostrado na Figura 13 o ESP-WROOM-32 possui trinta e oito pinos, sendo um deles responsável pela faixa de tensão operacional que atinge de 3,0V a 3,6V, porém a placa tem um regulador linear de tensão (LDO) para manter a tensão constante no nível de 3,3V. A saída do regulador é denotada em um lado da placa como o pino 3V3, assim fornecendo energia para componentes externos. Outro pino para saída de tensão é o V5, que fornece tensão de 5V para alimentação de componentes externos.

Figura 13 - Pinagem do ESP-WROOM-32.



Fonte: Extraído de BINKER *et al.* (2020).

Desses trinta e oito pinos, três são do tipo terra (*Ground* - GND), dois de tensões e um pino chamado *Enable* (EN) que é responsável pelo sinal de ativação do regulador linear de tensão 3,3V, interligando-o ao GND. Os trinta e dois pinos restantes são do tipo GPIO (*General Purpose Input/Output*), ou seja, pinos responsáveis pela entrada/saída de sinais digitais, tendo a capacidade de conduzir o ESP32 quando controlado por software a um nível de sinal que pode variar do sinal digital 1 para 0 ou vice-versa.

O microcontrolador ESP-WROOM-32 possui dois conversores analógico-digital de 12 *bits*, o ADC1 e o ADC2, totalizando 18 canais, que podem obter leituras analógicas que variam na faixa de 0 a 4095 *bits*, o que corresponde de 0 a 3,3V. Alguns pinos GPIO possuem limitações, como é o caso dos pinos GPIO0, GPIO2, GPIO4, GPIO12 - GPIO15, GPIO25 - GPIO27, pois utilizam o mesmo drive que o módulo *Wi-Fi*. Dessa forma não é recomendado uso de canais ADC2 quando o ESP32 estiver conectado a alguma rede *Wi-Fi*, pois tal uso compartilhado do ADC2 e do *Wi-Fi* apresentará ruídos, e assim provocando erros indesejáveis nas medições.

Os pinos CLK, SDO, SDI, SD2, SD3 e CMD, ou seja, GPIO6 a GPIO11 estão conectados para o flash SPI integrado no módulo e não são recomendados para outros usos, assim como os pinos classificados como *strapping pins* (pinos de amarração) que são: G2/P2, GPIO0, GPIO2, G0/P0 e GPIO5. Sendo responsáveis por algumas configurações do microcontrolador, sendo lido o estado lógico (0 ou 1) na entrada de cada pino de amarração e registrados em um registrador interno (GPIO_*STRAPPING*) no momento da inicialização, configurando assim as funções iniciais do ESP32.

O ESP32 é sensível a ruídos, ocasionando discrepâncias nas leituras do ADC. De acordo com a *Espressif*, o ESP32 chega a apresentar até 6% de diferença em resultados medidos. Pode-se utilizar a própria função do fabricante para corrigir as diferenças de tensões medidas. É possível corrigir a leitura do ADC do ESP32 por meio de uma linha de tendência polinomial calculada e equacionada de forma a aproximar o valor medido com o valor do ADC.

3.3. Transformador de corrente: sensor de corrente não invasivo SCT-013-000

Os transformadores de corrente são denominados transformadores de instrumentação, cuja a função é reduzir a corrente do sistema levando em consideração a relação de transformação, isso significa que os valores da corrente de entrada e saída são diretamente proporcionais, assim de acordo com Chapman (2013, p. 141):

Um transformador de corrente toma uma amostra da corrente que flui em uma linha e a reduz a um nível seguro e mensurável [...]. O transformador de corrente consiste em um enrolamento secundário enrolado em torno de um anel ferromagnético, com o primário constituído simplesmente pela linha que passa através do centro do anel. O anel ferromagnético retém e concentra uma pequena amostra do fluxo oriundo da linha do primário. A seguir, esse fluxo induz uma tensão e uma corrente no enrolamento secundário.

Dessa forma, a corrente alternada que flui no primário produzindo um campo magnético e induzindo uma corrente no enrolamento secundário levando em consideração a relação de transformação entre as correntes do primário e do secundário. Segundo Chapman (2013), “a corrente no secundário de um transformador de corrente é diretamente proporcional à corrente muito maior do primário e, desse modo, o dispositivo poderá fornecer uma amostra exata da corrente de linha para propósitos de mensuração”.

A Figura 14 apresenta o sensor SCT 013 000 que é um transformador de corrente (TC) de núcleo dividido do tipo janela que possui enrolamentos primários, secundários e um núcleo, produzido pela empresa chinesa *YHDC (Beijing Yaohuadechang Electronic Co., Ltd.)*. O TC tipo janela não possui um enrolamento primário fixo, sendo constituído de enrolamento secundário e uma abertura no núcleo, onde o condutor passará, formando o circuito primário do transformador.

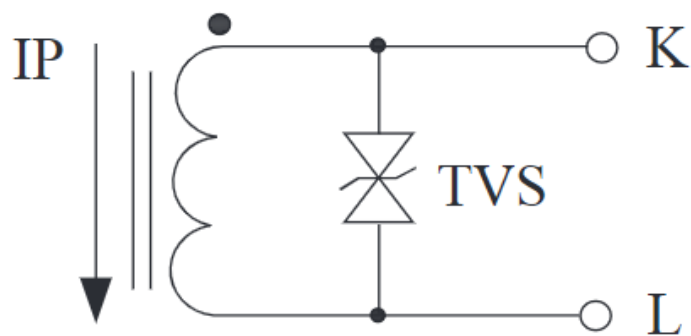
Figura 14 - Sensor SCT-013-000.



Fonte: YHDC (2021).

Com capacidade máxima de medição de 100A, o sensor SCT-013-000 deve ser usado junto a um circuito auxiliar com um resistor de carga, isso ocorre porque o sensor não possui resistor de carga interno, porém possui diodos zener ligados em paralelo entre os terminais do secundário do TC, como mostrado na Figura 15, que limitam a tensão de saída caso ocorra a desconexão da carga.

Figura 15 - Esquemático do sensor SCT-013-000.

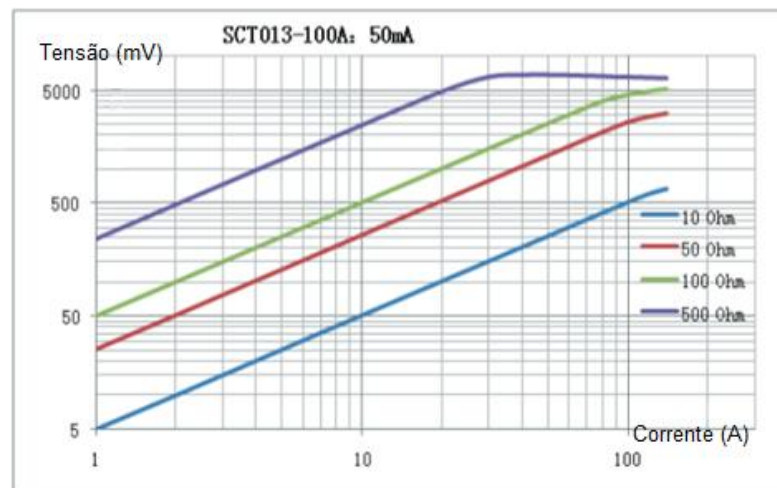


Fonte: YHDC (2021).

A resistência de carga é determinada por um cálculo, ao qual deve ser considerado o nível de corrente que será mensurada, pois diferentes resistências definirão o valor máximo para a medição de corrente pelo sensor. A corrente do secundário do SCT-013-000 irá circular pelo resistor de carga e com isso surgirá uma tensão na faixa de 10-3 ampères. É mostrado na Figura 16 a curva característica

extraída do *datasheet* do fabricante em diferentes valores para o resistor de carga, quanto maior o valor da resistência de carga, menor será o fundo de escala da medição de corrente elétrica.

Figura 16 - Curva característica com diferentes valores de resistência.

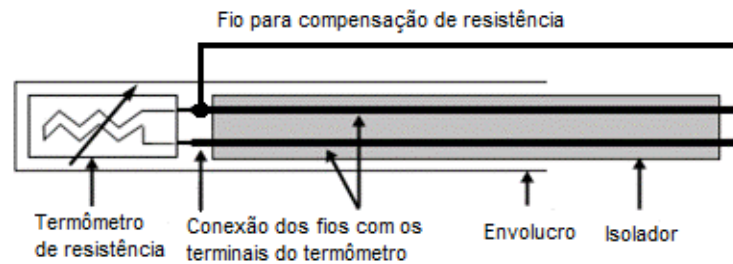


Fonte: Adaptado YHDC (2021).

3.4. Sensor de temperatura RTD PT100

O PT100 é um sensor de temperatura cujo funcionamento consiste na variação da resistência elétrica linear conforme a temperatura varia. Essa resistência cujo material é a platina possibilita o monitoramento contínuo do processo de aquecimento do motor. Embora virtualmente todos os metais possam ser empregados para detecção, a platina é usada quase exclusivamente por causa de sua resposta previsível, estabilidade de longo prazo e durabilidade (FRADEN, 2004). Na Figura 17 é mostrada a arquitetura física de um sensor RTD.

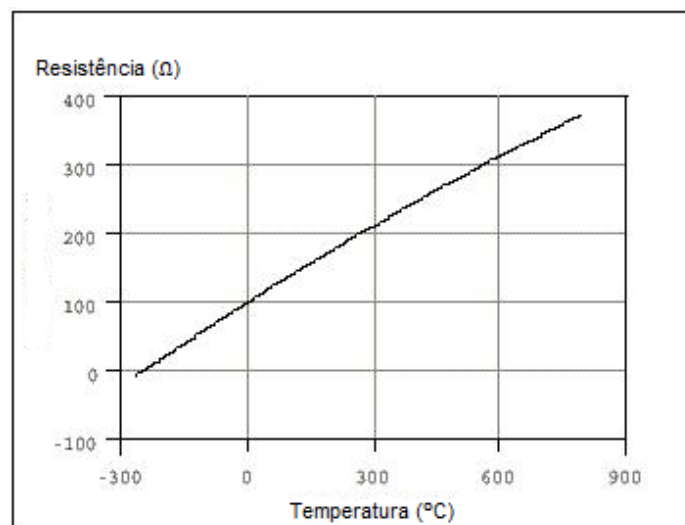
Figura 17 - Arquitetura física de um RTD.



Fonte: Adaptado *National Instruments* (2021).

O comportamento linear entre a resistência e a temperatura atendem altos requisitos de precisão pois é um sensor RTD (*Resistance Temperature Detectors*), que é um detector resistivo de temperatura e um coeficiente positivo de resistividade. Os RTD's de platina são chamados de PT100 e tem resistência de 100Ω à 0°C , a Figura 18 mostra a curva característica R x T de um RTD PT100.

Figura 18 - Curva característica R x T de um RTD PT100.



Fonte: Adaptado *National Instruments* (2021).

Para haver um monitoramento, deve-se haver um circuito de controle para obtenção das informações mensuradas pelo sensor, e por possuírem uma resistência calibrada que varia linearmente com a temperatura, o PT100 tem a desvantagem de que os circuitos de controle possuem altos custos.

Outro fator importante é a quantidade de fios que o sensor dispõe, pois, a configuração de dois fios, que normalmente é a mais barata, é satisfatória até certo ponto, pois por ser de dois fios as resistências dos cabos podem interferir na medição.

Já na configuração de três fios, no PT100 há a compensação da resistência por esse fio extra. No de quatro fios a compensação é feita de forma mais completa, por ser o mais caro das três configurações, esse modelo é geralmente utilizado onde necessita-se de grande precisão na medição. A Figura 19 apresenta o sensor de temperatura RTD PT100 que será utilizado no projeto sendo composto por três fios.

Figura 19 - Sensor de temperatura RTD PT100.

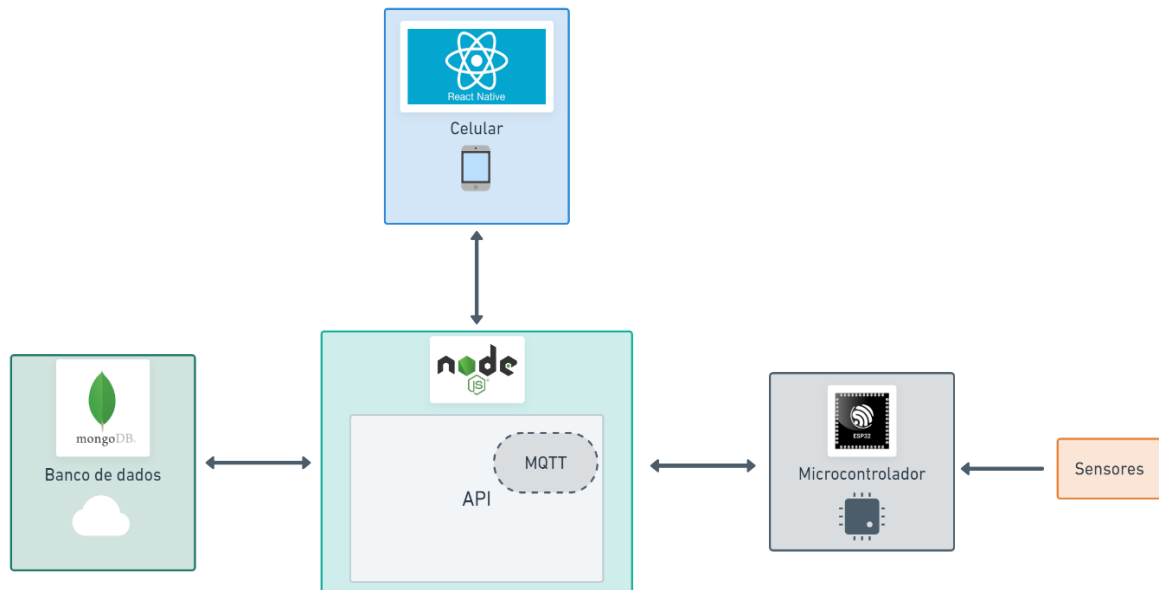


Fonte: Acervo dos autores (2021).

3.5. O sistema proposto

O sistema de medição consiste no entrelaçamento de várias plataformas e linguagens de programação. Uma *API* será o centro do recebimento e distribuição dos dados, ou seja, o ESP-WROOM-32 se conectará com a rede *Wi-Fi* disponível e também com o *broker*, sendo o protocolo *MQTT* utilizado para essa comunicação. O banco de dados *MongoDB* também fará parte desse sistema, sendo o local onde receberá as informações pertinentes às medições feitas através dos sensores. A Figura 20 apresenta o diagrama do projeto.

Figura 20 - Diagrama do sistema implementado.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

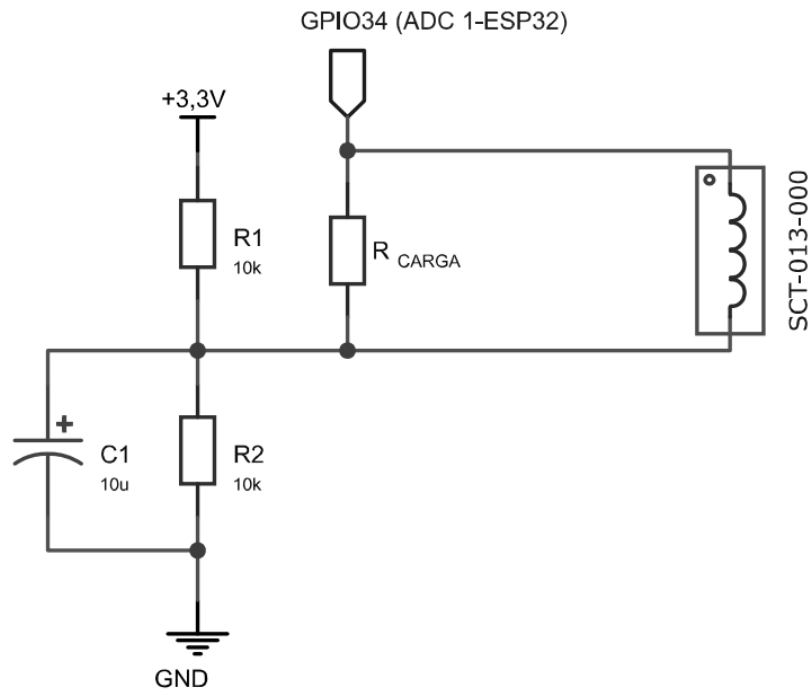
3.5.1. Circuito auxiliar do SCT-013-000

O sensor SCT-013-000 necessita de um circuito auxiliar para que seja possível a leitura da corrente pelo microcontrolador, porém o ESP32 e muitos outros microcontroladores são capazes de lerem apenas tensão em seus pinos. Assim, o circuito auxiliar permite que a corrente que circula no enrolamento do secundário do sensor também circule por um resistor de carga, ao qual será feita a relação entre corrente e resistência pela lei de Ohm (1).

$$V = R \times I \quad (1)$$

Há vários tipos de configurações de circuitos, um deles é um divisor tensão, ilustrado na Figura 21, que fará um *offset*, ou seja, um deslocamento na forma de onda da tensão adquirida pelo sensor, possibilitando a leitura do microcontrolador, que por sua vez é capaz de ler apenas tensões no semiciclo positivo.

Figura 21 - Circuito auxiliar para realização do deslocamento da forma de onda da tensão sobre o resistor de carga.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

O ponto de partida para determinar a resistência de carga para o sensor de corrente é calcular o valor da corrente máxima suportada pelo sensor. A corrente eficaz, expressa em (2), é o valor equivalente DC de uma tensão ou corrente senoidal que vale $\frac{1}{\sqrt{2}}$ do valor máximo da corrente (BOYLESTAD, 2012). Assim a corrente máxima do sensor SCT-013-000 pode ser determinada:

$$I_{ef} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \therefore I_{m\acute{a}x} = I_{ef} \times \sqrt{2} \quad (2)$$

Como o sensor de corrente suporta níveis de corrente até 100A de corrente eficaz, é necessário multiplicar esse valor por $\sqrt{2}$ para a obtenção da corrente máxima que o sensor pode suportar, como demonstrado em (3) o valor da corrente máxima ($I_{m\acute{a}x}$) é:

$$I_{m\acute{a}x} = 100 \times \sqrt{2} \therefore I_{m\acute{a}x} \cong 141,4A \quad (3)$$

Após concluir o cálculo da corrente máxima, o próximo passo é o cálculo da corrente no secundário (I_2) do transformador de corrente presente no sensor. Em (4)

é mostrado que em um transformador as correntes possuem a razão inversa das espiras dos próprios enrolamentos (UMANS, 2014).

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (4)$$

Portanto, o valor da corrente no secundário (I_2) do sensor de corrente SCT 013 é demonstrado em (5).

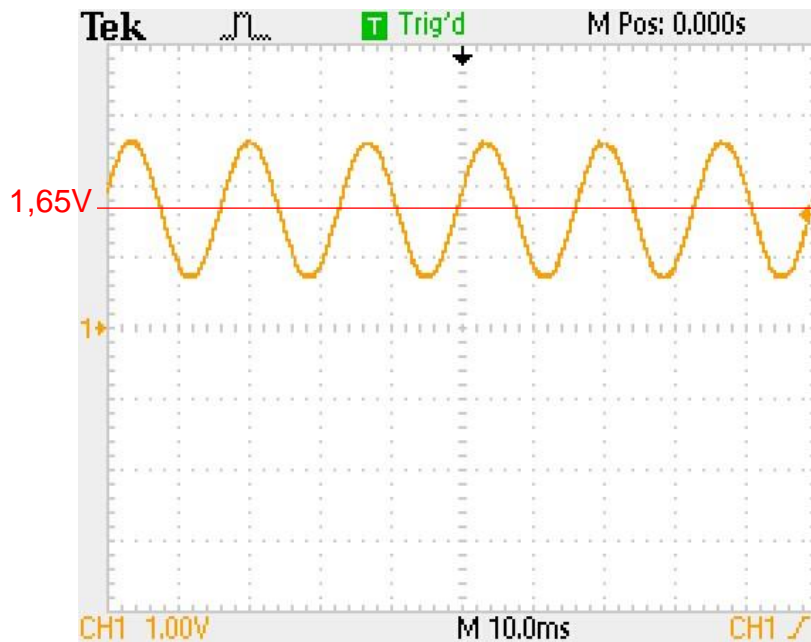
$$\frac{1}{2000} = \frac{I_2}{141,4} \therefore I_2 = 0,0707A \quad (5)$$

Com o valor de I_2 encontrado, será adotado a tensão de pico suportada pelo microcontrolador, cuja amplitude é 3,3V, porém a leitura do sensor é alternada, logo é necessário dividir a tensão de pico por dois. O valor obtido pelo cálculo em (6), mostra que será necessário utilizar um resistor de aproximadamente 23,34Ω.

$$R_{CARGA} = \frac{V_{PICO}/2}{I_2} = \frac{1,65}{0,0707} \cong 23,34\Omega \quad (6)$$

Com a determinação do fundo de escala através do dimensionamento do resistor de carga, o dispositivo será capaz de trabalhar com valores referentes a relação entre a corrente medida e a resistência, ou seja, através da lei de Ohm (1) é calculada o valor da tensão sobre o resistor. Como a faixa de medição do ESP32 é de 0V a 3,3V, o valor máximo de corrente medida estará relacionado ao valor máximo de tensão suportado pelo microcontrolador. A Figura 22 apresenta a forma de onda deslocada da tensão medida sobre o resistor de carga,

Figura 22 - Forma de onda de tensão no resistor de carga com deslocamento no eixo da tensão.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

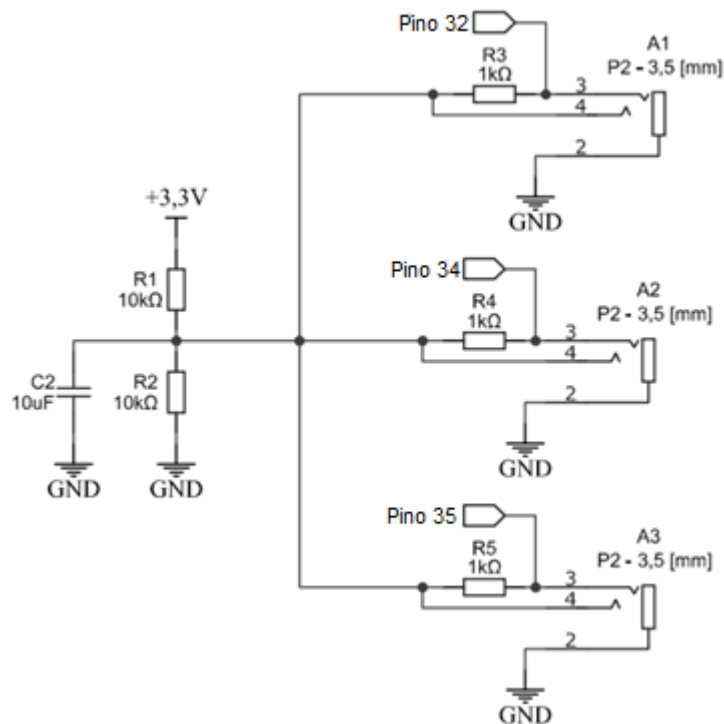
É possível observar que quando a tensão ultrapassar o nível de tensão de 3,3V a forma de onda será modificada, pois haverá a presença de partes negativas na onda. Para evitar que não haja danos ao microcontrolador, deve-se respeitar os limites de tensões sobre o resistor de carga, que está diretamente ligado a corrente primária medida.

Como a tensão é inversamente proporcional a corrente, para valores baixos de corrente, o sensor apresentará uma variação considerável em suas medidas, ocasionando um grau de imprecisão. Para que o sensor faça uma medição plausível e que apresente resultados satisfatórios ao operador, pode-se utilizar diferentes valores de resistência de carga, interferindo assim no nível de corrente máxima que poderá ser medida. Como o motor de indução trifásico utilizado no projeto suporta uma corrente nominal de 2,56A na configuração estrela, como exibida nos dados de placa da Figura 6, o resistor escolhido foi o de 1000Ω. Em (7) é demonstrado o cálculo da corrente máxima que poderá ser medida pelo protótipo.

$$I_1 = \frac{V_{PICO}/2}{R_{CARGA}} \times 2000 = \frac{1,65}{1000} \times 2000 = 3,3A \quad (7)$$

Desta forma o valor máximo de corrente que o sensor poderá medir é de 3,3A, como a medição será de correntes trifásicas, o circuito para a aquisição das correntes terá três resistores de carga, um para cada sensor de corrente. A Figura 23 apresenta o circuito para aquisição de correntes trifásicas esquematizado pelo *site EasyEDA*.

Figura 23 - Circuito para a aquisição das correntes trifásicas.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

3.5.2. Módulo sensor MAX31865

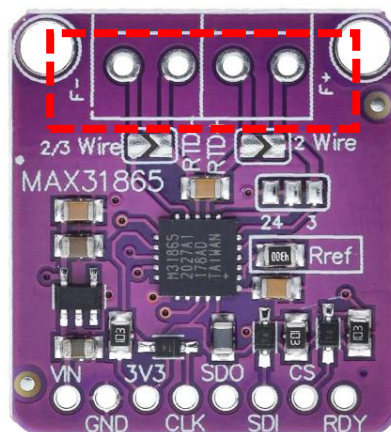
O módulo sensor MAX31865 é um amplificador que suporta uma faixa de 3V - 5V, sendo encarregado de realizar a leitura e conversão analógico/digital da resistência do sensor PT100 e também lidando com a compensação de resistência de RTD's de três ou quatro fios, possibilitando uma maior precisão nas medições. É montado em uma placa de circuito impresso que possui pinos de energia e pinos lógicos, sendo eles:

- Vin: pino de alimentação da placa com regulador de tensão de 3V a 5V;
- 3V3: saída do regulador de tensão com 3,3V e corrente de até 100mA;
- GND: terra;

- SDK: pino de entrada para o chip, *SPI Clock*;
- SDO: envio de dados do processador para o MAX31865, *Serial DATA Out / Microcontroller In Sensor Out pin*;
- SDI: envio de dados do MAX31865 para o processador, *Serial Data In / Microcontroller Out Sensor In pin*
- CS: pino de entrada, permite a comunicação SPI, possibilitando a conexão e utilização de vários outros módulos MAX31865 em um único microcontrolador.
- RDY: pino que indica os dados apresentados, pode ser utilizado para a aceleração das leituras no driver do microcontrolador.

Para utilização do sensor de temperatura RTD PT100, o módulo deve ser configurado conforme a quantidade de fios que o sensor tem. O módulo MAX31865 suporta sensores de até quatro fios, sendo necessário soldar pastilhas para conexão dos fios do RTD PT100. A Figura 24 destaca os terminais onde deve-se soldar as pastilhas de conexão.

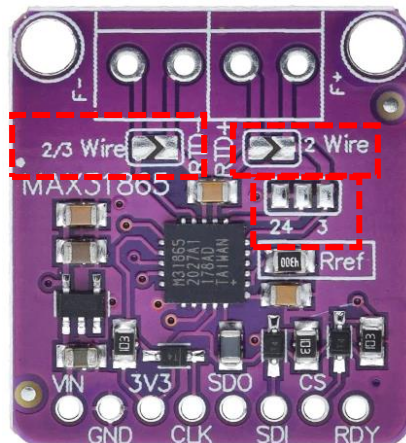
Figura 24 - Módulo sensor MAX31865.



Fonte: Adaptado Zoodmall (2021).

A Figura 25 evidencia os locais onde devem-se fazer a configuração referentes a quantidade de fios do RTD PT100 que serão conectadas ao módulo. Para dois fios deve-se curto-circuitar com solda os *jumpers* rotulados *2/3 Wire* e *2 Wire*. Para três fios o módulo deve ser configurado curto-circuitando o *jumper 2/3 Wire* e a trilha 4 com a 3, sendo interrompida a trilha 2 e 4. Para quatro fios, não é preciso alterar nada no módulo.

Figura 25 - Módulo sensor MAX31865, *jumpers* para configuração.

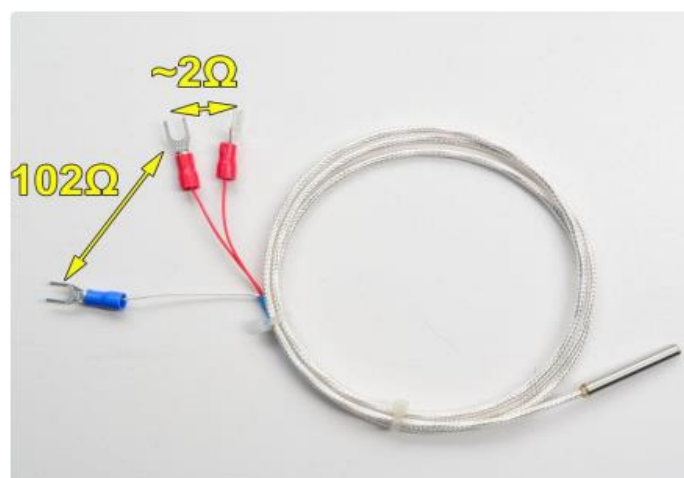


Fonte: Adaptado Zoodmall (2021).

Para RTD's com fios de um metro de comprimento, têm uma resistência extra de 2Ω entre os fios vermelho (RTD+) e branco (RTD-) do sensor totalizando uma resistência de 102Ω , como apresentado na Figura 26. Para que não ocorra a soma de valores a temperatura medida, é necessário incluir na construção do RTD um fio vermelho (F+) com uma resistência de 2Ω .

Para um RTD PT100 contendo três fios, o amplificador MAX31865 realiza o condicionamento dos sinais medidos pelo sensor, sendo feitas entre os conjuntos dos fios RTD+ e F+ com o fio RTD-, dessa forma subtraindo apenas a resistência do fio F+ é realizada a compensação da resistência extra indesejada.

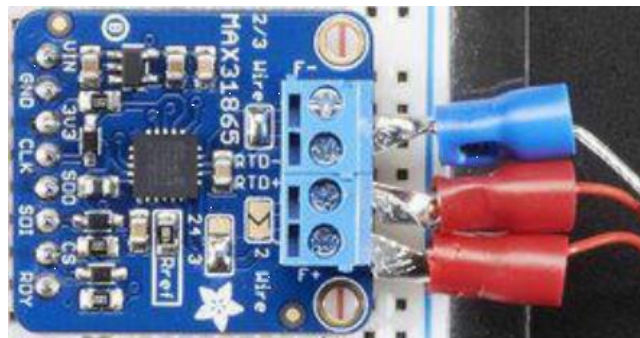
Figura 26 - RTD PT100 de bulbo metálico na configuração de três fios.



Fonte: Adafruit (2021).

As conexões do sensor RTD no MAX31865 é feita conectando os fios de mesma cor nos blocos indicados com F+ e RTD+, não importando o fio que vai em cada um, porém devem ter a resistência de 2Ω entre eles. O terceiro fio pode ser conectado tanto no bloco indicado com F-, quanto em RTD-. A Figura 27 apresenta o módulo sensor MAX31865 fabricado pela *Adafruit*.

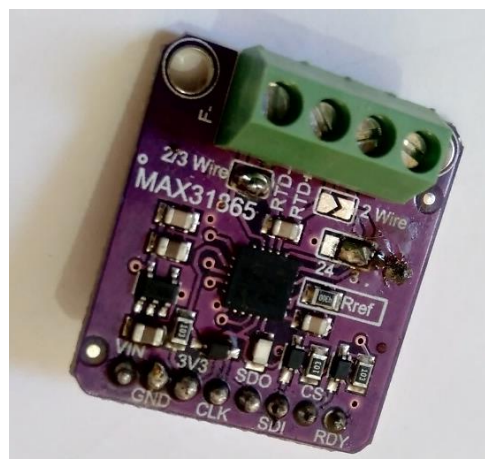
Figura 27 - Conexões dos fios do RTD na configuração de três fios.



Fonte: *Adafruit* (2021).

O código utilizado no ESP32 para executar a medição, é disponibilizado pela fabricante do módulo, que é a *Adafruit*. O módulo amplificador utilizado no projeto, exibido na Figura 28 é comercializado por empresas brasileiras, sendo construído em território chinês. O código exemplo está disponível no seguinte repositório online: https://github.com/adafruit/Adafruit_MAX31865/blob/master/examples/max31865/max31865.ino.

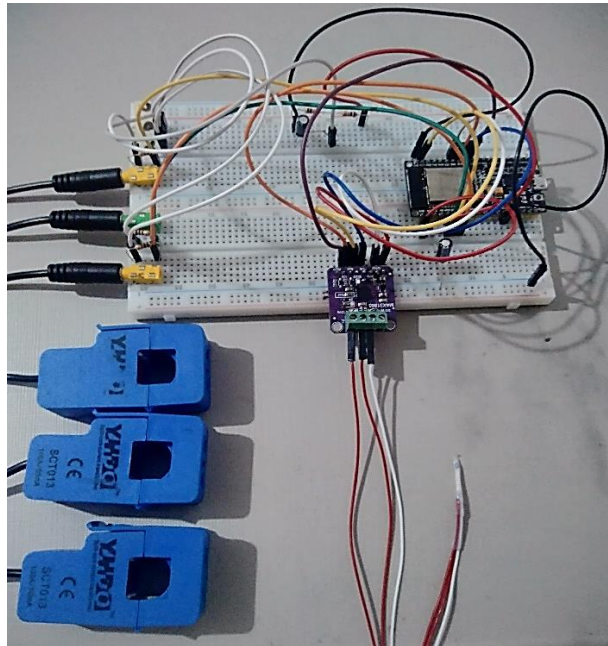
Figura 28 - Módulo sensor MAX31865 configurado para receber o sensor de temperatura RTD PT100.



Fonte: Acervo dos autores (2021)

Na Figura 29 é exibido o protótipo do circuito desenvolvido, no **APÊNDICE B** é apresentado o esquemático do projeto de *hardware* do protótipo.

Figura 29 - Protótipo do circuito desenvolvido.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

3.5.3. Implementação do código na plataforma Arduino

O código implementado na Arduino *IDE* pode ser entendido se dividido em quatro partes:

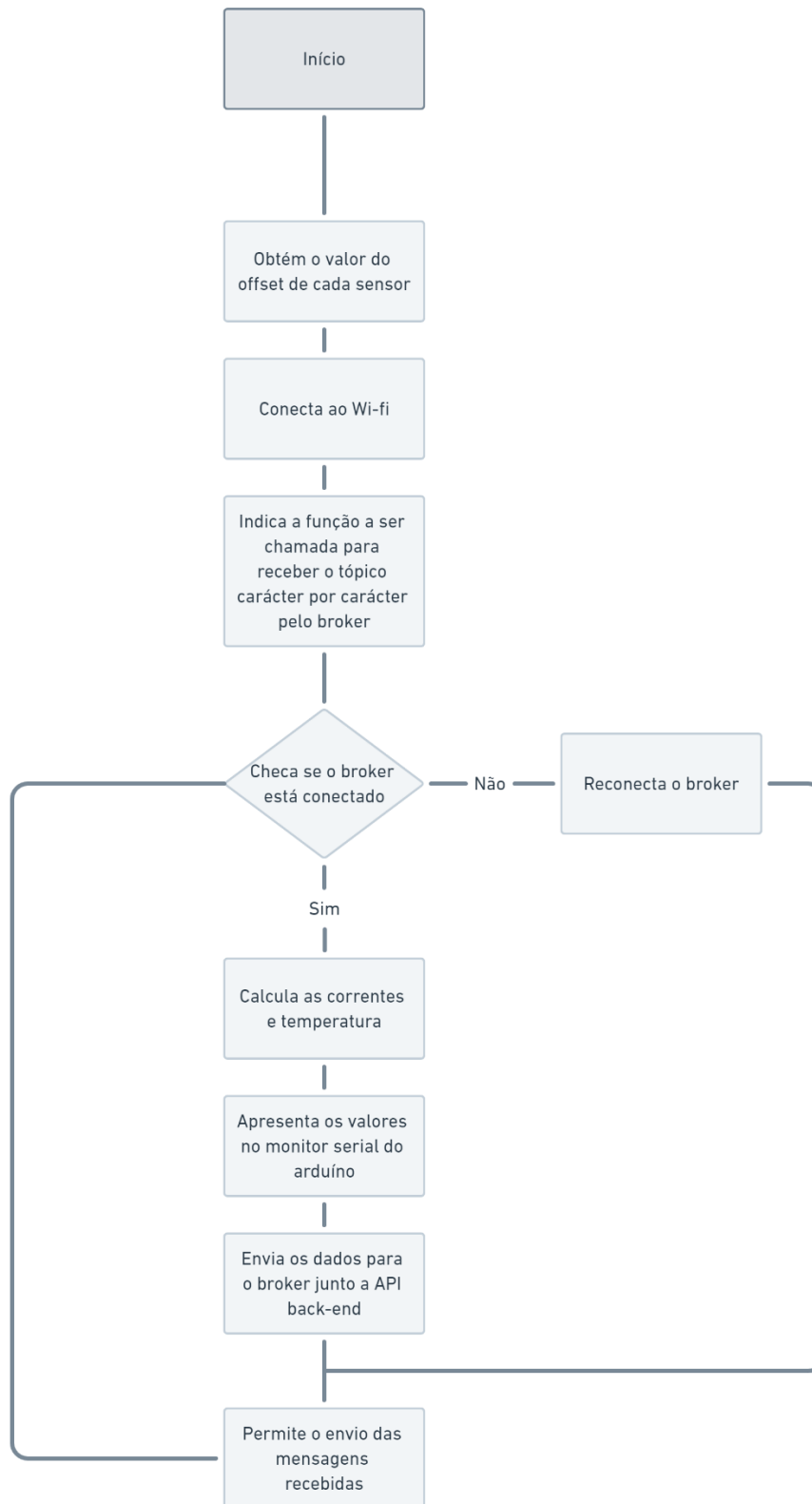
1. A inclusão das bibliotecas necessárias: *Arduino.h*, *analogWrite.h*, *WiFi.h*, *PubSubClient.h*, *Adafruit_MAX31865.h*. Em seguida as definições de variáveis e objetos, que foram divididas e comentadas no código como: relacionadas a configuração do ESP32, relacionadas a configuração do sensor de temperatura, informações da rede e *broker* a se conectar, para o envio de dados dos sensores, dos sensores de corrente e temperatura e os objetos para conexão *Wi-Fi*.
2. Há a configuração inicial para a execução do programa com o comando que configura a taxa de transferência para o monitor serial do Arduino, depois a

inicialização do *offset* (deslocamento) sendo feito uma leitura individual para cada sensor de corrente, em seguida um comando que indica a configuração utilizada no módulo do sensor de temperatura, a inicialização da conexão *Wi-Fi* e por último a configuração do envio recebido da resposta enviada pelo *MQTT* como resposta pelo *broker*.

3. É possível visualizar o fluxo de execução do programa, começando por uma verificação se o cliente está conectado ao *broker* local caso não esteja é feita a reconexão, caso esteja conectado é calculado o valor das correntes e a temperatura, em seguida é apresentado os valores no monitor serial do Arduino e enviado para o *broker*, para finalizar é chamada uma função que permite o envio das mensagens publicadas como resposta para o microcontrolador.
4. O final do código foi destinado a todas as funções que se fizeram necessárias para o programa realizar as medições sendo elas: *CalcularTeCo()*, *mapf()*, *MostrarValores()*, *Ler()*, *Media_Quadratica()*, *Eq_Fator4()*, *ReconnectarBroker()*, *ConfigurarWifi()*, *EnviarParaBroker()*, *RespostaBroker()*.

É apresentado na Figura 30 o fluxograma do código desenvolvido utilizando o *site Whimsical*.

Figura 30 - Fluxograma do código implementado na Arduino IDE.



Fonte: Acervo dos autores (2021)

3.5.4. Cálculo para aquisição dos valores das medições dos sensores de corrente

Existe uma biblioteca Arduino responsável pelo tratamento e cálculo dos valores medidos, sendo *open source* a *Emonlib* é um algoritmo que permite a identificação de grandezas elétricas por meio de dispositivos medidores. Porém, durante as medições realizadas com a utilização da *Emolib*, constatou-se que o fator de calibração disponibilizado não atendia o objetivo de medição do intervalo de correntes proposto. Dessa maneira, para a realização da leitura da corrente pelos sensores, foi desenvolvido uma função chamada de *Media_Quadratica()*, responsável pelo tratamento dos sinais captados pelos sensores de corrente elétrica alternada medida pelo sensor SCT-013-000. A função calcula o valor *RMS* (*Root Mean Square*), como apresentada em (8) da corrente possuindo seis mil amostras fixadas no código.

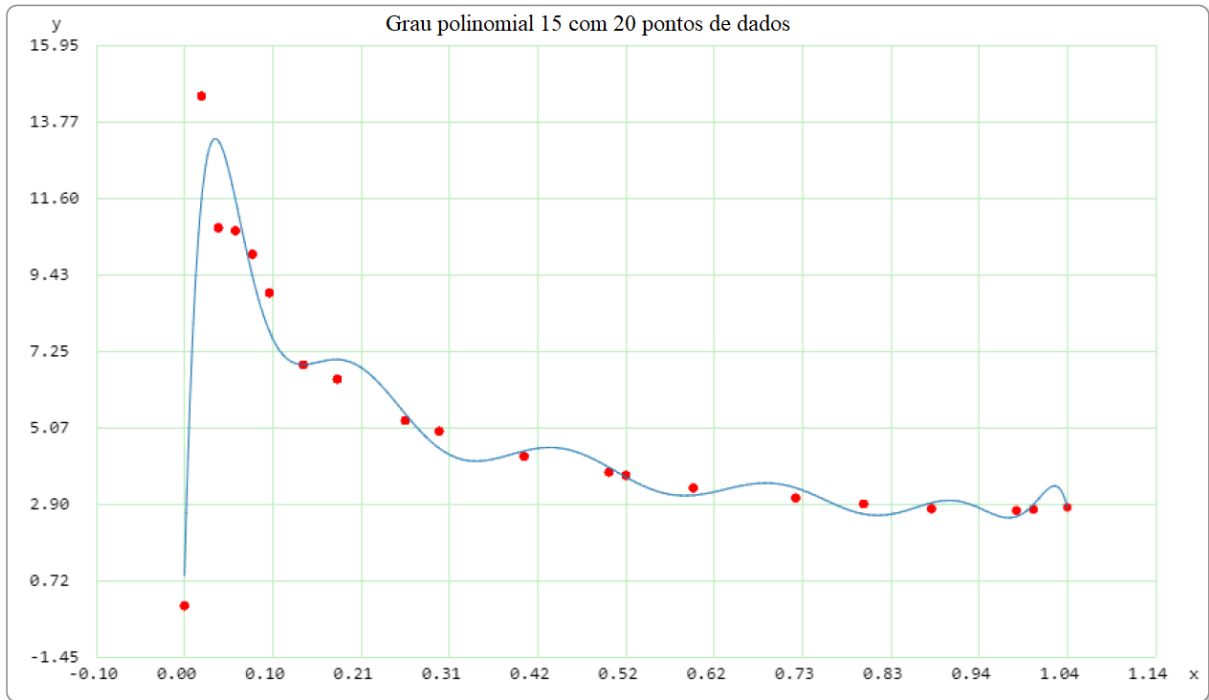
$$x_{rms} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad (8)$$

3.5.5. Calibração do sensor SCT-013-000

Os sensores de corrente utilizados precisam de uma correção para o seu valor mensurado, a corrente alternada gerada no circuito indutivo formado de acordo com o esquemático da Figura 15 é reproduzida nos resistores de carga, para tanto cada medição apresenta um fator diferente que representa a medição real. Para se obter uma medição mais precisa e coerente, foi medido na prática utilizando o alicate amperímetro e considerando este como medição parâmetro.

Como a cada medição o fator se altera, os valores obtidos na medição por meio dos sensores foram dispostos em um gráfico como pode ser observado na Figura 31, e é feito a regressão polinomial de grau quinze dispondo dos vinte pontos da Tabela 4. A equação obtida foi implementada como função no código Arduino, vide **APÊNDICE A**, com o nome de *Eq_Fator4(x)* e necessita de um parâmetro sendo este obtido da leitura realizada nos pinos do microcontrolador conectados aos sensores de corrente.

Figura 31 - Gráfico de corrente medida versus fator de calibração.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

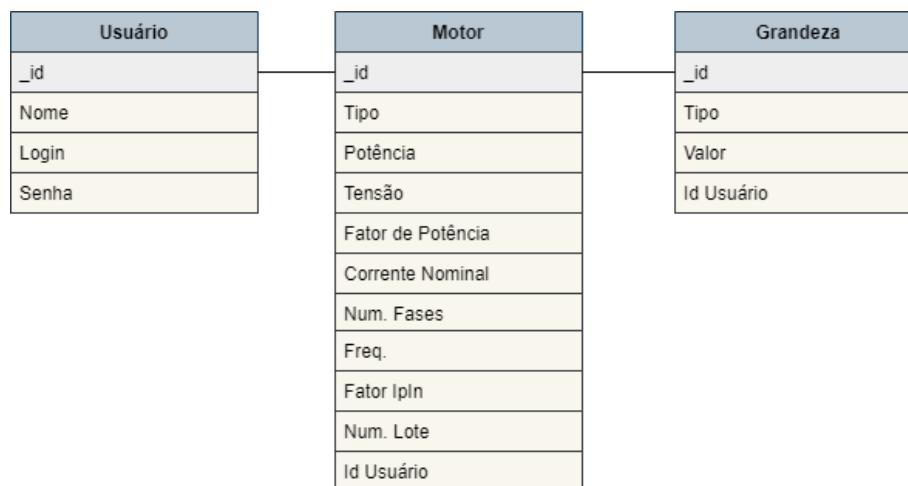
Tanto para a plotagem do gráfico da Figura 30 quando para o equacionamento foi utilizado o *site Polynomial Regression Data Fit* (ajuste de data de regressão polinomial) disponível no link: <https://arachnoid.com/polysolve/>. Dessa forma foi obtida a equação de calibração de corrente para o sensor SCT-013-000, apresentada em (9).

$$\begin{aligned}
 y = f(x) = & 8,5908870100946932 \times 10^{-1} \cdot x^0 + 9,0308860093248802 \times 10^2 \cdot x^1 \\
 & - 2,3099499706977214 \times 10^4 \cdot x^2 + 2,6311474504895235 \times 10^5 \cdot x^3 \\
 & - 1,6410616946542610 \times 10^6 \cdot x^4 + 6,0092800371787483 \times 10^6 \cdot x^5 \\
 & - 1,2780081196424439 \times 10^7 \cdot x^6 + 1,3080185715033673 \times 10^7 \cdot x^7 \\
 & + 2,9419370271813795 \times 10^6 \cdot x^8 - 2,3127052436965302 \times 10^7 \cdot x^9 \\
 & + 1,8417478062034659 \times 10^7 \cdot x^{10} + 1,1394759197600083 \times 10^7 \cdot x^{11} \\
 & - 3,1077389318096351 \times 10^7 \cdot x^{12} + 2,3846603688130863 \times 10^7 \cdot x^{13} \\
 & - 8,4903094154411178 \times 10^6 \cdot x^{14} + 1,1847341234438897 \times 10^6 \cdot x^{15}
 \end{aligned} \quad (9)$$

3.5.6. Desenvolvimento do *front-end* e *back-end*

A primeira aplicação desenvolvida foi o *back-end* para permitir o armazenamento dos dados e a verificação por meio de testes. A *API back-end* foi desenvolvida utilizando o ambiente de execução *Node.js* com a linguagem *JavaScript*. Inicialmente foi feito a modelagem do banco de dados, na Figura 32 é demonstrado como foi estruturado em três coleções, que podem ser entendidas como tabelas, sendo a coleção “Usuário” a principal e que contém os documentos de todos os usuários cadastrados e os dados armazenados, a segunda coleção é chamada de “Motor” e possui as informações pertinentes ao motor analisado e por último a coleção “Grandeza” que contém os dados das grandezas medidas.

Figura 32 - Modelagem do banco de dados.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

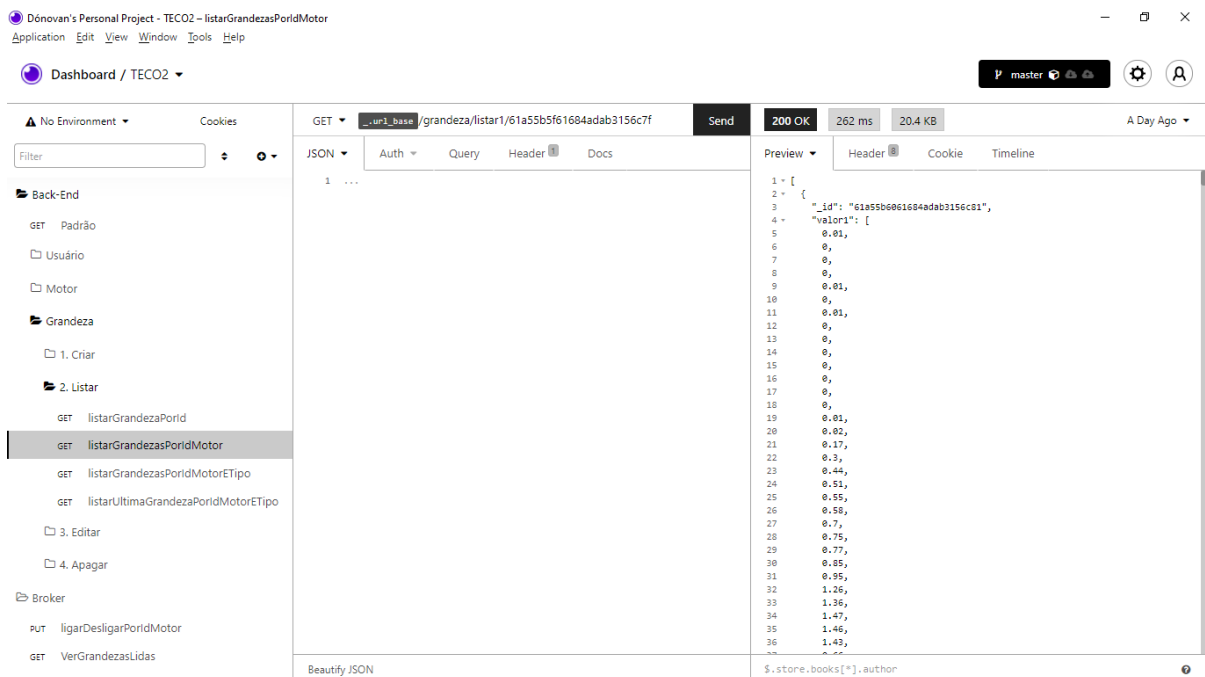
O código escrito, utilizando o editor *Visual Studio Code*, pode ser compreendido em uma grande função que executa demais funções menores, dividido em duas aplicações tendo como ponto inicial um arquivo chamado de *servidor.js* que contém a inclusão de bibliotecas e chamadas de funções necessárias da própria aplicação, chamada de *back-end*, e a execução de um servidor local denominado *broker*.

A aplicação pode ser facilmente entendida em rotas, que são endereços ou caminhos que executam funções criadas para responder a requisições feitas via *URL*. Para testes e a realização da medição real foi utilizado o programa *Imsomnia* que é

capaz de simular as requisições feitas via *HTTP*, tais como operações básicas do banco de dados conhecidas como *CRUD*, acrônimo para *Create, Read, Update, Delete* respectivamente Criar, Ler, Atualizar e Deletar.

Na Figura 33 é mostrada o programa com o projeto intitulado de “TECO2”, o qual é possível identificar como foi organizado o projeto. A aplicação desenvolvida é dividida em duas pastas chamadas de “*Back-End*” e “*Broker*”. Na pasta intitulada “*Back-End*” é subdividida em três subpastas, “*Usuário*”, “*Motor*” e “*Grandeza*”, concernentes ao modelo criado, e dentro das subpastas as funções que realizam as requisições e o aguardo das respostas. Na subpasta “2. Listar” é apresentado uma função do tipo *GET*, nomeada de “*listarGrandezasPorIdMotor*” e que faz uma busca no banco de dados por todas as grandezas cadastradas com o *id* do motor fornecido na *URL*.

Figura 33 - Interface do programa de simulação de requisições.

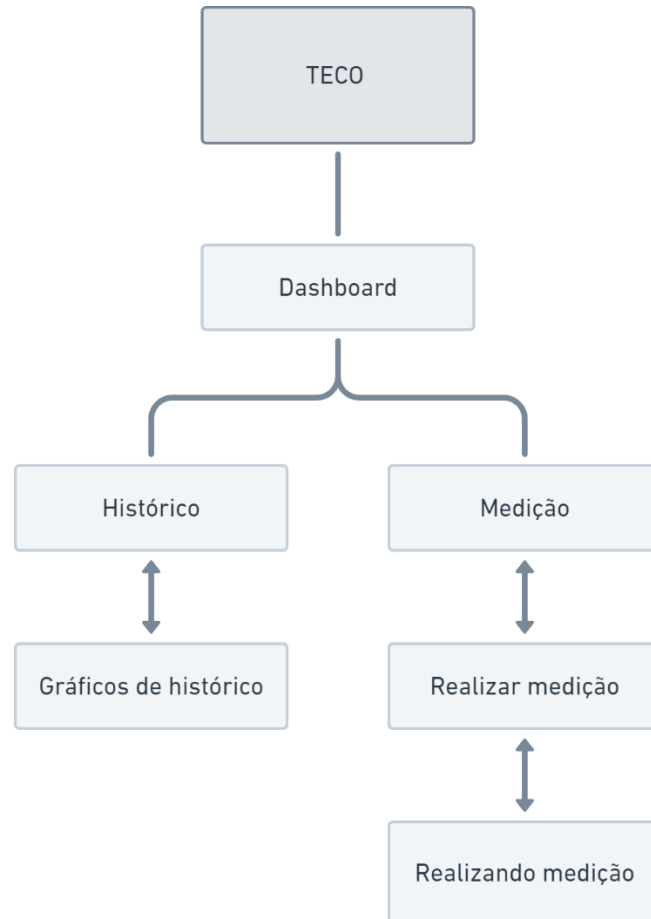


Fonte: Acervo dos autores (2021).

A *API front-end*, nomeada de “TECO”, foi desenvolvida em quatro telas projetadas no site <https://www.figma.com/> que ao criar uma conta pode-se editar *designs* e protótipos baseado em sua maioria para aplicações *web*. As telas

desenvolvidas foram nomeadas: *Dashboard*, Realizar Medição, Realizando Medição e Histórico conforme o fluxograma apresentado na Figura 34.

Figura 34 - Fluxograma do *front-end* desenvolvido.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

A tela *Dashboard* é a primeira tela vista pelo usuário e a tela principal do projeto, todas as demais telas vistas se iniciarão e retornarão a ela. É apresentada duas opções de escolha em forma de botão, a visualização do histórico medido e a medição. Caso seja escolhido a primeira opção a tela Histórico é apresentada, e para o segundo botão apresenta a tela Realizar Medição. A tela de Histórico apresenta todos os dados registrados no banco para a medição feita num determinador motor em forma de gráfico. As grandezas armazenadas são dispostas com mensagens

acima dos gráficos para indicar qual a grandeza associada a tela e ainda apresenta um botão que permite voltar a tela anterior.

A tela Realizar Medição é uma tela destinada a informação essencial para a captura e armazenamento dos dados, há duas opções de voltar a tela anterior e um botão próximo que sinaliza a *API* que todos os sensores foram colocados de forma correta e direciona para a tela Realizando Medição. A tela Realizando Medição apresenta um botão de voltar a tela anterior, um botão “Iniciar” destacado em verde para iniciar a medição, um botão “Parar” destacado em vermelho para parar a medição, e as informações referente as últimas medições realizadas, caso seja a primeira vez sendo realizado não aparecerá nenhuma informação de dados. A Figura 35 exibe as telas do aplicativo.

Figura 35 - Telas do aplicativo desenvolvido.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

3.6. Equipamentos medidores de referência

A Figura 36 apresenta o termovisor Ti32 que é projetado para o uso industrial, com faixa de temperatura de -20°C a 600°C , adequando a facilidade de manuseio com o ajuste da faixa de temperatura para a captação da imagem térmica desejada. As diferenças de temperatura do ambiente são facilmente detectadas pelo equipamento, apresentando uma sensibilidade térmica adequada para indicar problemas em equipamentos como por exemplo, o aquecimento fora do normal de uma máquina elétrica. Para visualizar a imagem gravada no cartão de memória do termovisor, deve-se instalar o *software Fluke SmartView*, como também a edição de todas as imagens térmicas salvas.

Figura 36 - *Fluke Thermal Imager Ti32*.



Fonte: *environmental* (2021).

O alicate amperímetro é um equipamento que pode ser utilizado em vários tipos de medições na área de eletricidade, desde medições de tensões e correntes AC até tensões DC e resistências. Para a medição de corrente alternada no alicate amperímetro funciona quando o fluxo da corrente elétrica no condutor induz um campo eletromagnético em volta do condutor. O campo eletromagnético induzido tem a mesma intensidade da corrente elétrica medida, quando colocado um condutor energizado entre as pinças do equipamento. O campo eletromagnético induz uma

tensão nas boninas do alicate, gerando assim uma corrente elétrica em que o sistema interno do amperímetro faz a leitura e apresenta os resultados na tela.

A Figura 37 apresenta o modelo ET-3201A do alicate amperímetro, que segundo o manual de instruções do fabricante apresenta um *display* de duas mil contagens, possui medições de tensão AC e DC, corrente alternada, resistência, teste de diodo, teste de continuidade e detecção de tensão sem contato.

Figura 37 - Alicate amperímetro digital modelo: ET-3201A.



Fonte: Minipa (2021).

3.7. Motor de indução trifásico utilizado para os testes

Foi utilizado um MIT do laboratório de máquinas elétricas do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Tocantins – *Campus* Palmas, como apresentado na Figura 38, com velocidade de 1720 RPM, 3 cv de potência e corrente nominal de 4,43A/2,56A para respectivamente tensões de 220V/380V. O motor foi ligado na configuração estrela (Y), logo a corrente nominal do motor será 2,56A. O motor possui classe de isolamento “B”, que de acordo a Tabela 1 suporta uma temperatura no ponto mais quente de 130°C.

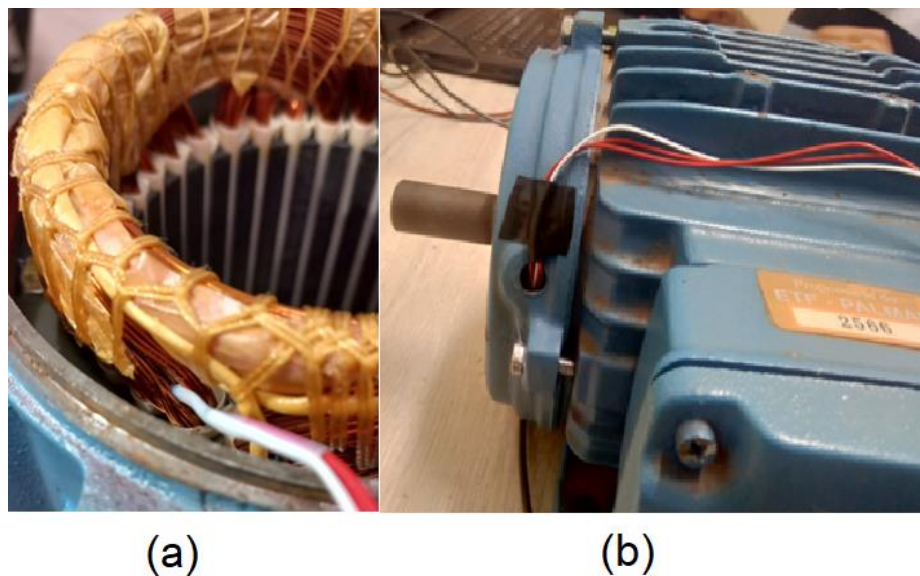
Figura 38 - Motor de indução trifásico



Fonte: Acervo dos autores (2021).

Para a medição da temperatura dos enrolamentos do estator, foi necessário a abertura do motor para a inserção do sensor de temperatura PT100 entre os enrolamentos, como apresentado na Figura 38 (a). Após acomodar o sensor transpassou-se os fios do sensor por um pequeno furo na carcaça do motor, como exibido na Figura 39 (b), assim foi realizado o fechamento do MIT.

Figura 39 - (a) Inserção do sensor de temperatura RTD PT100 no enrolamento do estator; (b) Motor já montado com a presença do sensor de temperatura RTD PT100.



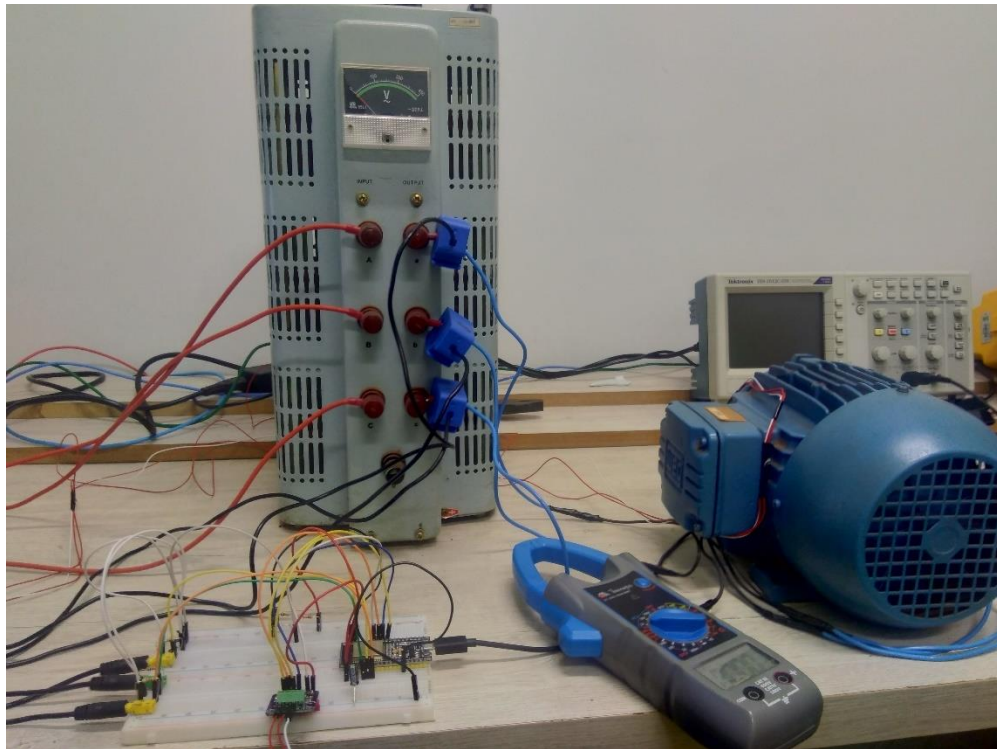
(a)

(b)

Fonte: Acervo dos autores (2021).

O MIT foi conectado aos terminais de um variador de tensão trifásico, os sensores de correntes foram conectados nas fases do motor. A Figura 40 apresenta disposição dos equipamentos utilizados para a realização dos testes experimentais.

Figura 40 - Arranjo das conexões entre o protótipo, motor de indução trifásico e variador de tensão trifásico.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção será apresentado sobre os testes realizados no motor de indução trifásico junto ao sistema desenvolvido, comparando os resultados obtidos com medições realizadas por equipamentos de medição de referência.

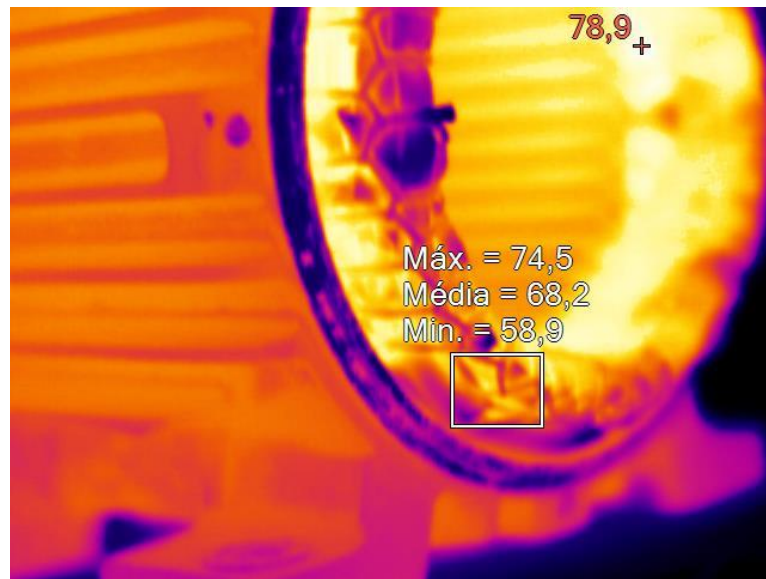
4.1. Testes e resultados no motor de indução trifásico

Os testes experimentais realizados no MIT estão relacionados aos parâmetros mensurados pelos sensores e a validação do sistema desenvolvido. Os ensaios a vazio e com o rotor bloqueado formam a base para a execução dos experimentos, entretanto, não são levados em consideração as perdas suplementares e nem o cálculo do rendimento. Apenas os comportamentos das correntes e temperaturas foram levados em consideração para fim de análise.

4.1.1. Teste no motor operando com o rotor ausente

Inicialmente, foi realizado o ensaio no motor com a ausência do rotor, a uma temperatura ambiente de 28°C. A aplicação de pequenas variações das tensões que energizam o motor, proporciona elevadas correntes. Como a corrente nominal do motor na configuração estrela (Y) é de 2,56A, o motor foi energizado com uma tensão suficiente para não ultrapassar os limites nominais da máquina. A Figura 41 exibe a captura da imagem térmica de um motor submetido a correntes nominais durante um período de tempo.

Figura 41 - Imagem térmica dos enrolamentos do estator com a circulação de correntes nominais.

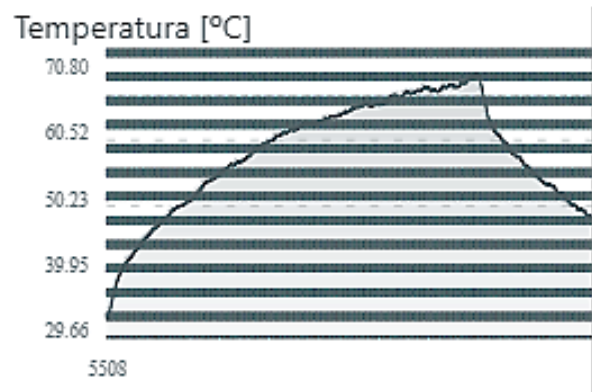


Fonte: Acervo dos autores (2021).

O sensor de temperatura RTD PT100 alojado no enrolamento do estator apresentou valores aproximadamente iguais aos valores obtidos pelo termovisor. A análise consistiu em observar o comportamento da temperatura com um motor ausente de rotor, dessa forma a temperatura aumentou de forma considerável até o valor máximo de 78,9°C no ponto mais quente da máquina, e uma média de 68,2°C no local onde se encontra o sensor.

O gráfico apresentado na Figura 42 exibe na tela do aplicativo desenvolvido a curva dos valores medidos pelo sensor e enviados ao banco de dados. Após a aquisição de 5.508 amostras de temperatura é visto o aumento gradual de temperatura em um certo período e até alcançar a temperatura de aproximadamente 70,8°C. Após o motor foi desenergizado resultando na diminuição da temperatura no enrolamento.

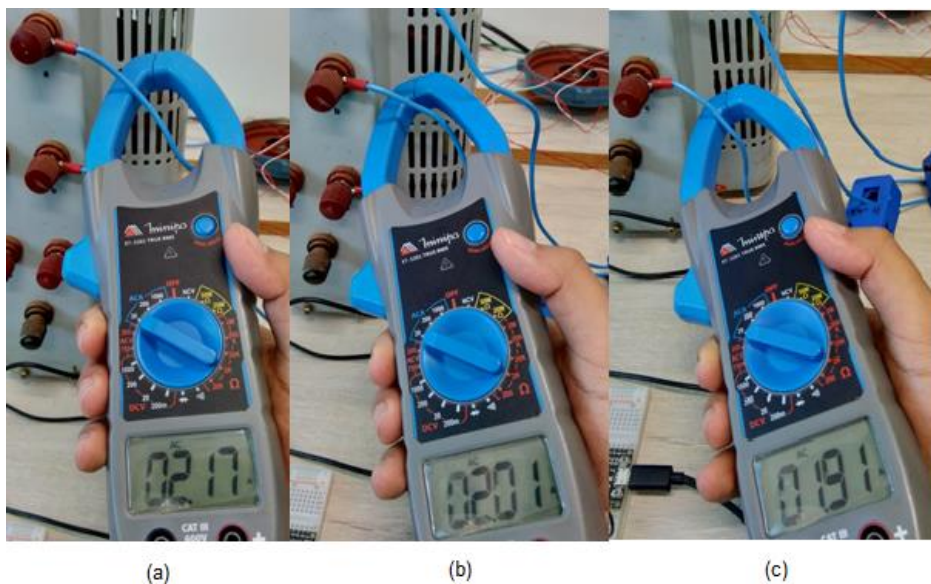
Figura 42 - Gráfico da temperatura sob condições de correntes nominais e ausência do rotor.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

As correntes medidas nas três fases do motor por meio do alicate amperímetro são apresentadas na Figura 43, exibindo um leve desbalanceamento entre si. Os valores de corrente permaneceram constantes durante o período de análise, contudo, as correntes medidas pelos sensores apresentaram variações na captação das amostras.

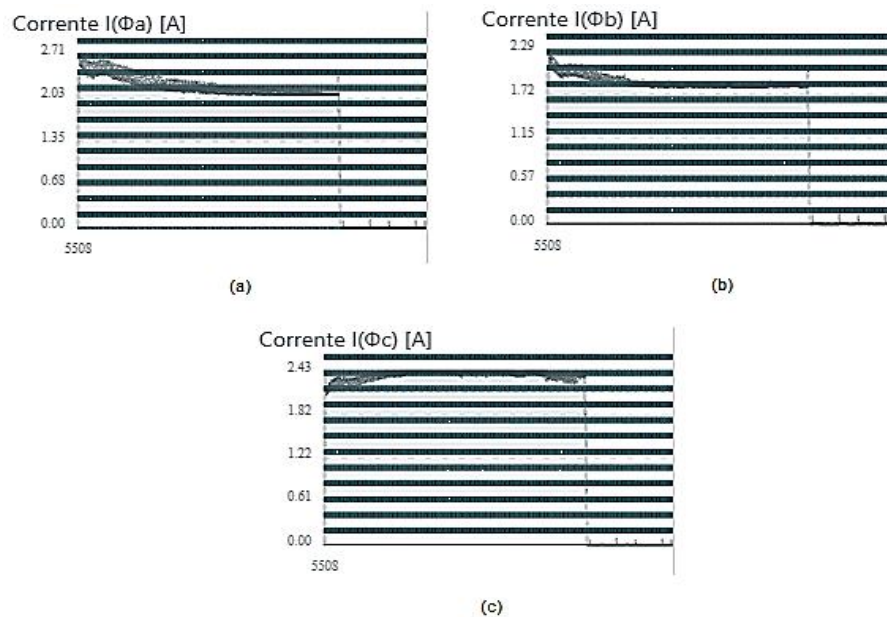
Figura 43 – Medição das correntes nas fases no motor sem o rotor: (a) Corrente na fase a; (b) Corrente na fase b e (c) Corrente na fase c.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

A Figura 44, exibe os gráficos das correntes medidas nas três fases, é observado um grau de dispersão das amostras, evidenciando imprecisões nos valores obtidos.

Figura 44 - Gráficos das correntes das fases medidas pelo dispositivo e apresentadas na tela de histórico do aplicativo.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

As informações mensuradas pelos medidores de referência e protótipo estão incluídas na Tabela 4, os valores apresentam diferenças entre si. A temperatura de 70,8°C medida pelo protótipo está 5% abaixo do valor medido pelo termovisor, e as correntes I_a , I_b e I_c apresentam uma diferença de 6%, 14% e 27% respectivamente das correntes medidas pelo alicate amperímetro, mostrando valores discrepantes e insatisfatórios para medições que necessitam de precisão.

Tabela 4 - Relação entre valores medidos pelo protótipo e os medidores de referência no teste com a ausência do rotor.

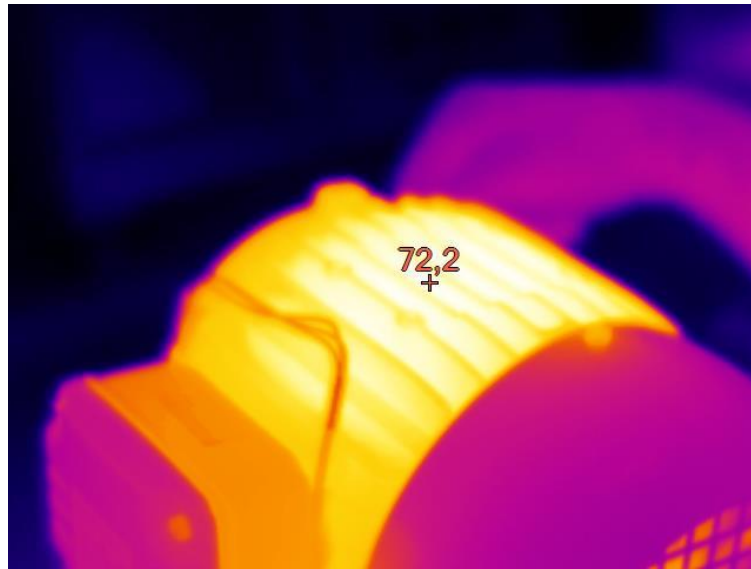
	Temperatura (°C)	I_a (A)	I_b (A)	I_c (A)
Medidores de referência	74,5	2,17	2,01	1,91
Protótipo	70,8	2,03	1,72	2,43
Diferença	5%	6%	14%	27%

Fonte: Acervo dos autores (2021).

4.1.2. Teste no motor operando com rotor bloqueado

O teste experimental do motor com o rotor bloqueado consiste no travamento do rotor de modo que não possa girar, as tensões trifásicas equilibradas são aplicadas nos terminais do estator até um valor que seja capaz de obter correntes próximas as nominais do motor. A Figura 45, apresenta a temperatura no ponto mais quente da carcaça do motor, porém a temperatura da carcaça não dá indicação do aquecimento interno do motor (WEG, 2005).

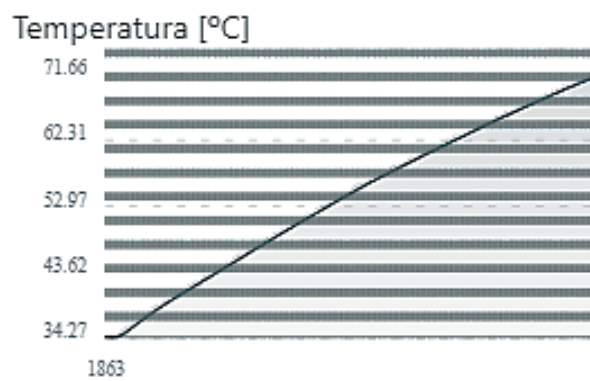
Figura 45 - Temperatura no ponto mais quente na carcaça do MIT.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

Em comparação a temperatura medida pelo termovisor da carcaça do motor, o valor máximo da temperatura dos enrolamentos do estator medida pelo protótipo é de 71,66°C, ou seja, abaixo da temperatura de referência de 72,2°C. A Figura 46, exibe o gráfico com 1.863 amostras de temperaturas que foram mensuradas, possuindo uma um certo grau de linearidade nos valores obtidos.

Figura 46 - Gráfico da temperatura sob condições de rotor bloqueado e de correntes nominais.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

A Figura 47, exibe um pequeno desbalanceamento entre a corrente da fase a e as demais correntes, porém não inviabiliza as medições realizadas. Durante o período de análise as correntes medidas pelo alicate amperímetro apresentaram valores constantes.

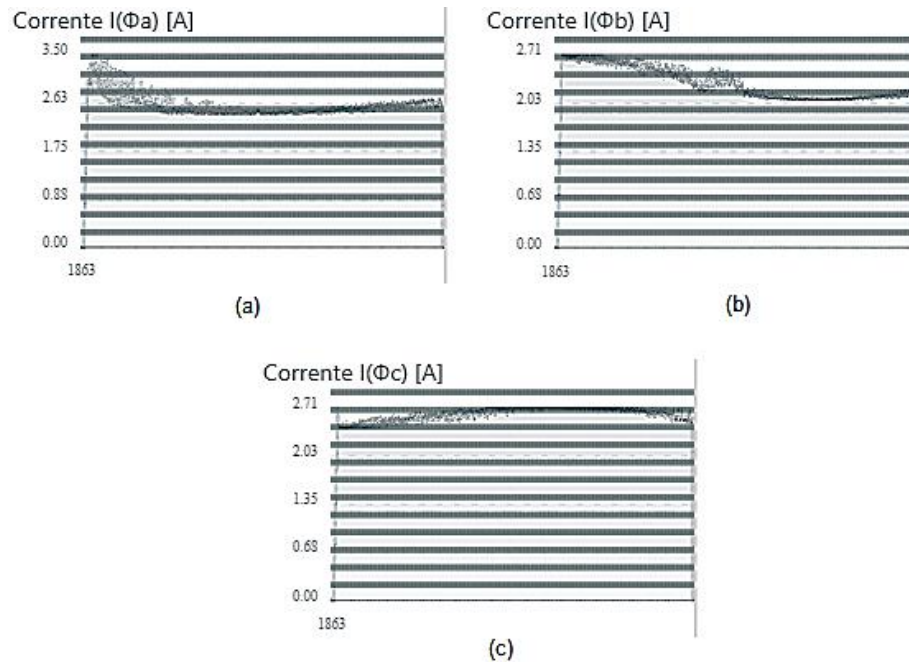
Figura 47 – Medição das correntes nas fases no motor com o rotor bloqueado: (a) Corrente na fase a; (b) Corrente na fase b e (c) Corrente na fase c.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

A Figura 48 apresenta os gráficos contendo as correntes medidas e apontando as dispersões que nos valores de correntes mostraram-se um problema para a validação do protótipo, porém com o passar do tempo as amostras tendem a se estabilizarem em uma faixa de valores aceitáveis.

Figura 48 - Gráficos das correntes das fases medidas pelo dispositivo do motor com rotor bloqueado.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

As informações presentes na Tabela 5, expõe valores medidos pelo protótipo aceitáveis comparados aos medidores de referência, contudo a corrente na fase b (I_b) apresenta um valor inferior a 7% do valor de referência.

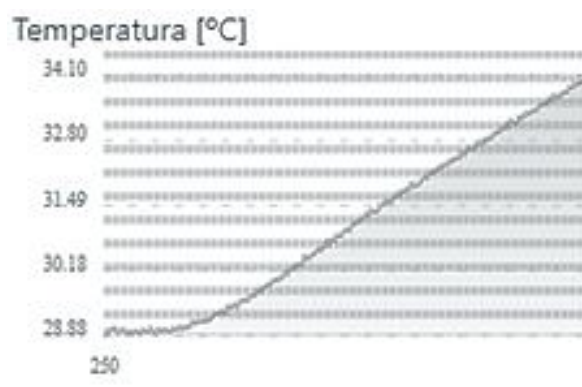
Tabela 5 - Relação entre valores medidos pelo protótipo e os medidores de referência no teste com o rotor bloqueado.

	Temperatura (°C)	I_a (A)	I_b (A)	I_c (A)
Medidores de referência	72,2	2,63	2,42	2,45
Protótipo	71,66	2,58	1,26	2,50
Diferença	1%	2%	7%	2%

Fonte: Acervo dos autores (2021).

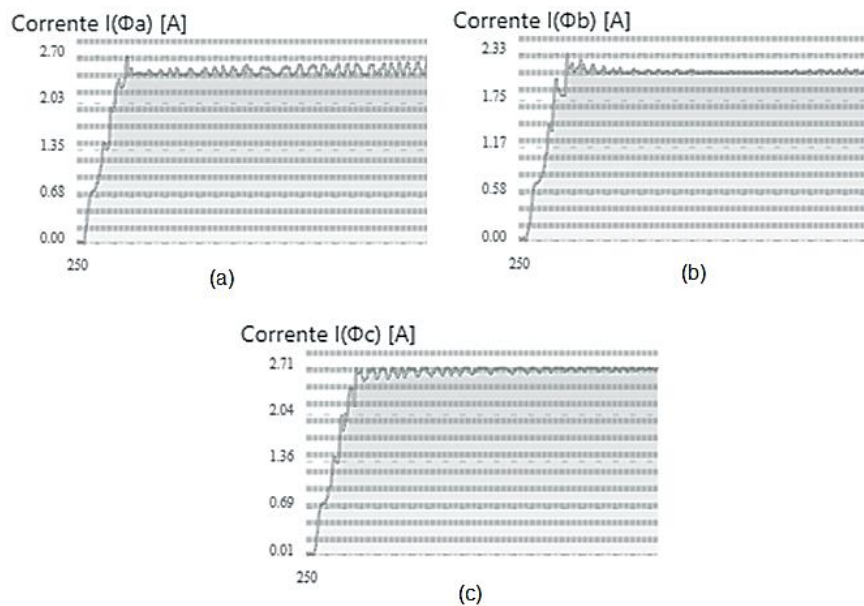
Uma segunda medição foi realizada no motor com o rotor bloqueado para um total de 250 amostras de temperatura e correntes. A Figura 49 apresenta um gráfico da temperatura com valores que tendem a linearidade, já a Figura 50 (a), exibe o gráfico dos valores medidos de corrente (I_a) com uma certa dispersão de amostras, porém, em uma faixa aceitável de corrente, assim como as correntes I_b e I_c .

Figura 49 - Gráfico da temperatura com 250 amostras sob condições de rotor bloqueado e de correntes nominais.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

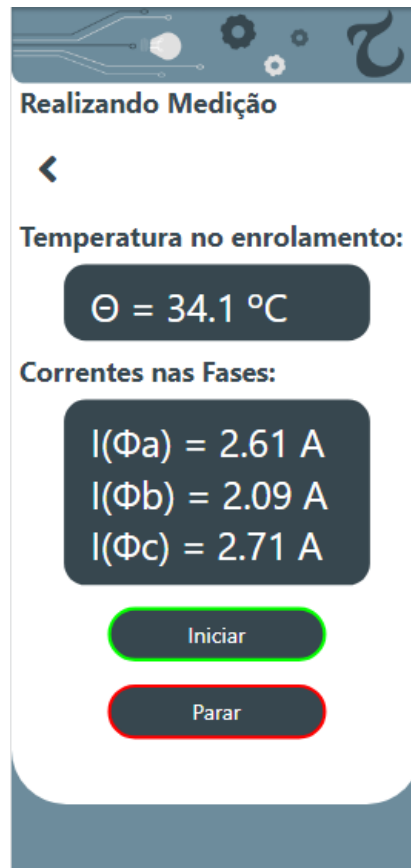
Figura 50 - Gráficos das correntes das fases medidas pelo dispositivo com 250 amostras.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

A Figura 51 mostra a tela de medição do aplicativo, o qual exibe o último valor de medição realizado pelos sensores, cujas as correntes apresentam um desbalanceamento entre si. A imprecisão da medição de correntes e temperatura do dispositivo eleva o grau de incerteza das medições realizadas.

Figura 51 - Tela de medição do aplicativo.



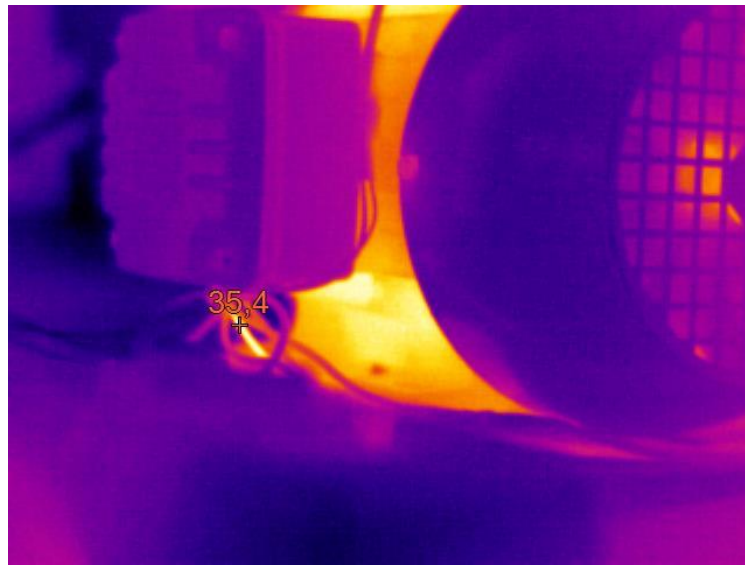
Fonte: Acervo dos autores (2021).

4.1.3. Teste no motor operando a vazio

O motor de indução funcionando a vazio “fornece informações em relação à corrente de excitação e às perdas a vazio” (Umans 2014). Porém, o interesse do ensaio realizado foi observar os valores de correntes medidos pelo dispositivo, pois após o motor funcionar tempo suficiente com tensões trifásicas aplicadas aos terminais do estator, o rotor estabiliza em uma velocidade constante com baixas correntes em regime permanente.

O teste do motor a vazio foi realizado após o teste do motor com rotor bloqueado, com 250 amostras. Dessa maneira a temperatura diminuiu devido a ventilação própria do motor e por não haver esforços mecânico no rotor. A princípio o motor estava com uma temperatura externa de aproximadamente 35,4°C como exibido na Figura 52.

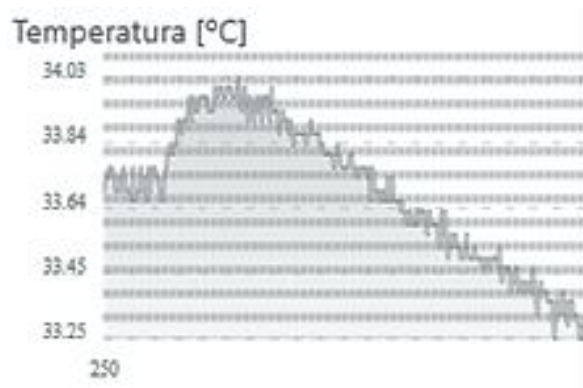
Figura 52 - Temperatura na carcaça do motor antes de efetuar o teste com o motor funcionando a vazio.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

As 250 amostras de temperaturas medidas, apresentaram uma pequena dispersão nos valores. Como a faixa de temperatura não é grande, os valores medidos pelo protótipo mesmo com a dispersão das amostras apresentado na Figura 53, não é prejudicial para a análise da temperatura.

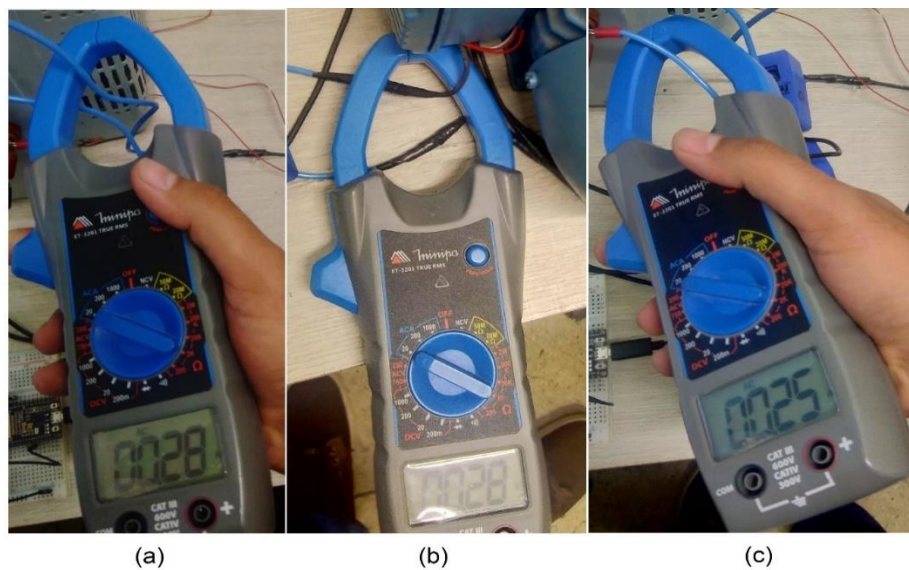
Figura 53 - Gráfico da temperatura com o motor a vazio sob condições de correntes nominais.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

As correntes medidas pelo alicate amperímetro em um motor de indução trifásico operando a vazio é exibida na Figura 54.

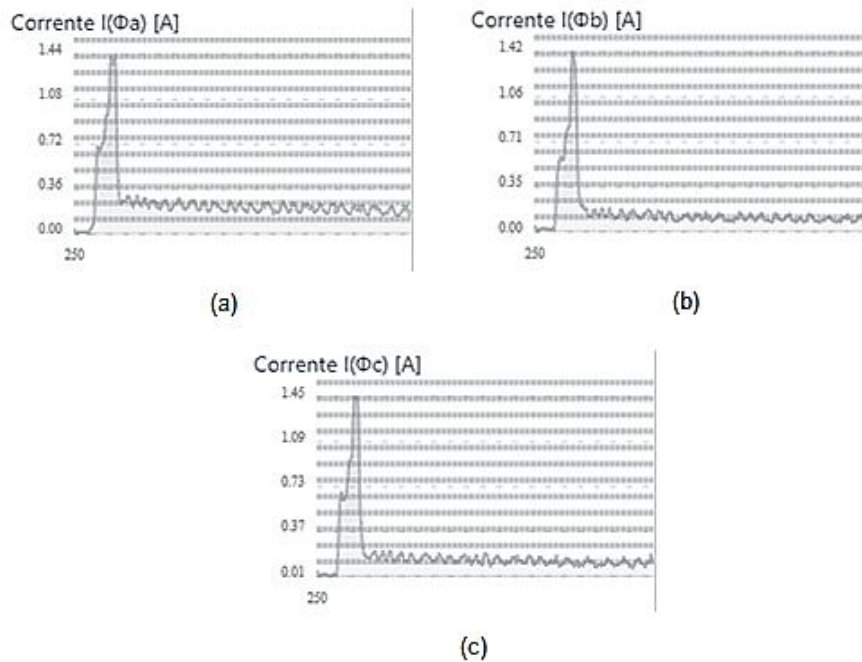
Figura 54 – Medição das correntes nas fases no motor com o motor operando a vazio: (a) Corrente na fase a; (b) Corrente na fase b e (c) Corrente na fase c.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

É possível observar na Figura 55, que as correntes medidas apresentam um pico de corrente no início da medição, até o motor romper a inércia e começar a girar até a velocidade nominal.

Figura 55 - Gráficos das correntes a vazio das fases medidas pelo dispositivo com 250 amostras.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

A discrepância dos valores das correntes apresenta um protótipo incapaz de medir corrente baixas com precisão. A Tabela 6 mostra os valores medidos pelo dispositivo, sendo a temperatura o valor mais próximo do real. Já as correntes apresentam uma diferença de até 52% com os valores reais de corrente.

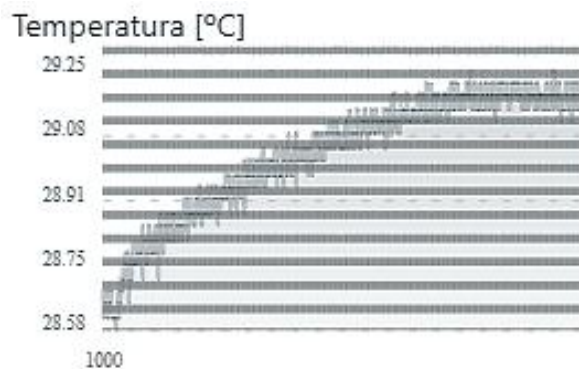
Tabela 6 - Relação entre valores medidos pelo protótipo e os medidores de referência no teste com o motor operando a vazio.

	Temperatura (°C)	I _a (A)	I _b (A)	I _c (A)
Medidores de referência	35,40	0,28	0,25	0,25
Protótipo	33,39	0,18	0,13	0,12
Diferença	6%	36%	48%	52%

Fonte: Acervo dos autores (2021).

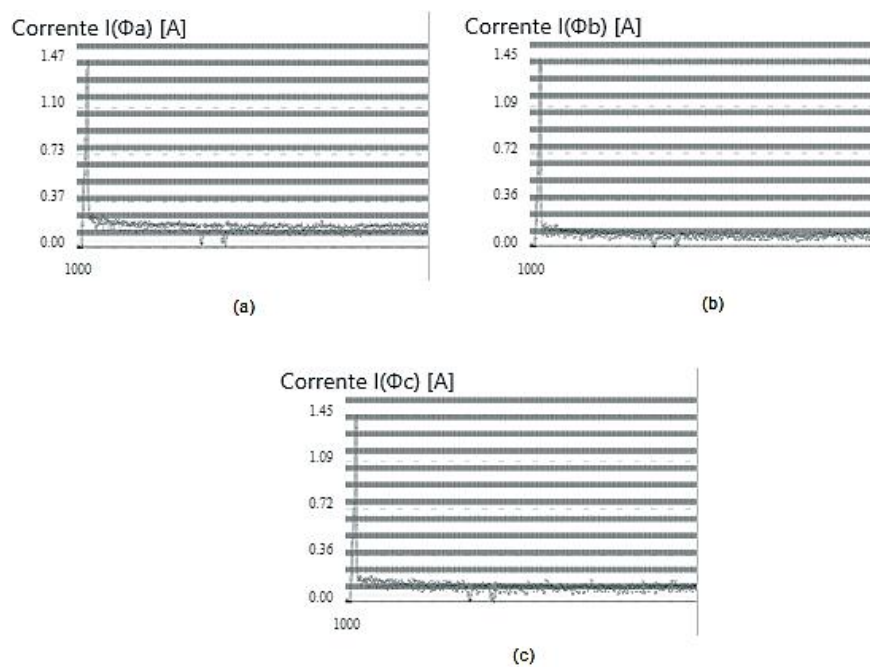
O segundo teste do motor com rotor operando a vazio foi realizado com o protótipo com a captura de 1000 amostras, como apresentado nas Figuras 56 e 57. A temperatura aumentou aproximadamente 1°C e as correntes apresentaram valores imprecisos e dispersos.

Figura 56 - Gráfico da temperatura com o motor a vazio sob condições de correntes nominais, com 1000 amostras medidas.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

Figura 57 - Gráficos das correntes a vazio das fases medidas pelo dispositivo com 1000 amostras.



Fonte: Acervo dos autores (2021).

No desenvolvimento do projeto, apresentou-se problemas relacionados com a queima de um dos microcontroladores utilizados, a demora no envio dos componentes eletrônicos e as falhas nos conectores do módulo sensor MAX31865. Nos testes necessários para a validação das medições, verifica-se que o sistema proposto não atendeu os resultados esperados quanto a precisão das leituras de correntes.

4.2. Custo do projeto

O custo total dos componentes utilizados no circuito do protótipo é apresentado na Tabela 7, todos os valores referem-se ao mês de dezembro de 2021.

Tabela 7 - Custo total do protótipo com componentes comprados em território nacional.

Componentes	Quantidade	Valor (R\$)	Frete (R\$)
ESP-WROOM-32 38 pinos	1	49,49	24,15
Sensor de corrente não invasivo 100A SCT-013-000	3	141,87	
<i>Jumper</i> premium 40p x 20cm - Macho / Macho	20	4,2	
Resistor de 1kΩ 5% (1/4W)	3	0,18	
Resistor de 10kΩ 5% (1/4W)	2	0,12	
<i>Protoboard</i> 830 pontos	1	15,9	35,82
Módulo sensor temperatura RTD PT100 MAX31865	1	73,87	
Capacitor eletrolítico 10uF/50V	2	0,96	
<i>Plug</i> P2 fêmea	3	6,3	29,09
Resistor PT100 (3 fios)	1	116,77	37,10
Valor total (R\$)		409,66	126,16
Valor total com frete (R\$)		535,82	

Fonte: Acervo dos autores (2021).

É relevante observar que os componentes utilizados foram adquiridos em lojas *online* brasileiras, contudo há a possibilidade de comprar os mesmos componentes em lojas chinesas, reduzindo consideravelmente o valor total do dispositivo, como apresentado na Tabela 8, pois os sensores e o microcontrolador utilizados apresentam os maiores custos que os demais, elevando assim o valor total do projeto. Como os componentes são fabricados pela China, o custo em adquirir diretamente de *sites* chineses se torna mais viável em comparação aos *sites* brasileiros, pois possuem uma diferença de aproximadamente 37,9% no valor final dos produtos.

Tabela 8 - Custo total do protótipo com componentes comprados na China.

Componentes	Quantidade	Valor (R\$)	Frete (R\$)
ESP-WROOM-32 38 pinos	1	23,99	29,18
Módulo sensor temperatura RTD PT100 MAX31865	1	35,68	
Sensor de corrente não invasivo 100A SCT-013-000	3	67,65	-
<i>Jumper</i> premium 40p x 20cm - Macho / Macho	20	3,69	-
Resistor de 1kΩ 5% (1/4W)	3	0,08	22,20
Resistor de 10kΩ 5% (1/4W)	2	0,05	
<i>Protoboard</i> 830 pontos	1	2,92	31,03
Capacitor eletrolítico 10uF/50V	2	0,21	30,55
<i>Plug</i> P2 fêmea	3	7,63	26,61
Resistor PT100 (3 fios)	1	21,06	30,13
Valor total (R\$)		162,96	169,70
Valor total com frete (R\$)		332,66	

Fonte: Acervo dos autores (2021).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foram apresentados experimentalmente três testes em um motor de indução trifásico para a comparação do protótipo desenvolvido com medidores de referência, utilizando apenas medições de temperatura no estator e corrente nos enrolamentos do motor. Também foram apresentadas a implementação do sistema e as tecnologias utilizadas necessárias para o desenvolvimento do *front-end* e *back-end*. O aprendizado e a aplicação das linguagens de programação utilizadas no projeto demandaram um tempo considerável, porém são importantes para desenvolver novas tecnologias relevantes para a sociedade.

Por meio de comparações entre os valores dos parâmetros medidos pelos equipamentos de referência e o protótipo, atestou-se a imprecisão e a dispersão dos valores de correntes através de testes experimentais. O custo do projeto se tornou um problema devido ao elevado valor dos sensores, sendo uma solução financeiramente viável a compra dos componentes em lojas digitais chinesas, contudo, o tempo de envio se mostrou um empecilho para o fluxo de trabalho.

Uma das contribuições do trabalho foi o desenvolvimento de uma plataforma composta pelo banco de dados e aplicativo, podendo ser otimizada e melhorada para receber novas aplicações e um novo *hardware* com medições mais precisas. Embora os valores de temperatura medidos pelo sensor RTD PT100 sejam próximos dos valores reais, o módulo MAX31865 apresentou erros referentes as conexões elétricas na PCB e não efetuando a medição contínua de forma satisfatória.

Alguns pontos devem ser melhor estudados, como a biblioteca do *React Native socket.io* que permite a transmissão de forma instantânea na comunicação bidirecional entre o banco de dados e o *front-end*, possibilitando a atualização e envio em tempo real dos valores medidos pelos sensores. Outros pontos que devem ser revistos e estudados referem-se a eletrônica envolvida em circuitos embarcados.

Os resultados obtidos dos testes no motor indicaram que o protótipo não está apto a realizar medições e monitoramentos de grandezas que necessitam de alto grau de precisão.

REFERÊNCIAS

ADA, Lady. **Adafruit MAX31865 RTD PT100 or PT1000 Amplifier**. Disponível em: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-max31865-rtd-pt100-amplifier.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2021.

ADA, Lady. **Adafruit MAX31865 RTD PT100 ou Amplificador PT1000**. Disponível em: <https://learn.adafruit.com/adafruit-max31865-rtd-pt100-amplifier/pinouts>. Acesso em: 07 jun. 2021.

ALBUQUERQUE, Yure. **ESP32 pinout: guia básico de gpios**. Guia Básico de GPIOs. 2020. Disponível em: [https://blog.smartkits.com.br/esp32-pinout-guia-basico-de-gpios/#:~:text=EN\(Enable\)%3A%20Pino%20de,Corrente%20m%C3%A1xima%20de%20500mA.https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1159366/YHDC/SCT013.htmlhttps://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/30271/23808](https://blog.smartkits.com.br/esp32-pinout-guia-basico-de-gpios/#:~:text=EN(Enable)%3A%20Pino%20de,Corrente%20m%C3%A1xima%20de%20500mA.https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1159366/YHDC/SCT013.htmlhttps://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/30271/23808). Acesso em: 05 jun. 2021.

ALMEIDA, Maria Leonor Silva de. **AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO SUBMETIDO A DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO**. 2013. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/13339>. Acesso em: 6 jun. 2021.

ALVES, P. V.; RIZZUTI, B. F.; GONÇALVES, R.. **Uma proposta didática para o estudo da interação magnética entre ímãs e algumas considerações epistemológicas**. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/tz4pKkfN9yB5kys39NVYqZB/?lang=pt#ModalTutors>. Acesso em: 30 nov. 2021.

ANASTACIO, Breno P. *et al.* **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO**. 2020. Disponível em: <https://seer.cesjf.br/index.php/ANL/article/viewFile/2351/1570>. Acesso em: 06 jun. 2021.

API: conceito, exemplos de uso e importância da integração para desenvolvedores. conceito, exemplos de uso e importância da integração para desenvolvedores. 2019.

Disponível em: <https://www.take.net/blog/tecnologia/api-conceito-e-exemplos/>. Acesso em: 01 dez. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17094**: Máquinas elétricas girantes – Parte 1: Motores de indução trifásicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

BACCARINI, Lane Maria Rabelo. **Detecção e diagnóstico de falhas em motores de indução**. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/HSAA-6MJPHW>. Acesso em: 10 nov. 2021.

Beijing Yaohuadechang Electronic Co., Ltd. **SCT013 Datasheet**. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1159366/YHDC/SCT013.html>. Acesso em: 07 jun. 2021.

BERTOLETI, Pedro. **Principais conceitos de RTOS para iniciantes com Arduino e FreeRTOS**. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/rtos-para-iniciantes-com-arduino-e-freertos/>. Acesso em: 01 dez. 2021.

BINKER, Carlos Alberto *et al.* **ACCESO REMOTO A DISPOSITIVOS IOT MEDIANTE TÉCNICAS DE MENSAJERÍA EMPLEANDO BOTS Y FREERTOS**. 2020. Disponível em: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Eu8ZQZvIFz4J:https://red di.unlam.edu.ar/index.php/ReDDi/article/download/117/243/+&cd=25&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>. Acesso em: 07 out. 2020.

BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à análise de circuitos**. 12 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.

BRAGA, Newton C.. **Como funcionam os LDOs (ART767)**. 2012. Disponível em: <https://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/6102-art767.html>. Acesso em: 06 jun. 2021.

BRITO, Matheus Fernandes de; VASCONCELOS, Paulla Hortência Freitas. **ANÁLISE DE SINAIS OBTIDOS DE TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS SUBMETIDOS À VARIAÇÃO DE TEMPERATURA**. 2019. Disponível em: <http://www.ifto.edu.br/palmas/campus-palmas/ensino/biblioteca/Acervo/trabalhos->

academicos/engenharia-eletrica/2019/matheus-fernandes-de-brito-e-paulla-hortencia-freitas-vasconcelos.pdf/view. Acesso em: 07 jun. 2021.

BULHÕES, Gabriel *et al.* **MQTT**. 2019. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2019-1/vf/mqtt/>. Acesso em: 07 jun. 2021.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Como funciona: WEG Motor Scan®. WEG Motor Scan®. Disponível em: <https://www.weg.net/wegmotorscan/pt/how-it-works>. Acesso em: 30 nov. 2021.

COSTA NETO, Luiz Gonzaga da. **INFLUÊNCIA DO MONITORAMENTO OBJETIVO E SUBJETIVO NA DISPONIBILIDADE E CONFIABILIDADE DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS**. Disponível em: http://iepapp.unimep.br/biblioteca_digital/pdfs/2006/OPWAKPUSCODR.pdf. Acesso em: 10 nov. 2021.

DATE, C. J.. **Introdução a Sistemas de BANCOS DE DADOS**. 8. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de maquinas elétricas**. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1994.

EDITOR web grátis baseado em nuvem Arduino. Disponível em: <https://arduino.softonic.com.br/>. Acesso em: 10 nov. 2021.

ESCUDELARIO, Bruna; PINHO, Diego. **React Native**: desenvolvimento de aplicativos mobile com react. Desenvolvimento de aplicativos mobile com React. 2020. Disponível em: <https://www.casadocodigo.com.br/products/livro-react-native>. Acesso em: 24 abr. 2021.

ESPRESSIF SYSTEMS. **VERSION 3.6**: ESP32 Series Datasheet. Xangai: Espressif Systems, 2021. 65 p. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 20 abr. 2021.

FERREIRA, Carlos Andre. **SISTEMA DE MONITORAMENTO EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO A PLATAFORMA ARDUINO**. 2019. Disponível em:

http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15907/1/GP_COMIM_2019_2_03.pdf. Acesso em: 11 mar. 2021.

FLANAGAN, David. **JavaScript: o guia definitivo**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

FLUKE - Model Ti32 - Thermal Imager. Disponível em: <https://www.environmental-expert.com/products/fluke-model-ti32-thermal-imager-402749>. Acesso em: 30 nov. 2021.

FRADEN, J. **Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications**. 3rd. ed. San Diego: Springer-Verlag, 2004.

GRANADO, Marcos Vinícius Rodrigues Lopes. **TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DO ROTOR EM MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES**. 2018.

Disponível em: https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/301/TCC_MARCOS_FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Existem%20diversas%20metodologias%20e%20tecnologias,abordagens%20invasivas%20e%20n%C3%A3o%2Dinvasivas..
Acesso em: 16 mar. 2021.

GUEDES, Jacqueline Jordan. **IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS UTILIZANDO ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO E SISTEMAS INTELIGENTES**. Disponível em:

http://www.uel.br/pos/deel/Thesis/Tese3_JJG.pdf. Acesso em: 10 nov. 2021.

HENDARTO, Deni; TAUFIK, Fajar Ilham. **IMPLEMENTASI SIGNAL4-20mA SEBAGAI PENGATUR VARIABLE FREQUENCY DRIVE (VFD) BERBASIS SENSOR RTD PT100**. Disponível em:

<https://core.ac.uk/download/pdf/230811472.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2021.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60034-30: Rotating electrical machines – Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code)**, Ed. 1, Nov. 2008.

KARDEC, A.; NASCIF, J. *Manutenção - Função Estratégica*. 4. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014.

KNÜPPE, Leonardo Lisboa; SEFRIN, Luís Henrique. **CAMPO GIRANTE TRIFÁSICO**. Disponível em: <https://leoknuppe.wordpress.com/2013/11/07/272/>. Acesso em: 07 jun. 2021.

KOLBAN, Neil. **Kolban's book on ESP32**. 2018. Disponível em: <https://leanpub.com/kolban-ESP32>. Acesso em: 08 abr. 2021.

MAESTRELLI, Giovani Andrey; NAPOLEÃO, Guilherme Szemczak. **SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA MONITORAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL**. 2018. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11888/1/CT_COELE_2018_1_14.pdf. Acesso em: 10 mar. 2021.

MAGDY, Khaled. **ESP32 ADC Tutorial – Read Analog Voltage in Arduino**. Disponível em: <https://deepbluembedded.com/esp32-adc-tutorial-read-analog-voltage-arduino/>. Acesso em: 01 dez. 2021.

MATTEDE, Henrique. **Alicate amperímetro – Características e funcionamento!** Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/alicate-amperimetro-caracteristicas-funcionamento/>. Acesso em: 30 nov. 2021.

MATTOS, Janaína. **Manutenção preditiva: conceitos e aplicações**. Disponível em: <https://rabbot.co/blog/manutencao-preditiva-conceitos-e-aplicacoes/>. Acesso em: 20 nov. 2021.

MAX31865- Amplificador para Sensor de Temperatura -PT100 RTD. Disponível em: <https://www.ptrobotics.com/sensores-de-temperatura/5294-max31865-amplificador-para-sensor-de-temperatura-pt100-rtd.html>. Acesso em: 30 nov. 2021.

Maxim Integrated. **MAX31865**: rtd-to-digital converter datasheet. RTD-to-Digital Converter Datasheet. 2021. Disponível em: <https://onedrive.live.com/?authkey=%21AMetylkwhQvPdBw&cid=71A3C20A0F939909&id=71A3C20A0F939909%2122362&parId=71A3C20A0F939909%216795&o=OneUp>. Acesso em: 07 jul. 2021.

MINIPA. **ET-3201A**: manual de instruções. MANUAL DE INSTRUÇÕES. Disponível em: <https://www.minipa.com.br/images/Manual/ET-3201A-1100-BR.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2021.

MONGODB. **10gen anuncia mudança de nome da empresa para MongoDB, Inc.** 2021. Disponível em: <https://www.mongodb.com/press/10gen-announces-company-name-change-mongodb-inc>. Acesso em: 06 jun. 2021.

MONITORAMENTO Online e Gestão de Ativos em um só lugar. Tractian. Disponível em:

https://traction.com/?utm_term=traction&utm_campaign=%5BS%5D+Institucional+Varia%C3%A7%C3%B5es&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=1812744788&hsa_cam=14308188438&hsa_grp=124386594165&hsa_ad=563996165225&hsa_src=g&hsa_tgt=kwd-118361294&hsa_kw=traction&hsa_mt=p&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gclid=Cj0KCQiA7oyNBhDiARIsADtGRZZBa8OTuTPH3g_o5jeVYo8IkTa7eK6yXAATw5XwN1_1LyhqzZmWtxoaAqzdEALw_wcB. Acesso em: 30 nov. 2021.

MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS: Com sistema de controle para levantamento automático das escovas. Com sistema de controle para levantamento automático das escovas. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h59/h5e/WEG-motores-com-sistema-de-controle-para-levantamento-autom-tico-das-escovas-50042391-catalogo-portugues.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2021.

MUXIRI, Ananias da Conceição Pinheiro. **Análise térmica de um motor de indução sujeito a falhas de curto-circuito entre espiras dos enrolamentos estáticos.** Disponível em: https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/9920/1/6492_14319.pdf. Acesso em: 10 nov. 2021.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Como fazer medições de temperatura com RTDs** : Guia prático. 2016. Disponível em: <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA03q000000x1rnCAA&l=en-US>. Acesso: 07 jun. 2021.

NETO, Waldemar. **Construindo APIs testáveis com Node.js.** 2020. Disponível em: <http://leanpub.com/construindo-apis-testaveis-com-nodejs>. Acesso em: 10 abr. 2021.

O QUE é API? Disponível em: <https://www.redhat.com/pt-br/topics/api/what-are-application-programming-interfaces>. Acesso em: 01 dez. 2021.

OLIVEIRA, Esdras Rocha de. **O USO DE ENGINES PARA O DESENVOLVIMENTO DE JOGOS ELETRÔNICOS**. 2013. Disponível em: <http://www2.uesb.br/computacao/wp-content/uploads/2014/09/O-USO-DE-ENGINES-PARA-O-DESENVOLVIMENTO-DE-JOGOS-ELETR%C3%94NICOS-esdras-rocha-de-oliveira.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2021.

PAULILO, Gilson. **Capítulo III: desequilíbrios de tensão**. Desequilíbrios de tensão. Disponível em: http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/03/Ed86_fasc_qualidade_cap3.pdf. Acesso em: 15 out. 2021.

PEDRINI, Filipe. **IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS POR MEIO DA VARIAÇÃO DE CARGA**. Disponível em: https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/1283/TCC_Identifica%C3%A7%C3%A3o_Par%C3%A2metros_El%C3%A9tricos_Motores_Indu%C3%A7%C3%A3o.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 28 nov. 2021.

PEREIRA, Rafael Sampaio; JESUS, José Souza de; BARBOSA, Matheus Thiago Marques; BARROS, Eric Bernardes Chagas; PEIXOTO, Maycon Leone Maciel. **Energesis: fog smart meter para hospedagem compartilhada**. Fog Smart Meter para Hospedagem Compartilhada. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/courb/article/view/7479/7361>. Acesso em: 01 dez. 2021.

PERIN, Matheus. **ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS USANDO IMPEDÂNCIA INSTANTÂNEA**. 2017. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/169757/001048231.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01 dez. 2021.

PINHO, Diego Martins de. **ECMAScript 6: Entre de cabeça no futuro do JavaScript**. 2017. Disponível em: <https://www.casadocodigo.com.br/products/livro-ecmascript6>. Acesso em: 15 abr. 2021.

PONCHET, Plateny de Brito. **Avaliação do transformador de corrente SCT-013 aplicado em medidor eletrônico de potência**. 2016. 82f. (Trabalho de Conclusão de

Curso - Monografia), Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba - Brasil, 2016. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/18687>. Acesso em: 07 jun. 2021.

PT100 MAX31865 RTD Temperature Thermocouple Sensor Amplifier Module for Arduino Raspberry Pi. Disponível em: <https://www.zoodmall.iq/en/product/14748013/3pcs-pt100-max31865-rtd-temperature-thermocouple-sensor-amplifier-module-for-arduino-raspberry-pi/>. Acesso em: 01 dez. 2021.

REFERÊNCIA de pinagem do ESP32: Quais pinos do GPIO você deve usar?. Quais pinos do GPIO você deve usar?. Disponível em: <https://capsistema.com.br/index.php/2020/03/22/referencia-de-pinagem-do-esp32-quais-pinos-do-gpio-voce-deve-usar/>. Acesso em: 01 dez. 2021. SEBESTA, Robert W.. **Conceitos de Linguagens de Programação**. 11. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.

REZENDE, Paulo Henrique Oliveira *et al.* **EFEITOS DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÕES DE SUPRIMENTOS NOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**. 2013. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/view/4473>. Acesso em: 07 jun. 2021.

ROBBINS, Jennifer Niederst. **Learning Web Design: a beginner's guide to html, css, javascript, and web graphics**. 4. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2012.

SILVA, Eraldo Silveira e. **Uma linguagem de programação de componentes para aplicações distribuídas em tempo real: projeto e implementação**. Projeto e implementação. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/111514/82425.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 28 nov. 2021.

SILVA, Rafael Gomes da *et al.* **Aquisição da potência ativa no fresamento frontal utilizando um sistema de baixo custo**. 2021. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/30271/23808>. Acesso em: 07 jun. 2021.

SOARES, Lorena Leal de Oliveira. **DETERMINAÇÃO DO INÍCIO DA DEPOSIÇÃO DE PARAFINA EM DUTOS DE PRODUÇÃO E TRANSPORTE DE PETRÓLEO UTILIZANDO SENSOR MULTIPONTOS DE TEMPERATURA (SMpT)**. 2017.

Disponível em:

<https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/22940/1/22.%20Disserta%c3%a7%c3%a3o%20-%20Lorena%20Leal%20de%20Oliveira%20Soares.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2021.

SOUZA G. M., Monitoramento de Máquinas, Nova Manutenção Y Qualidade, ano 9, n. 42, 2002. SOUZA F. A. S., Monitoramento on-line Variáveis e Diagnósticos à Distância – Telediagnósticos, in VII Congresso de Manutenção – SEMAPI, Campinas, São Paulo, outubro de 2002.

SOUZA, Mariani Oliveira de. **CLASSIFICAÇÃO INTELIGENTE DE FALHAS DE ROLAMENTO EM MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS UTILIZANDO A TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER E A ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS**. Disponível em:

http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/7178/1/CP_COELT_2018_1_05%20.pdf. Acesso em: 11 nov. 2021.

SOUZA, Sara Maria de Souza Vale e. **PROJETO DE CALIBRAÇÃO DE CÉLULA DE CARGA PARA APLICAÇÃO EM DINAMÔMETRO HIDRÁULICO COM MEDIÇÃO DE CURVA DE TORQUE E POTÊNCIA EM MOTOR OTTO**. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10011526.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2021.

THOMSEN, Adilson. **Medidor de corrente não invasivo com Arduino**. 2015. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/blog/medidor-de-corrente-sct013-com-arduino/>. Acesso em: 06 jun. 2021.

UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas**: de Fitzgerald e Kingsley. 7 ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

WEG. **Danos em Enrolamentos**. 2019. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h0b/hbf/WEG-danos-em-enrolamentos-motores-trifasicos-50009255-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2021.

WEG. **GUIA DE ESPECIFICAÇÃO**: motores elétricos. MOTORES ELÉTRICOS. 2021. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2021.

WEG. **Motores Elétricos**. 2005. Disponível em: https://www.hd.ind.br/PDF/manual_TECNICO-motores.pdf. Acesso em: 07 jun. 2021.

WOJCIK, Waldemar *et al.* **Developing the System of Collecting, Storing and Processing Information from Solar Collectors**. 2020. Disponível em: <http://ijet.pl/index.php/ijet/article/view/10.24425-ijet.2021.135945/779>. Acesso em: 06 jun. 2021.

YUAN, Michael. **Conhecendo o MQTT**: por que o mqtt é um dos melhores protocolos de rede para a internet das coisas?. Por que o MQTT é um dos melhores protocolos de rede para a Internet das Coisas?. Disponível em: <https://developer.ibm.com/br/articles/iot-mqtt-why-good-for-iot/>. Acesso em: 27 nov. 2021.

APÊNDICE A – CÓDIGO PARA AQUISIÇÃO DE CORRENTE E TEMPERATURA ATRAVÉS DO MICROCONTROLADOR ESP-WROOM-32

// Programação para medição de corrente elétrica trifásica e temperatura e envio das informações para o banco de dados

// Trabalho de conclusão de curso do curso Bacharelado de Engenharia Elétrica.

// IFTO - Campus Palmas

// Alunos: Dónovan Pereira Jacobina e Matheus Ávila Mota

// Orientador: Me. Kaison Teodoro de Souza

// Importação das bibliotecas necessárias

```
#include <Arduino.h>
```

```
#include <analogWrite.h>
```

```
#include "WiFi.h"
```

```
#include "PubSubClient.h"
```

```
#include <Adafruit_MAX31865.h>
```

// Variáveis relacionadas a configuração do ESP

```
#define pino32 32 // Medição da fase a
```

```
#define pino35 35 // Medição da fase b
```

```
#define pino34 34 // Medição da fase c
```

```
#define Resistor 1000 // Resistor de carga de 1000 [Ohms]
```

```
#define NumEspiras 2000 // Total de espiras do secundário dos sensores de corrente
```

```
#define NumAmostras 6000 // Amostras Utilizadas para a média quadrática
```

```
#define Casas_Decimais 2 // Total de números após a vírgula
```

```
#define mqttTopicoBaseReceptorMedicao "medicao/Comando" // Tópico para receber comandos no ESP
```

```
#define mqttTopicoBaseEmissorMedicao "medicao/Emissor" // Tópico para enviar comandos do ESP
```

```
Adafruit_MAX31865 thermo = Adafruit_MAX31865(5, 19, 23, 18); // Pinos de
```

configuração para o módulo sensor MAX31865 no ESP. (CS: 5, DI: 19, DO: 23, CLK: 18)

// Variáveis relacionadas a configuração do sensor de Temperatura

#define RREF 430.0 // Valor do resistor
de Referência para o PT100.

#define RNOMINAL 100.0 // Resistência
nominal a 100 graus celsius

// Instância os objetos para conexão Wifi

WiFiClient espClient;

PubSubClient client(espClient);

// Informações da Rede e broker a se conectar

const char* nomeRedeWiFiLocal = ""; // Colocar nome da rede Wi-Fi

const char* senhaRedeWiFiLocal = ""; // Colocar a senha da rede Wi-Fi

const char* ip4RedeConectadoMQTT = "192.168.43.183";

const int portaNumeroMQTT = 1883;

const char* identificaSessaoMQTT = "ClienteESP32"; // Variáveis para o envio de
dados dos sensores

int comandoSensores = 0;

char msgt[25];

char msgi_1[25];

char msgi_2[25];

char msgi_3[25];

// Variáveis dos sensores de Corrente e Temperatura

double Tensao_Lida32, Tensao_Ef32;

double Tensao_Lida35, Tensao_Ef35;

double Tensao_Lida34, Tensao_Ef34;

double CorrenteNoRes32, CorrenteNoRes35, CorrenteNoRes34;

double CorrentePrim_32, CorrentePrim_34, CorrentePrim_35;

double Deslocamento32, Deslocamento34, Deslocamento35;

```

double Temperatura;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  // Inicializa o deslocamento inicial baseado na primeira medição dos sensores de
  Correntes
  Media_Quadratica(pino32, pino34, pino35, NumAmostras);
  Deslocamento32 = Tensao_Lida32;
  Deslocamento34 = Tensao_Lida34;
  Deslocamento35 = Tensao_Lida35;

  // Configuração do sensor de corrente para 3 fios
  thermo.begin(MAX31865_3WIRE);
  ConfigurarWifi();
  client.setCallback(RespostaBroker);
}

void loop() {
  if (!client.connected()){
    ReconectarBroker();
  }
  else{
    CalcularTeCo();
    MostrarValores();
    EnviarParaBroker();
  }
  client.loop();
}

void CalcularTeCo(){

// MÉTODOS DE CAPTURA DE DADOS
// Cálculo para a tensão RMS
Media_Quadratica(pino32, pino34, pino35, NumAmostras);

```

```

// Ler(pino32, pino35, pino34);
// Obtenção da tensão Eficaz
Tensao_Ef32 = Tensao_Lida32;
Tensao_Ef35 = Tensao_Lida35;
Tensao_Ef34 = Tensao_Lida34;

// Correntes Originais Secundárias Divisor de Tensão
CorrenteNoRes32 = (Tensao_Ef32 - Deslocamento32)/Resistor;
CorrenteNoRes34 = (Tensao_Ef34 - Deslocamento34)/Resistor;
CorrenteNoRes35 = (Tensao_Ef35 - Deslocamento35)/Resistor;

// Correntes Primárias Corrigidas
CorrentePrim_32 =
Eq_Fator4(CorrenteNoRes32*NumEspiras)*CorrenteNoRes32*NumEspiras;
CorrentePrim_34 =
Eq_Fator4(CorrenteNoRes34*NumEspiras)*CorrenteNoRes34*NumEspiras;
CorrentePrim_35 =
Eq_Fator4(CorrenteNoRes35*NumEspiras)*CorrenteNoRes35*NumEspiras;

// Temperatura Calculada
Temperatura = thermo.temperature(RNOMINAL, RREF);
}
double mapf(double valor, double DeMenor, double DeMaior, double
ParaMenor, double ParaMaior ){
return
-(((DeMaior-valor)*(ParaMaior-ParaMenor)/(DeMaior-DeMenor))-ParaMa
ior);
}
void MostrarValores(){
if(comandoSensores == 1){

// Tensões Lidas
Serial.print("Pino32(V):");

```

```

Serial.print(Tensao_Lida32, Casas_Decimal);
Serial.print(" Pino34(V):");
Serial.print(Tensao_Lida34, Casas_Decimal);
Serial.print(" Pino35(V):");
Serial.print(Tensao_Lida35, Casas_Decimal);

```

```
// Correntes Corrigidas
```

```

Serial.print(" IPri_Corr._32(A):");
Serial.print(CorrentePrim_32);
Serial.print(" IPri_Corr._34(A):");
Serial.print(CorrentePrim_34);
Serial.print(" IPri_Corr._35(A):");
Serial.print(CorrentePrim_35);

```

```
// Temperatura MAX31865_RTD_PT100
```

```

Serial.print(" Temperatura:");
Serial.print(Temperatura);
Serial.println("");
}
}

```

```
// Função de leitura dos pinos conectados aos resistores de carga dos sensores de correntes
```

```

void Ler(int pino1, int pino2, int pino3){
Tensao_Lida32 = mapf(analogRead(pino1), 0, 4095, 0, 3.3);
Tensao_Lida35 = mapf(analogRead(pino2), 0, 4095, 0, 3.3);
Tensao_Lida34 = mapf(analogRead(pino3), 0, 4095, 0, 3.3);
}

```

```
// Função de cálculo da tensão RMS.
```

```

void Media_Quadratica(int pino1, int pino2, int pino3, int
Num_Amostras){
double soma1 = 0, soma2 = 0, soma3 = 0, media1, media2, media3;

```

```

for(int i=0; i<Num_Amostras; i++){
soma1 += pow(analogRead(pino1), 2);
soma2 += pow(analogRead(pino2), 2);
soma3 += pow(analogRead(pino3), 2);
}
media1 = sqrt(soma1/Num_Amostras);
media2 = sqrt(soma2/Num_Amostras);
media3 = sqrt(soma3/Num_Amostras);
Tensao_Lida32 = mapf(media1, 0, 4095, 0, 3.3);
Tensao_Lida35 = mapf(media2, 0, 4095, 0, 3.3);
Tensao_Lida34 = mapf(media3, 0, 4095, 0, 3.3);
}

```

// Função de cálculo do fator para correção dos valores do
sensores de corrente

```

double Eq_Fator4(double x) {
return 8.5908870100946932e-001
+ 9.0308860093248802e+002 * x
+ -2.3099499706977214e+004 * x * x
+ 2.6311474504895235e+005 * x * x * x
+ -1.6410616946542610e+006 * x * x * x * x
+ 6.0092800371787483e+006 * x * x * x * x * x
+ -1.2780081196424438e+007 * x * x * x * x * x * x
+ 1.3080185715033673e+007 * x * x * x * x * x * x * x
+ 2.9419370271813795e+006 * x * x * x * x * x * x * x * x
+ -2.3127052436965302e+007 * x * x * x * x * x * x * x * x * x
+ 1.8417478062034659e+007 * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x
+ 1.1394759197600083e+007 * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x
+ -3.1077389318096351e+007 * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x
+ 2.3846603688130863e+007 * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x
+ -8.4903095154411178e+006 * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x
+ 1.1847341234438897e+006 * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x;
}

```

```
}

```

```
// FUNÇÃO PARA CONEXÃO COM O BROKER MQTT

```

```
void ReconectarBroker() {
client.setServer(ip4RedeConectadoMQTT,portaNumeroMQTT);
while (client.connected() == false)
{
Serial.println("Conectando ao BROKER MQTT...");
if (client.connect(identificaSessaoMQTT)){
Serial.println("Conectado ao BROKER!");
if(client.subscribe(mqttTopicoBaseReceptorMedicao))
Serial.println("Inscrição da Temperatura Ok.");
else
Serial.println("Inscrição da Temperatura falha!");
if(client.subscribe(mqttTopicoBaseReceptorMedicao))
Serial.println("Inscrição da Corrente I1 Ok.");
else
Serial.println("Inscrição da Corrente I1 falha!");
if(client.subscribe(mqttTopicoBaseReceptorMedicao))
Serial.println("Inscrição da Corrente I2 Ok.");
else
Serial.println("Inscrição da Corrente I2 falha!");
if(client.subscribe(mqttTopicoBaseReceptorMedicao))
Serial.println("Inscrição da Corrente I3 Ok.");
else
Serial.println("Inscrição da Corrente I3 falha!");
}
else{
Serial.println("Conexão com o BROKER falhou!!!");
}
}
}
}
```

```
//FUNÇÃO PARA A CONEXÃO NO WIFI
```

```
void ConfigurarWifi() {
  WiFi.begin(nomeRedeWiFiLocal, senhaRedeWiFiLocal);
  Serial.print("Conectando-se na rede: ");
  Serial.print(nomeRedeWiFiLocal);
  Serial.println();
  Serial.print("Aguarde! ");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED){
    delay(100);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println();
  Serial.print("Conectado com sucesso na rede: ");
  Serial.println(nomeRedeWiFiLocal);
  Serial.print("IP obtido: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
  Serial.println();
}
```

```
// Função de envio de dados para o broker local
```

```
void EnviarParaBroker(){
  if(comandoSensores == 1){
    String Grandezas;
    Grandezas = (String)Temperatura + "/" +
    (String)CorrentePrim_32 + "/" + (String)CorrentePrim_34 + "/" +
    (String)CorrentePrim_35;
    Grandezas.toCharArray(msgt, 25);
    client.publish(mqttTopicoBaseEmissorMedicao , msgt);
  }
}
```

```
//RECEBIMENTO, IMPRESSÃO DO TÓPICO E RECUPERAÇÃO CARACTER POR
CARACTER
```

```
void RespostaBroker(char* topic, byte* payload, unsigned int
length){
String msg;
String msgLigaMedicao = "Liga";
String msgDesligaMedicao = "Desliga";
for (int i = 0; i < length; i++){
char c = (char)payload[i];
msg += c;
}
if(msgLigaMedicao.equals(msg)){
Serial.println("Comando 'Ligar' recebido!");
comandoSensores = 1;
}
if(msgDesligaMedicao.equals(msg)){
Serial.println("Comando 'Desligar' recebido!");
comandoSensores = 0;
}
Serial.print("[MQTT] Mensagem recebida: ");
Serial.println(msg);
}
```

APÊNDICE B – PROJETO DE HARDWARE DO PROTÓTIPO “TECO”.

MICROCONTROLADOR

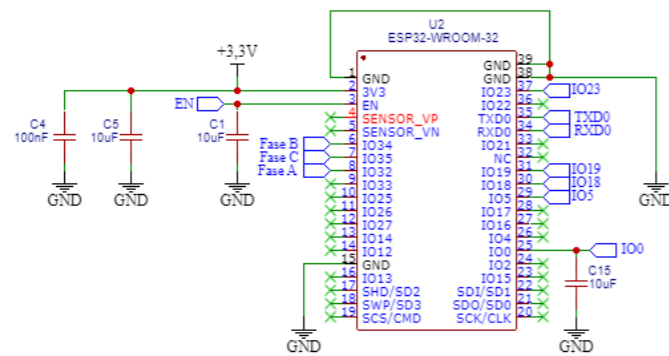
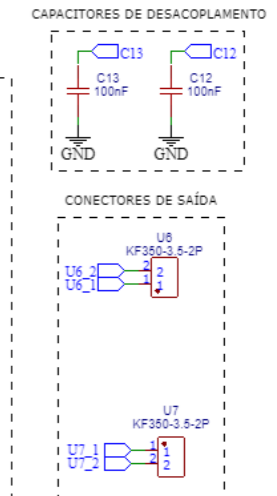
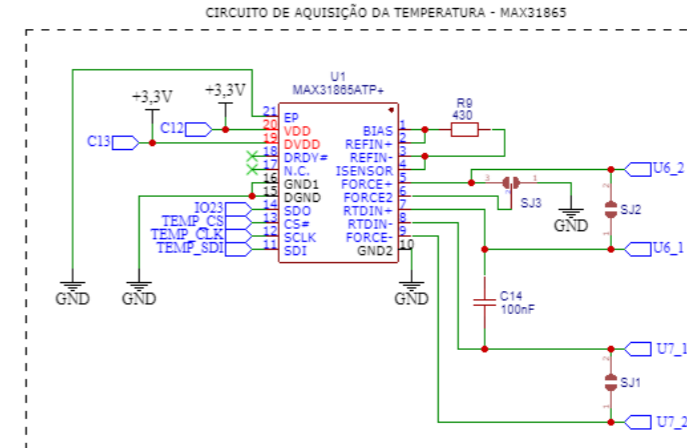
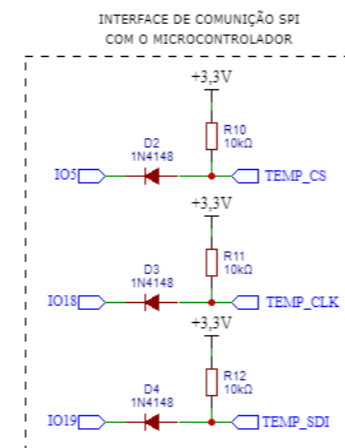


TABELA DE ATRIBUIÇÃO DE PINOS	
EN	PINO ENABLE/RESET DO ESP
IO0	PINO BOOT/PROGRAMAR DO ESP
RXD0	RX0 - RECEPTOR - (UART)
TXD0	TX0 - TRANSMISSOR - (UART)
Fase A	Sensor de Corrente - Fase A
Fase B	Sensor de Corrente - Fase B
Fase C	Sensor de Corrente - Fase C
IO5	Slave Select - (SPI)
IO18	Serial Clock - (SPI)
IO19	Master Input Slave Output - (SPI)
IO23	Master Output Slave Input - (SPI)

SENSOR DE TEMPERATURA



GRAVAÇÃO DO ESP-WROOM-32

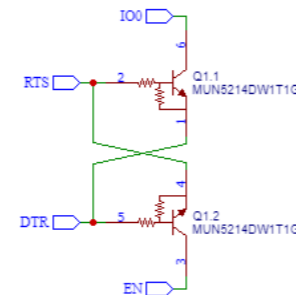
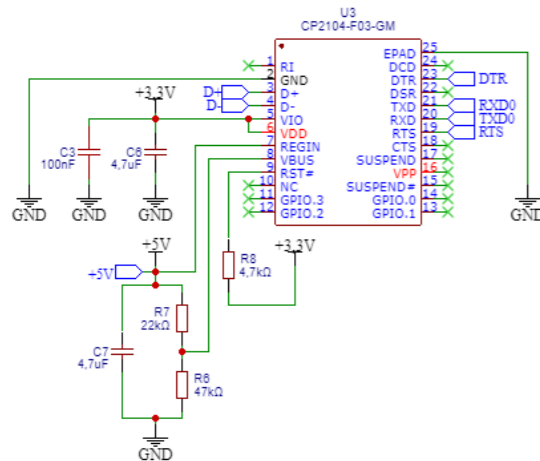
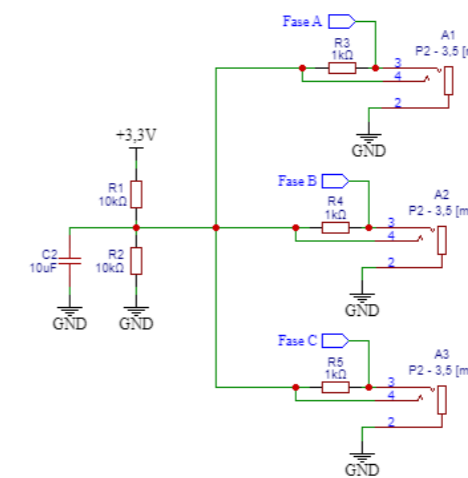
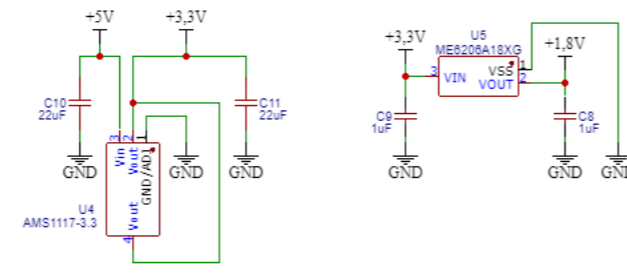
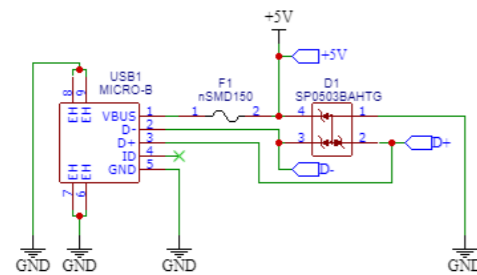


TABELA DE NÍVEL LÓGICO DE GRAVAÇÃO			
DTR	RTS	EN	IO0
0	0	1	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	1	1

SENSOR DE CORRENTE



ALIMENTAÇÃO DO DISPOSITIVO



TITLE: Esquemático - Projeto de Hardware do protótipo "TECO"		REV: 1.0
Company: IFTO - Campus Palmas		Sheet: 1/1
Date: 2021-11-28	Drawn By: Matheus Ávila Mota	