

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**BRUNO MANOEL LINARES**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA MONITORAMENTO DE  
PARÂMETROS OPERACIONAIS DE MOTORES DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICOS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LONDRINA**

**2021**

**BRUNO MANOEL LINARES**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA MONITORAMENTO DE  
PARÂMETROS OPERACIONAIS DE MOTORES DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Roger Nabeyama Michels

Co-orientador: Prof. Dr. Janksyn Bertozzi

**LONDRINA**

**2021**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Ponta Grossa

Nome da Diretoria  
Nome da Coordenação  
Nome do Curso



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA MONITORAMENTO DE PARÂMETROS OPERACIONAIS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

por

**BRUNO MANOEL LINARES**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 17 de agosto de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Roger Nabeyama Michels  
Professor Orientador

---

Prof. Dr. Amadeu Lombardi Neto  
Membro titular

---

Prof. Dr. Haroldo Lhou Hasegawa  
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

Dedico este trabalho à minha família pelo suporte durante toda a minha graduação.

“Life is a journey, not a destination”  
(Ralph Waldo Emerson)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Roger Nabeyama Michels, por toda a assistência, disponibilidade e contribuições realizadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Janksyn Bertozzi por toda a dedicação e auxílio ao longo da execução e desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, que me acompanhou durante o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos, pelo convívio e suporte diário durante o período da graduação.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica pela contribuição na minha formação.

E a todos que direta ou indiretamente me ajudaram ao longo da vida.

## RESUMO

LINARES, Bruno Manoel. **Desenvolvimento de um sistema para monitoramento de parâmetros operacionais de motores de indução trifásicos**. 2021. 79 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2021.

Em ambientes industriais o monitoramento dos parâmetros operacionais, tais como temperatura, corrente de alimentação, potência e vibração, de máquinas e equipamentos permite o melhor gerenciamento desses recursos, resultando no aumento da confiabilidade e na otimização dos processos produtivos em que esses estão inseridos. O presente trabalho, propõe o desenvolvimento de um *Data Logger* de baixo custo para o monitoramento da temperatura da carcaça e da corrente consumida por motores de indução trifásicos, que são equipamentos amplamente empregados em ambientes industriais, por conta de sua construção simplificada e alta versatilidade. Para isso, de modo geral, utilizou-se uma placa Arduino Pro Mini, uma placa de circuito integrado, sensores de corrente SCT013 e termistores NTC 3950. A partir dos dados coletados, foram desenvolvidas análises utilizando como ferramenta a estatística descritiva, a fim de validar a funcionalidade e a eficiência do sistema proposto. O sistema obteve conjunto de dados simétricos, precisos e com uma baixa dispersão, demonstrando que a medição e o armazenamento dos valores de corrente e temperatura tiveram resultados satisfatório. Porém novos protótipos devem ser desenvolvidos, a fim de otimizar o layout do sistema, buscar soluções para a transmissão via rádio frequência e implementar uma coleta de parâmetros de vibração.

**Palavras-chave:** Supervisão de equipamentos elétricos. Placa de circuito integrado. Prototipagem eletrônica.

## ABSTRACT

LINARES, Bruno Manoel. **Development of a system for monitoring operating parameters of three-phase induction motors**. 2021. 79 pages. Final Work for a Bachelor's Degree Course in Mechanical Engineering - Federal Technology University - Parana. Londrina, 2021.

In industrial environments, the monitoring of operating parameters, such as temperature, supply current, power and vibration, of machines and equipments allows for better management of these resources, resulting in increased reliability and optimization of the production processes in which they are inserted. The present work proposes the development of a low-cost Data Logger for monitoring the temperature of the frame and the current consumed by three-phase induction motors, which are equipments widely used in industrial environments, due to its simplified construction and high versatility. For this, in general, an Arduino Pro Mini board, a printed circuit board, SCT013 current sensors and NTC 3950 thermistors were used. From the collected data, analyzes were developed using descriptive statistics as a tool, in order to validate the functionality and efficiency of the proposed system. The system obtained a set of symmetrical, accurate and low dispersion data, demonstrating that the measurement and storage of current and temperature values had satisfactory results. However, new prototypes must be developed in order to optimize the system layout, seek solutions for radio frequency transmission and implement a collection of vibration parameters.

**Keywords:** Supervision of electrical equipment. Printed circuit board. Electronic prototyping.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Organograma das filosofias de manutenção .....	12
Figura 2 – Representação simplificada de um motor de indução trifásico .....	17
Figura 3 – Representação de uma vista explodida de um motor de indução trifásico .....	19
Figura 4 – Representação do campo magnético rotativo de um sistema trifásico.....	20
Figura 5 – Ilustração de um rotor em gaiola de esquilo.....	21
Figura 6 – Ilustração de um rotor bobinado.....	21
Figura 7 – Ilustração de um estator.....	24
Figura 8 – Ilustração de tipos de curto circuito nos enrolamentos do estator.....	25
Figura 9 – Representação da diferença entre os centros de rotação do estator e do rotor.....	26
Figura 10 – Ilustração de um microcontrolador Arduino Uno .....	28
Figura 11 – Representação da conexão em uma placa de prototipagem .....	29
Figura 12 – Representação dos tipos de sinais.....	30
Figura 13 – Ilustração de uma plataforma Arduino Pro Mini .....	35
Figura 14 – Ilustração de um sensor de temperatura NTC 3950.....	36
Figura 15 – Ilustração do revestimento de vidro de um sensor NTC 3950.....	37
Figura 16 – Ilustração do sensor de corrente SCT013-100 e do seu núcleo .....	38
Figura 17 – Layout PCI .....	40
Figura 18 – Invólucro de proteção.....	42
Figura 19 – Ilustração do medidor de temperatura STH77365 .....	42
Figura 20 – Ilustração do medidor de corrente ET-3111 .....	43
Figura 21 – Sistema de aquisição .....	44
Figura 22 – Motor Eberle S80 1 CV .....	46
Figura 23 – Motor Weg 100L 5 CV.....	46
Gráfico 1 – Média das falhas de componentes de motores de indução .....	23
Gráfico 2 – Gráfico de Boxplot da Corrente 1 – Motor Eberle .....	49
Gráfico 3 – Gráfico de Boxplot da Corrente 2 – Motor Eberle .....	49
Gráfico 4 – Gráfico de Boxplot da Corrente 3 – Motor Eberle .....	50
Gráfico 5 – Gráfico de Boxplot da Corrente 1 – Motor Weg .....	52
Gráfico 6 – Gráfico de Boxplot da Corrente 2 – Motor Weg .....	53
Gráfico 7 – Gráfico de Boxplot da Corrente 3 – Motor Weg .....	53
Gráfico 8 – Gráfico de Boxplot da Temperatura 1 – Motor Eberle.....	56
Gráfico 9 – Gráfico de Boxplot da Temperatura 2 – Motor Eberle.....	56



Gráfico 10 – Gráfico de Boxplot da Temperatura 3 – Motor Eberle.....	57
Gráfico 11 – Gráfico de Boxplot da Temperatura 1 – Motor Weg.....	60
Gráfico 12 – Gráfico de Boxplot da Temperatura 2 – Motor Weg.....	60
Gráfico 13 – Gráfico de Boxplot da Temperatura 3 – Motor Weg.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Porcentagem de falhas nos componentes dos motores de indução .....	22
Tabela 2 – Análise estatística dos dados da corrente 1 – Motor Eberle.....	48
Tabela 3 – Análise estatística dos dados da corrente 2 – Motor Eberle.....	48
Tabela 4 – Análise estatística dos dados da corrente 3 – Motor Eberle.....	48
Tabela 5 – Erro relativo dos dados de corrente média – Motor Eberle .....	51
Tabela 6 – Análise estatística dos dados da corrente 1 – Motor Weg.....	51
Tabela 7 – Análise estatística dos dados da corrente 2 – Motor Weg.....	51
Tabela 8 – Análise estatística dos dados da corrente 3 – Motor Weg.....	51
Tabela 9 – Erro relativo dos dados de corrente média – Motor Weg .....	54
Tabela 10 – Análise estatística dos dados da temperatura 1 – Motor Eberle .....	55
Tabela 11 – Análise estatística dos dados da temperatura 2 – Motor Eberle .....	55
Tabela 12 – Análise estatística dos dados da temperatura 3 – Motor Eberle .....	55
Tabela 13 – Erro relativo dos dados de temperatura média – Motor Eberle .....	58
Tabela 14 – Análise estatística dos dados da temperatura 1 – Motor Weg .....	59
Tabela 15 – Análise estatística dos dados da temperatura 2 – Motor Weg .....	59
Tabela 16 – Análise estatística dos dados da temperatura 3 – Motor Weg .....	59
Tabela 17 – Erro relativo dos dados de temperatura média – Motor Weg .....	62
Tabela 18 – Custo de implementação do sistema.....	63

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
1.1 OBJETIVOS .....	9
1.1.1 Objetivo Geral .....	9
1.1.2 Objetivos Específicos .....	9
1.2 JUSTIFICATIVA .....	10
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	10
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>11</b>
2.1 MANUTENÇÃO INDUSTRIAL .....	11
2.1.1 Definição e Histórico .....	11
2.1.2 Tipos de Manutenção .....	12
2.2 MOTORES ELÉTRICOS .....	16
2.2.1 Máquinas Elétricas Rotativas .....	16
2.2.2 Motores de Indução Trifásicos .....	19
2.2.3 Falhas nos Motores de Indução .....	22
2.3 PROTOTIPAGEM ELETRÔNICA .....	26
2.3.1 Definição .....	27
2.3.2 Principais Elementos .....	27
2.3.3 Sensores de Temperatura .....	31
2.3.4 Sensores de Corrente .....	32
2.3.5 Condicionamento de sinais .....	33
2.3.6 Prototipagem na manutenção preditiva .....	33
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
3.1 COMPONENTES E EQUIPAMENTOS .....	35
3.1.1 Plataforma de prototipagem eletrônica .....	35
3.1.2 Sensores de Temperatura .....	36
3.1.3 Sensores de Corrente .....	38
3.1.4 Placa de Circuito Impresso .....	39
3.1.5 Componentes suplementares .....	40
3.1.6 Equipamentos de medição .....	42
3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	43
3.2.1 Calibração dos sensores .....	44
3.2.2 Aquisição dos valores de temperatura .....	45
3.2.3 Aquisição dos valores de corrente .....	45
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>47</b>
4.1 PARÂMETROS DE OPERAÇÃO .....	47
4.1.1 Corrente de alimentação .....	47
4.1.2 Temperatura .....	54
4.2 CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO .....	62

<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>
<b>APÊNDICE A - Digrama Elétrico da Placa de Circuito Impresso .....</b>	<b>70</b>
<b>APÊNDICE B - Digrama Elétrico do Sistema de Monitoramento .....</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICE C - Código do Sistema de Monitoramento.....</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento industrial promoveu transformações profundas nos ambientes econômicos, sociais e fabris, criando novas ideias e conceitos que impactaram não só os processos de produção, mas também todas as diversas áreas que apoiam diretamente ou indiretamente os setores industriais, tais como a Manufatura, a Logística, a Manutenção, a Segurança, a Qualidade, a Comunicação, a Gestão de Pessoas, entre outras.

Dentre estas, pode-se ressaltar a área de Manutenção, que passou por diversos aperfeiçoamentos e atingiu um elevado nível de desenvolvimento, que permitiu com que esta fosse considerada atualmente uma peça chave para o crescimento das organizações, já que ela é uma ferramenta capaz de promover o aumento da produtividade, a redução dos custos de operação e o desenvolvimento de processos mais eficientes.

Através da evolução dos conhecimentos relacionados às áreas de mecânica, de eletroeletrônica e de automação, as máquinas e equipamentos desenvolveram-se de maneira considerável, tornando-se complexas e altamente especializadas. Associado a este fenômeno, os motores de indução trifásicos passaram a ser utilizados em larga escala na indústria, gerando uma grande dependência em relação à disponibilidade e confiabilidade destes equipamentos.

Neste cenário, surge a necessidade de uma estratégia de manutenção que visa avaliar as condições destes equipamentos buscando evitar problemas nas linhas de produção. Assim, a manutenção preditiva é a metodologia ideal para esta aplicação, já que ela justamente busca monitorar o desempenho de máquinas e equipamentos, através de uma aquisição sistemática de dados, a fim de premeditar a ocorrência de falhas.

Porém, para realizar a implementação de uma manutenção preditiva em motores de indução trifásicos é necessário possuir um conhecimento técnico em eletrônica e programação, e adquirir componentes, principalmente sensores, para a elaboração do sistema de coleta de dados. Essas demandas tornam a implementação da manutenção preditiva um processo custoso e difícil para as empresas, principalmente as de pequeno e médio porte.

Uma alternativa para superar essas dificuldades e tornar viável um projeto de monitoramento de dados é a utilização de um recurso denominado prototipagem

eletrônica. Essa ferramenta é muito empregada em pesquisas científicas e em ambientes de aprendizagem, permitindo a criação de circuitos e a integração de sensores através de *protoboards* e plataformas de prototipagem eletrônica, sendo que a mais conhecida é a plataforma Arduino.

Baseando-se nesses fatos iniciais, este trabalho buscou realizar o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de dados operativos, tais como temperatura, corrente de alimentação e potência, de um motor de indução trifásico. Para isso será empregado uma plataforma de prototipagem eletrônica, sensores de corrente elétrica e sensores de temperatura.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Propor um sistema de monitoramento e armazenamento dos parâmetros de operação: temperatura, corrente de alimentação e potência de um motor elétrico de indução trifásico, utilizando tecnologias de *hardware e software open source*, empregando a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Modelar o diagrama esquemático, elaborar o layout e confeccionar, através do processo de mascaramento, a placa de tratamento analógico dos dados obtidos a partir dos sensores de corrente e temperatura;
- Desenvolver o software de gerenciamento do sistema de aquisição utilizando a linguagem de programação C++;
- Implementar e validar o funcionamento do sistema de monitoramento e aquisição através de sua aplicação em motores sob condições de operação;

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Apoiando-se nos objetivos gerais e específicos, pode-se reiterar que os motores elétricos são componentes fundamentais em diversos processos produtivos. Porém, por conta da grande aplicabilidade e diversidade desses equipamentos, o setor de manutenção necessita adotar um planejamento de manutenção efetivo para conseguir garantir o desempenho e confiabilidade dos equipamentos junto aos processos.

Para assegurar que o planejamento de manutenção atinja seus objetivos, é necessário que os responsáveis pela gestão da manutenção adotem estratégias e decisões baseando-se em diagnósticos e análises realizadas sobre dados reais e contínuos dos equipamentos. Portanto, a manutenção preditiva torna-se uma ferramenta estratégica e fundamental para garantir a efetividade das atividades de manutenção.

Assim, o sistema proposto por este trabalho teve como propósito detectar e verificar desvios ou anomalias que podem acometer os motores elétricos de indução trifásicos quando estes estão em operação, buscando fornecer dados e indicadores que possibilitem que o setor de manutenção possa tornar o processo de gerenciamento de máquinas e equipamentos mais eficaz.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente relatório está estruturado em cinco capítulos, sendo que o capítulo inicial aborda a introdução, os objetivos e a justificativa para o desenvolvimento do trabalho. O Capítulo 2 aborda o referencial teórico, expondo de maneira geral os temas que foram utilizados neste trabalho, contendo, respectivamente, sobre a manutenção industrial, a manutenção em motores elétricos e a prototipagem eletrônica.

O Capítulo 3 aborda a metodologia, expondo de forma detalhada os procedimentos e equipamentos que foram empregados para o desenvolvimento do sistema. O Capítulo 4 aborda os resultados e as discussões, expondo os dados e as análises obtidas do procedimento experimental e por fim o Capítulo 5 aborda a conclusão, expondo as considerações finais e as propostas de trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica empregada para o desenvolvimento do trabalho. O objetivo é expor ao leitor os conceitos inerentes à manutenção industrial, à manutenção em motores elétricos e à prototipagem eletrônica.

### 2.1 MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

As próximas seções abordam e fazem uma reflexão dos aspectos gerais relacionados com a manutenção industrial, discorrendo sobre dados históricos, as suas diferentes definições e a apresentação de suas subcategorias.

#### 2.1.1 Definição e Histórico

A manutenção em sua forma mais simples, relacionada com a preservação de ferramentas e objetos que são empregados nas atividades de ofício, estendendo-se a algumas limitadas ações de reparos, manifesta-se desde os sumérios, que são os povos que habitavam a região da Mesopotâmia e são considerados os mais antigos da História.

Porém, a manutenção apenas começou a se consolidar como um instrumento extremamente necessário para a preservação das atividades industriais com o desenvolvimento das máquinas a vapor, que foram as responsáveis por impulsionar a 1ª Revolução Industrial (1760-1850), a qual promoveu mudanças profundas no ambiente produtivo (POÓR; ŽENÍŠEK; BASL, 2019).

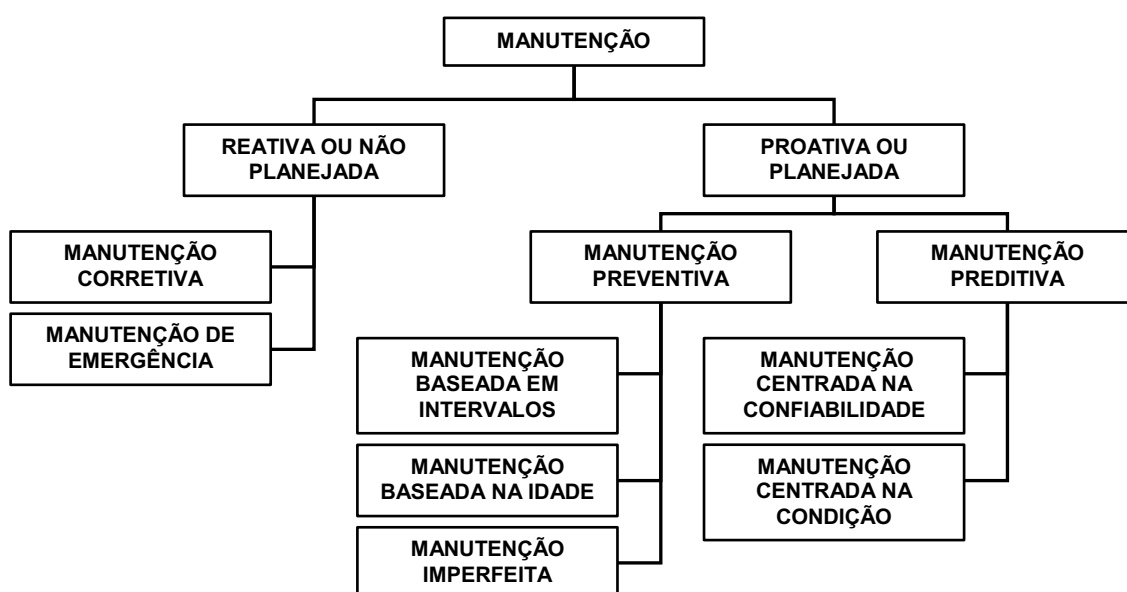
Segundo Slack et al. (2008) e as normativas da ABNT (1994), a manutenção pode ser simplesmente definida como um esforço para evitar a ocorrência de falhas, visando garantir a integridade de instalações e equipamentos. Fundamentalmente, a manutenção é descrita como um conjunto de atividades administrativas, técnicas e de supervisão, que são empregadas com o intuito de assegurar o estado de funcionamento de um dado equipamento.

Portanto, tendo como base as definições supracitadas, este trabalho considerou que a manutenção é uma ferramenta que envolve a união de ações de



caráter técnico, administrativo e gerencial, sendo empregada na restauração ou conservação da condição de um ativo, visando garantir a sua capacidade em fornecer um produto ou serviço.

Segundo Kothamasu, Huang e Verduin (2009), ao empregar uma visão cronológica da evolução da manutenção, é possível identificar e organizar, resumidamente, as suas principais filosofias. Essa abordagem permite gerar um organograma, que é apresentado na Figura 1, onde as filosofias de manutenção são divididas entre dois grandes grupos, de caráter reativo e caráter proativo.



**Figura 1 – Organograma das filosofias de manutenção**  
 Fonte: Kothamasu, Huang e Verduin (2009)

Em cinco décadas, as atividades relacionadas à manutenção apresentavam um caráter reativo, aplicando intervenções de maneira não programada e reparos corretivos de grande impacto. Porém, após a década de 50, a manutenção começou a sofrer sucessivas alterações, buscando atingir um nível de desenvolvimento que estivesse alinhado com a sustentabilidade e com a geração de valor (LIMA; SANTOS; SAMPAIO, 2010).

### 2.1.2 Tipos de Manutenção

Primeiramente, ao adotar uma falha como um ponto central de análise, é possível distinguir as duas classificações atribuídas às filosofias de manutenção.

Enquanto para a filosofia de manutenção reativa ou não planejada, as ações são realizadas após a ocorrência de uma falha, para a filosofia de manutenção proativa ou planejada, as ações são realizadas antes da ocorrência de uma falha.

Desta forma, a aplicação da manutenção reativa apresenta-se anterior ao surgimento da própria manutenção proativa, já que no início do desenvolvimento da manutenção, não havia um entendimento acerca da possibilidade de empregar ações de restauração ou conservação, antes que os equipamentos apresentassem falhas, quebras ou paradas.

A manutenção não planejada é uma solução ideal para unidades produtivas que apresentam uma quantidade pequena de equipamentos ou onde a confiabilidade das máquinas não possui grande impacto nos processos. Além disso, mesmo em um ambiente com uma gestão da manutenção bem estruturada, ela ainda é empregada quando surgem situações adversas.

Tendo como base a Figura 1, observa-se que a filosofia de manutenção reativa apresenta duas categorias, a manutenção corretiva e a manutenção emergencial. Apesar de ambas serem definidas como atividades realizadas após a ocorrência de uma falha, buscando restabelecer a função de um dado equipamento, a manutenção emergencial possui uma ação mais imediata do que a corretiva, já que busca diminuir a periculosidade e os riscos relacionados à falha.

Segundo Ben-Daya et al. (2009), a manutenção emergencial está relacionada com atividades que devem ser atendidas imediatamente, já que de modo natural, na ocorrência de uma emergência, há um tempo de planejamento e resposta muito curto. Portanto, o departamento e as equipes de manutenção devem possuir protocolos claros e bem definidos para lidar com situações que requerem a manutenção emergencial.

Diferentemente da manutenção reativa, a manutenção proativa compreende a determinação e eliminação de modo sistemático de todos os problemas relacionados à manutenibilidade, disponibilidade e confiabilidade. Essa filosofia emprega ferramentas, técnicas e métodos analíticos visando otimizar a disponibilidade dos equipamentos através de uma análise que antecede a ocorrência de falhas (HANSEN, 2002).

Assim, a manutenção planejada é uma solução utilizada principalmente em unidades produtivas que apresentam uma grande quantidade de equipamentos, sobretudo, quando há uma elevada diversificação entre eles. Além disso, ao se

antecipar às falhas, essa filosofia oferece uma maior confiabilidade das máquinas, um controle mais eficiente em relação aos custos e um menor *downtime* (tempo de parada) dos equipamentos.

Apoiando-se novamente no organograma definido por Kothamasu, Huang e Verduin (2009), observa-se que a filosofia de manutenção proativa apresenta uma maior capilaridade quando comparada com a manutenção reativa. Esta característica é justificada, pois além da manutenção proativa possuir as categorias de manutenção preventiva e manutenção preditiva, estas últimas também apresentam suas próprias divisões internas.

Segundo Almeida (2007), ao assumir que um equipamento evolui para uma condição de desgaste ao longo de sua operação, a manutenção preventiva baseia-se na aplicação de reparos e recondiçõamentos, definidos através de ferramentas estatísticas, que buscam antecipar as ações de manutenção e evitar o surgimento de uma falha.

Portanto, a manutenção preventiva é definida como a metodologia que busca a antecipação das atividades de manutenção, visando suprimir ou diminuir a probabilidade da ocorrência de falhas. Essa manutenção é dividida em outras três categorias: manutenção baseada em intervalos, manutenção baseada na idade e manutenção imperfeita, que serão descritas abaixo.

A manutenção baseada em intervalos estabelece que as ações de manutenção preventiva devem ser efetuadas em intervalos fixos pré-definidos e que elas independem de qualquer outra manutenção. Além disso, ressalta-se que a definição dos intervalos deve levar em conta o risco da ocorrência das falhas e o custo relacionado à realização das manutenções.

A manutenção baseada na idade estabelece que as ações de manutenção preventiva devem ser efetuadas em intervalos fixos pré-definidos, porém sendo limitadas ao período em que o equipamento atingir o final de sua vida útil. Assim, os ciclos de manutenção preventiva serão aplicados apenas quando o equipamento atingir uma idade onde ele apresentará um aumento na taxa de falhas.

A manutenção baseada na idade é mais atrativa do que a manutenção baseada em intervalos, pois por possuir a característica de independência, a manutenção baseada em intervalos resulta em desperdícios de tempo e recursos, quando esta é realizada após qualquer outra manutenção (EL-FERIK; BEN-DAYA, 2008).

De acordo com El-Ferik e Ben-Daya (2008), a aplicação da manutenção preventiva tem como finalidade a restauração total da capacidade de um ativo. Porém, quando essa manutenção restabelece apenas uma parte da capacidade deste equipamento, ou seja, atingindo um estado entre a condição de falha e a ideal, a manutenção preventiva passa a ser caracterizada como uma manutenção imperfeita.

Deste modo, a manutenção imperfeita se difere das manutenções apresentadas anteriormente pelo fato de que ela não busca restabelecer a condição padrão de um dado equipamento. Portanto, ela estabelece que as ações de manutenção preventiva devem ser efetuadas com a finalidade de restabelecer as condições de operação de um equipamento, porém não garantindo que estas sejam as ideais ou originais.

Segundo Otani e Machado (2008), a manutenção preditiva baseia-se em uma estrutura de coleta, acompanhamento e análise de dados obtidos de máquina e equipamento, para gerar um histórico do comportamento destes, visando determinar o momento ideal para a realização de reparos e recondiçionamentos, a fim de otimizar as ações de manutenção.

Diferentemente da manutenção preventiva, a manutenção preditiva estabelece uma programação de manutenção mais flexível, tornando-a uma manutenção adaptativa, já que as ações de manutenção são tomadas por meio da análise das informações e parâmetros coletados das máquinas e equipamentos (KOTHAMASU; HUANG; VERDUIN, 2009).

Portanto, a manutenção preditiva é definida como a metodologia que busca antever, através de uma base de dados consistente, a necessidade das atividades de manutenção, visando suprimir ou diminuir a probabilidade da ocorrência de falhas. Esta manutenção é dividida em outras duas categorias, manutenção centrada na confiabilidade (do inglês *Reliability Centred Maintenance*, RCM), e manutenção centrada na condição (do inglês *Condition Based Maintenance*, CBM), que serão descritas abaixo.

A manutenção centrada na confiabilidade é definida como a metodologia que busca estimar a confiabilidade de um equipamento através de um acompanhamento detalhado de suas falhas, quebras ou paradas. Além disso, esta metodologia emprega a utilização de várias ferramentas, a fim de obter um planejamento mais eficaz e econômico das atividades de manutenção.

Dentre as ferramentas empregadas, ressalta-se a análise do impacto dos cronogramas de manutenção sobre a confiabilidade e a análise dos modos de falhas em relação aos seus efeitos. Essa última ferramenta é conhecida como Análise de Modos de Falha e seus Efeitos (do inglês *Failure Mode and Effect Analysis*, FMEA), e emprega uma avaliação lógica, procurando reconhecer os modos de falha de um equipamento, seus efeitos e consequências (KOTHAMASU; HUANG; VERDUIN, 2009).

A manutenção centrada na condição baseia-se no controle e avaliação dos parâmetros de operação de equipamentos e sistemas através de dispositivos específicos, concebidos exclusivamente para essa aplicação, que possibilitam monitorar a deterioração e o desenvolvimento de defeitos recorrentes, além de auxiliar na determinação do melhor momento para efetuar as ações de manutenção (IAEA, 2007).

Portanto, a manutenção centrada na condição é definida como a metodologia que busca obter a condição de um equipamento através do supervisionamento de seus parâmetros operacionais, permitindo a identificação de distúrbios ou alterações em seu funcionamento, que podem acarretar na ocorrência de falhas, quebras ou paradas.

## 2.2 MOTORES ELÉTRICOS

As próximas seções abordam e fazem uma reflexão dos aspectos gerais relacionados aos motores elétricos, discorrendo sobre a origem e as categorias destes equipamentos, as características dos motores de indução trifásicos e as principais falhas que os motores de indução apresentam.

### 2.2.1 Máquinas Elétricas Rotativas

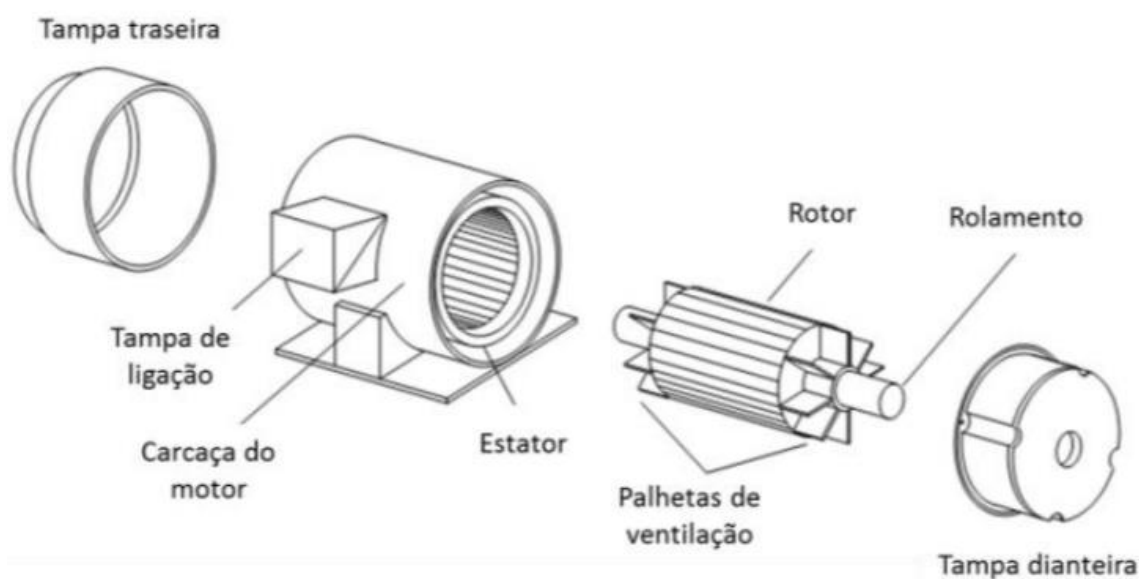
Em 1600, ao publicar um trabalho que retratava a força de atração magnética denominado de *De Magnete*, o cientista William Gilbert deu origem aos estudos científicos que promoveram o desenvolvimento das máquinas elétricas rotativas. Porém, o surgimento desses equipamentos apenas ocorreu no ano de

1886, com a invenção do primeiro gerador de corrente contínua auto induzido, realizado por Werner Siemens.

As máquinas elétricas rotativas operam com uma tensão variável em relação ao tempo que é gerada pela alteração cíclica do fluxo concatenado, que pode ser produzida de três maneiras, quando um conjunto de espiras rotaciona próximo à um campo magnético, quando o próprio campo magnético rotaciona próximo às bobinas e quando um circuito magnético apresenta uma variação na sua relutância por conta da movimentação do rotor (UMANS; FITZGERALD, 2014).

Portanto, baseando-se na Lei de Faraday, que estabelece que uma variação do fluxo magnético de um circuito elétrico em relação ao tempo gera uma força denominada força eletromotriz, o funcionamento das máquinas elétricas rotativas é possível graças à rotação de suas partes móveis, que geram variações no fluxo magnético e promovem a conversão da energia elétrica em mecânica.

Segundo Del Toro (1990), tendo como base a parte construtiva das máquinas elétricas rotativas, estas apresentam essencialmente dois elementos fundamentais, o estator, que representa a parte estática desses equipamentos, e o rotor, que representa a parte dinâmica desses equipamentos. Os dois elementos são ilustrados na Figura 2, que representa de maneira simplificada os componentes de um motor de indução trifásico.



**Figura 2 – Representação simplificada de um motor de indução trifásico**  
Fonte: Barnes (2003)

Além disso, ao conectar as bobinas que são responsáveis pela alteração cíclica do fluxo concatenado, é obtido um grupo de bobinas que é denominado enrolamento de armadura, que de maneira geral, representa um enrolamento ou um grupo de enrolamentos que é responsável por conduzir uma corrente elétrica alternada nas máquinas elétricas rotativas.

As máquinas elétricas rotativas são classificadas como máquinas CA e máquinas CC. As máquinas de corrente elétrica alternada, denominadas de máquinas CA, são máquinas elétricas que, de modo geral, possuem os enrolamentos de armadura na parte estacionária do motor, já as máquinas de corrente elétrica contínua, denominadas de máquinas CC, são máquinas elétricas que possuem os enrolamentos de armadura na parte dinâmica do motor.

Segundo Umans (2014), geralmente, as máquinas CA síncronas e as máquinas CC possuem um segundo tipo de enrolamento ou conjunto de enrolamentos, que é denominado enrolamento de campo e é responsável por conduzir uma corrente elétrica contínua, que é empregada na geração do fluxo elementar para a operação dessas máquinas.

Uma máquina CA convencional pode ser definida como síncrona ou de indução. Nas máquinas CA síncronas, os contatos rotativos e o enrolamento do rotor são os responsáveis por induzir as correntes elétricas na parte estacionária do motor, já nas máquinas CA de indução, a variação das correntes do estator em relação ao tempo e a movimentação do rotor em relação ao estator são os responsáveis por induzir as correntes elétricas na parte dinâmica do motor (UMANS, 2014).

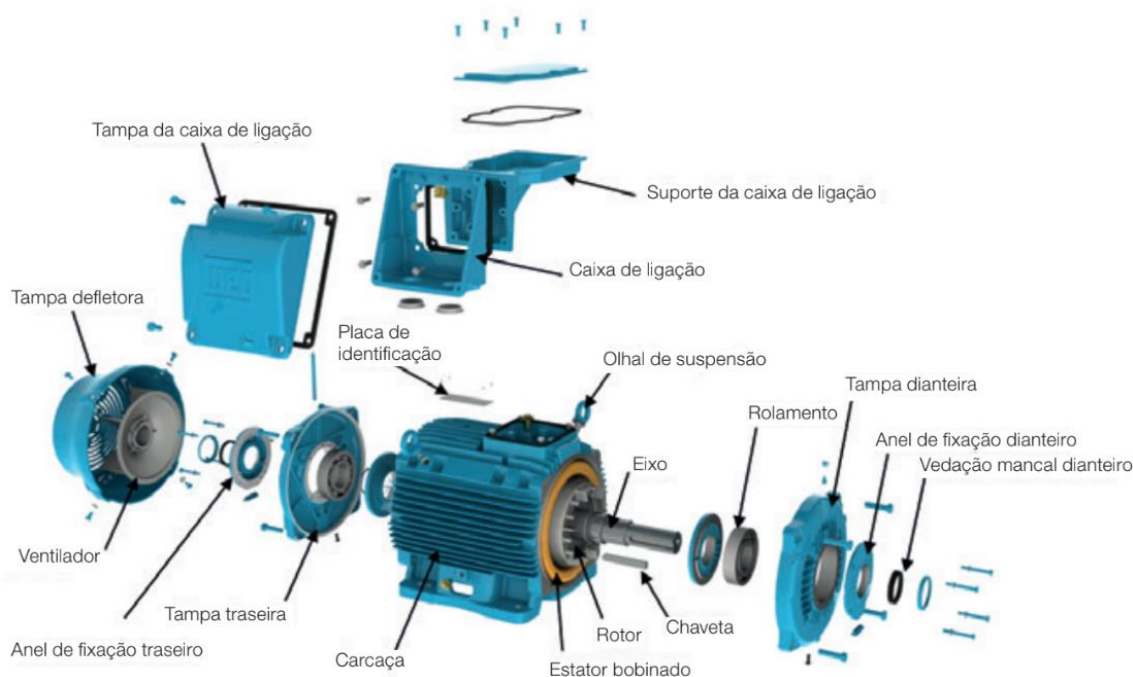
As máquinas de corrente elétrica alternada por indução podem ser classificadas em: máquinas monofásicas, máquinas bifásicas ou máquinas trifásicas. Essa divisão leva em conta o número dos conjuntos de bobinas presentes no estator desses equipamentos, que reflete qual o tipo de rede que é empregada para o sistema de alimentação.

Assim, as máquinas monofásicas apresentam apenas um conjunto de bobinas, sendo alimentadas por uma rede com apenas um condutor de fase, já as máquinas bifásicas, apresentam dois conjuntos de bobinas, sendo alimentadas por uma rede com dois condutores de fase, e por fim, as máquinas trifásicas apresentam três conjuntos de bobinas, sendo alimentadas por uma rede com três condutores de fase.

## 2.2.2 Motores de Indução Trifásicos

Dentre as máquinas de corrente elétrica alternada por indução, os motores de indução trifásicos são os equipamentos mais empregados em ambientes industriais. Essa preferência está relacionada com uma construção simplificada, já que não apresentam escovas, um custo de aquisição baixo, uma manutenção de baixa complexidade e uma ampla versatilidade, por oferecerem uma grande faixa de velocidades e torques de trabalho.

Tendo como base os aspectos construtivos de um motor de indução trifásico, observa-se que estes equipamentos são formados por vários componentes. Dentre estes, pode-se ressaltar a carcaça do motor, o ventilador, o estator e o rotor, que estão demonstrados na Figura 3, que expõe uma vista explodida de um motor de indução trifásico.



**Figura 3 – Representação de uma vista explodida de um motor de indução trifásico**  
Fonte: Weg (2020)

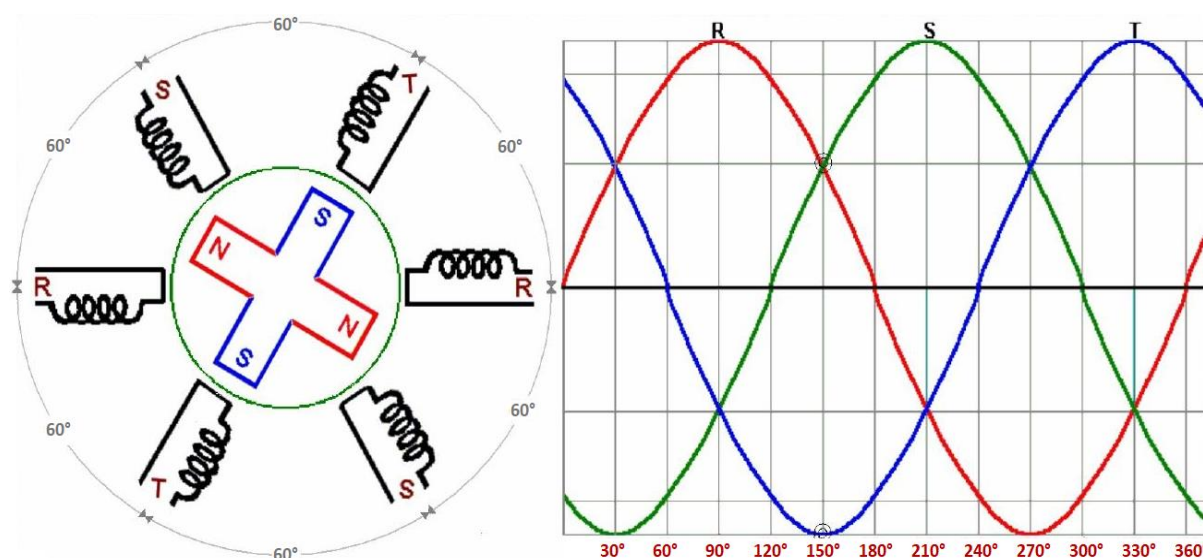
A carcaça do motor é uma estrutura de alumínio ou ferro fundido que aloja o estator e suporta a montagem dos outros componentes do motor. Já o ventilador é um componente de plástico ou alumínio que é responsável por promover a convecção forçada nas aletas da carcaça, a fim de manter a transferência de calor entre o interior do motor e o ambiente externo.



Portanto, tanto a carcaça do motor, que fornece a superfície para a troca de calor, quanto o ventilador, que fornece o fluxo de ar para o fenômeno de convecção, são elementos essenciais para o sistema de resfriamento dos motores de indução trifásicos, que busca manter a temperatura interna desses equipamentos em níveis aceitáveis.

O estator é um componente formado por um núcleo com geometria cilíndrica de aço magnético laminado e por três conjuntos de bobinas de fios de cobre esmaltado. Além disso, ressalta-se que os conjuntos de bobinas estão localizados nas ranhuras do estator e que cada conjunto está ligado a uma fase distinta dentre as três fases da corrente de alimentação.

Este arranjo promove a condução, no interior do estator, de uma corrente elétrica trifásica defasada em cento e vinte graus ( $120^\circ$ ) em relação ao tempo, como demonstrado na Figura 4, que gera campos magnéticos relacionados às três fases da corrente de alimentação, resultando no campo magnético rotativo dos motores de indução trifásicos.



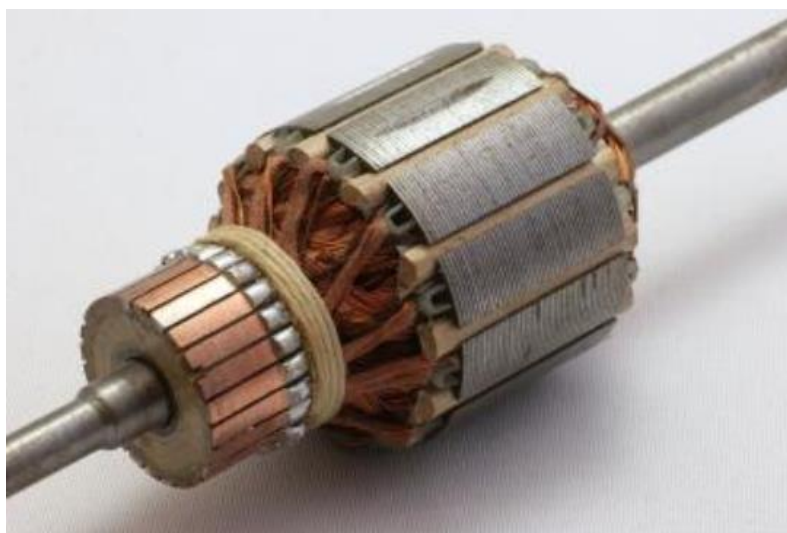
**Figura 4 – Representação do campo magnético rotativo de um sistema trifásico**  
**Fonte: Knüppe (2013)**

Por fim, o rotor é um componente formado por um eixo cilíndrico apoiado em rolamentos e por uma bobina polifásica com condutores em curto circuito, que é energizado através da indução magnética. Além disso, tendo como base os contatos elétricos deste componente, é possível classificá-lo em duas categorias distintas, rotor em gaiola de esquilo e rotor bobinado.

Os motores de indução com rotor em gaiola de esquilo, como demonstrado na Figura 5, apresentam uma fabricação simplificada, pois não possuem contatos elétricos, como anéis coletores e escovas de carbono, entre o rotor e o estator, que resulta em um menor índice de manutenções e em um menor custo para a aquisição desses equipamentos (TEIXEIRA, 2018).



**Figura 5 – Ilustração de um rotor em gaiola de esquilo**  
Fonte: Wikimedia Commons (2008)



**Figura 6 – Ilustração de um rotor bobinado**  
Fonte: Soluções Industriais (2020)

Um rotor bobinado, como demonstrado na Figura 6, consiste na presença de anéis e contatos elétricos deslizantes de escovas sobre os enrolamentos do rotor, que resultam em uma condução constante da corrente elétrica. Além disso, ressalta-

se que esse tipo de rotor permite um controle da corrente elétrica de partida e da velocidade do motor.

Segundo Guru e Hiziroğlu (2001), o rotor bobinado é menos empregado quando comparado ao rotor em gaiola de esquilo, por apresentar um maior índice de manutenções, um custo alto de fabricação e uma baixa eficiência energética. Além disso, devido a aplicação de inversores de frequência junto aos motores de indução, é possível realizar o controle da corrente elétrica de partida e da velocidade do motor, mesmo que estes apresentem um rotor em gaiola de esquilo.

### 2.2.3 Falhas nos Motores de Indução

Segundo Gonzalez-Parada et al. (2015), os motores elétricos são empregados em diversas aplicações na indústria, principalmente os motores de indução, que são equipamentos estritamente importantes para a continuidade de cadeias de produção e de processos. Porém, esses equipamentos também estão sujeitos a falhas, que de maneira geral, estão relacionadas a três componentes, o estator, o rotor e os rolamentos.

Essa afirmação é comprovada por vários estudos, dentre estes, pode-se ressaltar o do Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica (do inglês *Electric Power Research Institute*, EPRI) junto à empresa *General Electric* (GE), realizado por McCoy et al. (1985), e o do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (do inglês *Institute of Electrical and Electronic Engineers*, IEEE), realizado por O'Donnell (1985 e 1987).

**Tabela 1 – Porcentagem de falhas nos componentes dos motores de indução**

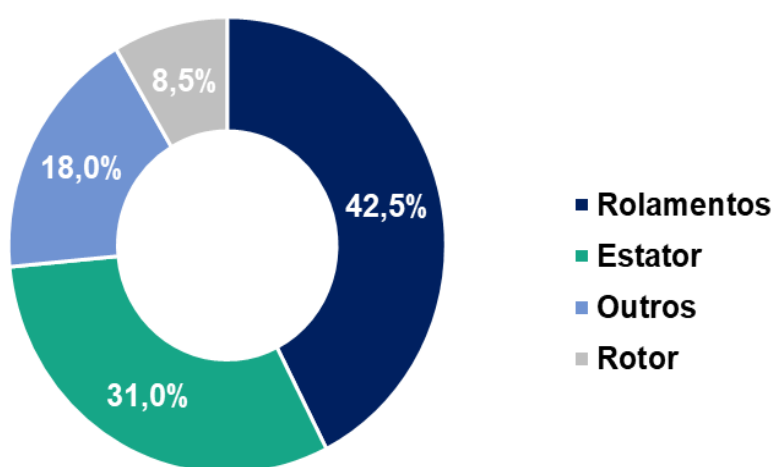
Componentes	Porcentagem de Falhas		
	[1]	[2]	Média
Estator	36,0%	26,0%	31,0%
Rolamentos	41,0%	44,0%	42,5%
Rotor	9,0%	8,0%	8,5%
Outros	14,0%	22,0%	18,0%

**Fonte: Autoria própria**

A Tabela 1, demonstra as porcentagens das falhas obtidas por McCoy et al. (1985) <sup>[1]</sup>, que estudou os modos de falha de 4800 motores de indução com

potências acima de 100 CV, onde 97% possuíam um rotor em gaiola de esquilo, e as porcentagens das falhas obtidas por O'Donnell (1985 e 1987) [2], que estudou os modos de falha de 1141 motores de indução com potências acima de 200 CV.

Observa-se que ambos os autores obtiveram as maiores representações de falhas relacionadas aos mesmos componentes dos motores de indução. Assim, ao realizar a média dos valores obtidos pelos estudos, é possível gerar uma representação gráfica, demonstrada no Gráfico 1, que expõe de modo visual as contribuições dos componentes junto às falhas dos motores.



**Gráfico 1 – Média das falhas de componentes de motores de indução**  
Fonte: Autoria própria

Através da análise deste gráfico, constata-se que os rolamentos, que estão relacionados a 42,5% das falhas, e o estator, que está relacionado a 31% das falhas, são os componentes que requerem maior atenção dos setores de manutenção. Além disso, ressalta-se que apesar de o rotor estar relacionado a apenas 8,5% das falhas, este componente também deve ser acompanhado, já que ele está associado diretamente aos rolamentos e ao estator.

Os rolamentos são os componentes responsáveis por transferir as forças, atuando como suporte e guia, e por suportar os esforços axiais e radiais cujo o eixo do motor está sujeito. Os motores de indução podem utilizar diferentes tipos de rolamentos, porém, a grande maioria destes empregam os rolamentos do tipo rígido de esferas (do inglês, *Deep groove ball bearings*).

Os rolamentos rígidos de esferas são os rolamentos mais empregados em ambientes industriais, já que possuem uma montagem simples, não necessitam de

muitas manutenções e são componentes versáteis, sendo capazes de suportar cargas axiais e radiais em ambas as direções. Além disso, esses rolamentos apresentam um baixo atrito, geram vibrações de baixa amplitude e produzem um baixo ruído.

Um rolamento rígido de esferas é composto basicamente por quatro elementos, um anel de rolagem interno, um anel de rolagem externo, um conjunto de esferas metálicas e uma armadura lubrificada. Além disso, ressalta-se que a armadura, que também é denominada de gaiola, é o elemento responsável por manter as esferas de rolagem nas posições relativas corretas.

Assim, as falhas que os rolamentos rígidos apresentam estão estritamente relacionadas a esses elementos, sendo causadas por diversos fatores, como contaminação, aumento da temperatura, lubrificação inadequada, corrosão e instalação incorreta, que resultam em um aumento da vibração do rolamento, gerando frequências de vibrações únicas.

Apoiando-se nas descrições realizadas nas seções anteriores, pode-se reiterar que o estator é um componente formado por um conjunto de enrolamentos, também denominados bobinas, e por um núcleo metálico. Esses dois elementos podem ser observados na Figura 7, que demonstra o estator de um motor de indução.

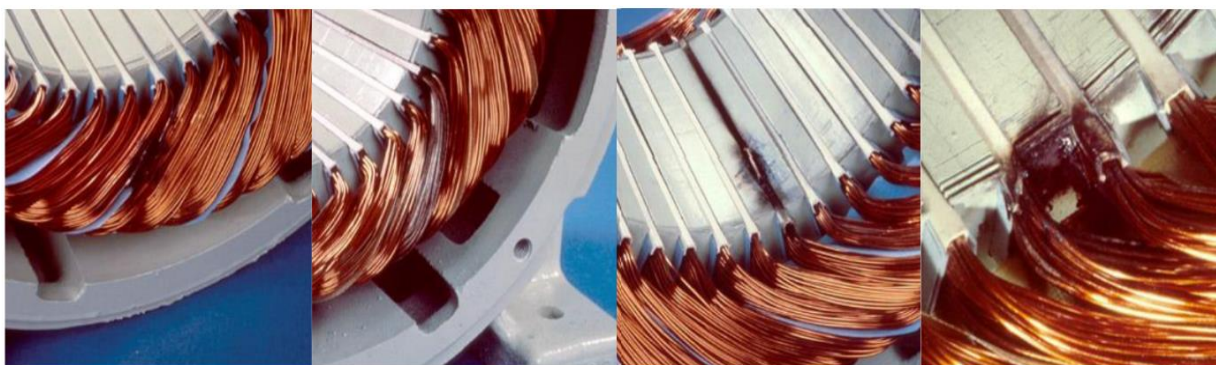


**Figura 7 – Ilustração de um estator**  
Fonte: Xylem (2020)

Segundo McCoy et al. (1985), entre os dois elementos que compõem o estator, as bobinas apresentam a maior representação junto às falhas totais,

contribuindo com cerca de 94%. Além disso, ressalta-se que as falhas nas bobinas ocorrem, predominantemente, por conta da deterioração do isolamento, que resulta no fenômeno de curto circuito do estator.

Este isolamento representa uma associação de isolantes, que compreende as ranhuras do estator, a resina aplicada sobre às bobinas, o esmalte presente nos fios dos enrolamentos e o isolamento das fases. Assim, o isolamento das bobinas do estator é reponsável por impedir que a corrente elétrica seja conduzida para o núcleo do estator, proteger as bobinas contra o fenômeno de corrosão e auxiliar na dissipação térmica, visando prevenir o superaquecimento dos condutores.



**Figura 8 – Ilustração de tipos de curto circuito nos enrolamentos do estator**  
**Fonte: Baccharini, Menezes e Guimarães (2005)**

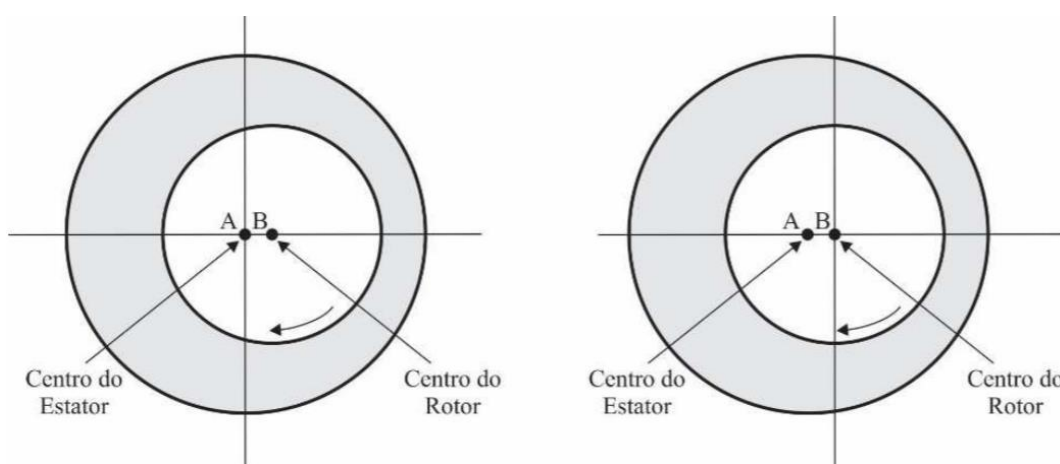
A deteriorização do isolamento ocorre, predominantemente, por conta de contaminações, agentes abrasivos e oscilações na tensão, que podem gerar curtos circuito em diversas regiões do estator. Dentre estas, pode-se ressaltar o curto-circuito entre fases, o curto-circuito entre bobinas, o curto-circuito para massa no interior da ranhura e o curto-circuito para massa na saída da ranhura, que estão demonstrados, respectivamente, da esquerda para a direita, na Figura 8.

Apoiando-se nas descrições realizadas nas seções anteriores, pode-se reiterar que o rotor é um componente formado por um eixo cilíndrico e por um conjunto de enrolamentos. Além disso, assim como no estator, as falhas nos enrolamentos também apresentam a maior contribuição junto às falhas do rotor, que no caso de rotores bobinados ocorrem nos anéis junto aos enrolamentos e no caso de rotores em gaiola de esquilo ocorrem nos anéis de curto-circuito.

Segundo Borges (2008), as falhas que acometem os rotores dos motores de indução estão relacionadas a uma combinação de fatores, como esforços térmicos, esforços eletromagnéticos e esforços mecânicos, que surgem durante a operação

desses equipamentos. Além disso, oscilações de cargas, variações na partida e uma imperfeição gerada durante o processo de fabricação também contribuem para o surgimento de falhas.

É imprescindível mencionar que além das falhas apresentadas anteriormente, há um tipo de falha que envolve tanto o rotor quanto o estator, que são as falhas relacionadas à excentricidade. Esta falha ocorre por conta de uma diferença dos centros de rotação do estator e do rotor, como demonstrado na Figura 9, que resulta em uma alteração da espessura do entreferro, que corresponde ao espaço entre o rotor e o estator.



**Figura 9 – Representação da diferença entre os centros de rotação do estator e do rotor**  
Fonte: Linessio (2016)

Segundo Nandi et al. (2011), a falha por excentricidade está vinculada a diversas causas, tais como, o envergamento do veio do motor, um desequilíbrio do sistema trifásico, a deterioração de rolamentos e até uma deficiência junto ao apoio do motor, que podem acarretar em uma deformação do estator, gerando uma distribuição irregular no entreferro.

### 2.3 PROTOTIPAGEM ELETRÔNICA

As próximas seções abordam e fazem uma reflexão dos aspectos gerais relacionados à prototipagem eletrônica, discorrendo sobre a sua definição, os principais elementos empregados nesta atividade, os principais tipos de sensores de temperatura e corrente, os tipos de condicionamento de sinais, e sobre a aplicação dessa ferramenta junto a manutenção preditiva no contexto atual da indústria.

### 2.3.1 Definição

Segundo Hartmann et. al (2006), a atividade de prototipagem é extremamente essencial para o suporte da inovação, colaboração e criatividade junto ao design. Através dos protótipos, os projetos se tornam mais consistentes e assumem um caráter mais real, possibilitando o desenvolvimento de estudos mais detalhados acerca dos problemas que estes apresentam.

A realização de processos experimentais eletrônicos segue as mesmas concepções dos processos experimentais empregados no design de produtos, já que envolve o desenvolvimento, a verificação e a experimentação de ideias, a fim de atestar o potencial de um projeto. Portanto, a prototipagem eletrônica é um recurso que disponibiliza informações que auxiliam nas tomadas de decisões, contribuindo com diversas perspectivas junto aos projetos eletrônicos.

Um projeto eletrônico necessita de três bases distintas, o *peopleware*, que representa todas as pessoas que atuam no projeto, tais como usuários e programadores, o *software*, que representa a parte lógica do sistema, e o *hardware*, que representa todos os elementos físicos, tais como plataformas e placas de prototipagem eletrônica, além de atuadores, módulos e sensores.

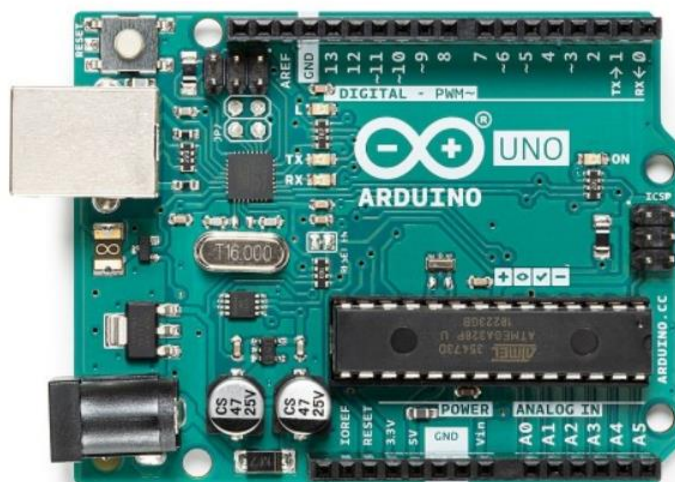
### 2.3.2 Principais Elementos

Uma plataforma de prototipagem eletrônica (do inglês, *electronic prototyping platform*) é uma placa dotada de circuitos que disponibiliza recursos de aquisição, processamento e controle de dados, dispensando a necessidade da aquisição de *hardwares* específicos para o desenvolvimento de um projeto eletrônico. As principais plataformas de prototipagem utilizadas são: Arduino, Raspberry Pi e Beaglebone.

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica idealizada por Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino e David Mellis, que surgiu na cidade de Ivrea, na Itália, em 2005. Essa plataforma foi desenvolvida com a finalidade de criar um sistema de prototipagem com um baixo custo, visando fornecer à comunidade acadêmica e a projetos escolares uma ferramenta de prototipagem mais acessível.



Assim, o Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto (do inglês, *open source*) constituída por um *hardware* e por um *software*, que permite o desenvolvimento de protótipos eletrônicos sem exigir um elevado conhecimento em eletrônica e computação. O seu *hardware* consiste em um microcomputador que apresenta um único circuito (microcontrolador), como demonstrado na Figura 10, que é responsável pelo processamento dos códigos e sinais obtidos dos sensores (KIANE, 2019).



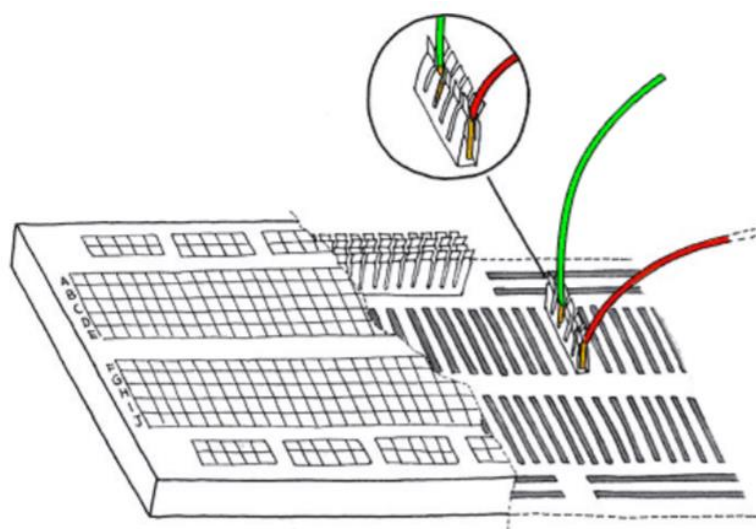
**Figura 10 – Ilustração de um microcontrolador Arduino Uno**  
Fonte: Arduino (2020)

Além disso, o desenvolvimento dos algoritmos utilizados para a comunicação e controle do Arduino pode ser realizado em um ambiente de desenvolvimento integrado (do inglês *Integrated Development Environment*, IDE), que fornece ao usuário uma interface gráfica para elaborar e compilar códigos que são baseados na linguagem de programação C/C++.

Uma *breadboard* ou *protoboard* é uma placa para componentes eletrônicos idealizada por Ronald J. Portugal, que surgiu na cidade de North Haven, nos Estados Unidos da América, em 1970. Essa placa foi desenvolvida com a finalidade de evitar a utilização de soldas ou arames nas conexões presentes em circuitos eletrônicos, sendo patenteada e cedida para a El Instruments Incorporated em 1973.

Assim, uma placa de prototipagem (do inglês, *breadboard* ou *protoboard*) é um elemento que possui orifícios e conexões condutoras que permite a elaboração de circuitos elétricos empregados em projetos eletrônicos. Esse elemento é essencial para a prototipagem eletrônica pois permite uma interação de atuadores e

sensores através de conexões que dispensam a utilização do processo de soldagem, como demonstrado na Figura 11, gerando circuitos de uma maneira fácil e rápida.



**Figura 11 – Representação da conexão em uma placa de prototipagem**  
Fonte: Brasileiro (2013)

Observa-se que uma *protoboard* é constituída por furos com uma disposição tanto na posição vertical quanto na posição horizontal. As linhas (furos dispostos na posição horizontal) estão localizadas nas extremidades da *protoboard* e são responsáveis pela alimentação da placa, já as colunas (furos dispostos na posição vertical) estão localizadas no centro da *protoboard* e são responsáveis pela implementação do circuito elétrico.

Os atuadores são elementos que permitem a implementação de movimentos através da conversão de energia, que pode ser: elétrica, pneumática, hidráulica ou piezoelétrica, em energia mecânica. O seu funcionamento é análogo ao funcionamento dos músculos do corpo humano, já que enquanto os músculos convertem energia para o funcionamento de órgãos e membros, os atuadores realizam esse mesmo processo, porém para o movimento de máquinas e equipamentos (PROGRESSIVE AUTOMATIONS, 2021).

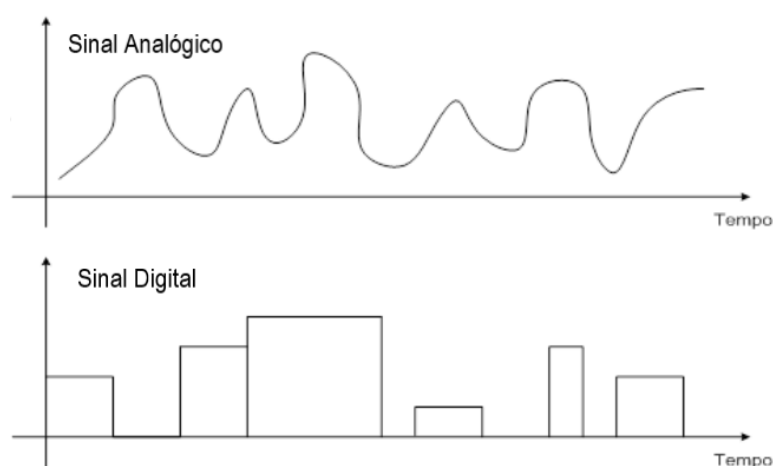
Os principais atuadores empregados são: motores elétricos, motores de passo, cilindros pneumáticos e cilindros hidráulicos. Esses elementos podem ser classificados de acordo com a energia empregada (elétrica, pneumática, hidráulica ou piezoelétrica) e de acordo com o tipo de movimento que eles promovem, sendo

classificados como: lineares, que são atuadores que produzem um movimento retilíneo, ou rotativos, que são atuadores que produzem um movimento rotacional.

Os módulos são placas dotadas de circuitos eletrônicos desenvolvidas para aumentar os recursos e funcionalidades das plataformas de prototipagem. Esses componentes podem ser simples e flexíveis, podendo ser utilizados em diversas placas de prototipagem, ou complexos e fixos, passando a ser denominados de *shields*, que são placas empregadas em plataformas de prototipagem específicas por conta de sua estrutura fixa (pinagem).

Os principais módulos empregados são: módulo RTC, que permite o registro de unidades de tempo, módulo Bluetooth, que permite a comunicação sem fio através da tecnologia Bluetooth, módulo USB, que permite a comunicação via USB, módulo RF, que permite a comunicação via rádio frequência, e módulo de Cartão SD, que permite gravar dados em um cartão de memória.

Os sensores são elementos empregados na conversão de estímulos gerados por fontes de energia, que podem ser: elétricas, térmicas, magnéticas ou cinéticas, em sinais de saída proporcionais a grandezas físicas, tais como: corrente elétrica, resistividade elétrica, temperatura, campo magnético, posição, velocidade e aceleração.



**Figura 12 – Representação dos tipos de sinais**  
Fonte: Gomes (2021)

Os sensores podem ser classificados em dois tipos: sensores analógicos e sensores digitais. Os sensores analógicos, como demonstrado na Figura 12, são sensores que geram sinais que podem apresentar valores contínuos em relação ao tempo. Já os sensores digitais, são sensores que geram sinais que apresentam

valores descontínuos em relação ao tempo, visto que podem assumir apenas dois valores, representados pelo dígito zero e pelo dígito um.

### 2.3.3 Sensores de Temperatura

Os sensores de temperatura são equipamentos desenvolvidos para reagir a estímulos térmicos, sendo capazes de mensurar variações no grau de agitação ou na energia cinética das moléculas, obtendo a temperatura como grandeza física. Os principais tipos de sensores de temperatura são: termopares, termistores, detectores de temperatura por resistência, interruptores bimetálicos e sensores infravermelhos de temperatura.

Os termopares (do inglês, *thermocouples*) são sensores que possuem um par de fios metálicos com diferentes propriedades, que estão unidos em uma de suas extremidades, resultando em uma diferença de tensão termoelétrica quando sujeitos a uma variação de temperatura. Suas vantagens são: alta precisão e confiabilidade em uma ampla faixa de medição, enquanto suas desvantagens são: tendência a corrosão e influência do período de mensuração na confiabilidade dos dados (longos períodos de tempo geram saídas incorretas).

Os termistores (do inglês, *thermistors*) são sensores com propriedades semicondutoras dotados de uma resistência elétrica, resultando em uma diferença de resistividade quando sujeitos a uma variação de temperatura. Suas vantagens são: durabilidade, precisão e dimensões compactas, enquanto suas desvantagens são: frágil estrutura física e proporção não linear entre resistividade e temperatura.

Os detectores de temperatura por resistência (do inglês, *thermistors resistance temperature detectors*, RTDs) são sensores que possuem um enrolamento constituído de platina, cobre ou níquel, resultando em uma diferença da resistividade quando sujeitos a uma variação de temperatura. Suas vantagens são: calibração simplificada e independência do período de mensuração na confiabilidade dos dados (longos períodos de tempo não geram saídas incorretas), enquanto suas desvantagens são: custo elevado e precisão em uma menor faixa de medição.

Os interruptores bimetálicos (do inglês, *bimetal switches*) são sensores que possuem uma mola bimetálica, composta por materiais que possuem diferentes propriedades, resultando em uma expansão térmica assimétrica quando sujeitos a

uma variação de temperatura. Suas vantagens são: baixo custo e fácil utilização, enquanto suas desvantagens são: baixa precisão e ineficiência na exibição dos dados.

Os sensores infravermelhos de temperatura (do inglês, *noncontact infrared temperature sensors*) são sensores que possuem um receptor de radiação infravermelha (RI), resultando na absorção da radiação que é emitida por qualquer corpo ou superfície sujeita a variações de temperatura. Suas vantagens são: fácil utilização e supressão do contato direto entre o sensor e o objeto de medição, enquanto suas desvantagens são: dependência de fonte de energia elétrica e custo elevado.

#### 2.3.4 Sensores de Corrente

Os sensores de corrente são equipamentos desenvolvidos para reagir a estímulos elétricos, sendo capazes de mensurar variações no fluxo de íons ou de elétrons em um condutor, obtendo a corrente elétrica como grandeza física. Os principais tipos de sensores de corrente são: sensores de corrente shunt, sensores de corrente com núcleo magnético e sensores de corrente sem núcleo magnético.

Os sensores de corrente shunt (do inglês, *shunt resistor+isolation amplifier/isolation ADC sensors*) são sensores dotados de um resistor shunt isolado, resultando em uma diferença de potencial elétrico quando sujeitos a uma variação de corrente. Suas vantagens são: tecnologia simples e custo baixo, enquanto suas desvantagens são: dimensões consideráveis por conta de componentes periféricos, baixa precisão para correntes elétricas acima de 10A e necessidade de isolamento.

Os sensores de corrente com núcleo magnético (do inglês, *cored magnetic current sensors*) são sensores que possuem um núcleo com alta permeabilidade magnética, resultando na variação do fluxo magnético quando sujeitos a uma variação de corrente. Suas vantagens são: robustez e medição não invasiva, já suas desvantagens são: saturação magnética e histerese (acrécimo no sinal de saída) na mensuração de correntes elevadas (campos magnéticos muito grandes).

Os sensores de corrente sem núcleo magnético (do inglês, *coreless magnetic current sensors*) são sensores que possuem uma bobina de indução, resultando na variação da tensão induzida quando sujeitos a uma variação do

campo magnético gerado pela corrente. Suas vantagens são: medição não invasiva e redução de peso, já suas desvantagens são: baixa precisão para correntes elétricas abaixo de 10A e suscetíveis a interferências de ruídos externos.

### 2.3.5 Condicionamento de sinais

O processo de condicionamento de sinais consiste na conversão dos sinais obtidos por sensores para interfaceá-los com outros elementos, portanto esse processo consiste na transformação da saída do sensor em um sinal que possibilite a sua mensuração de maneira precisa e adequado pelo dispositivo de aquisição. As principais categorias de condicionamento de sinais são: mudança de nível, linearização, conversão e filtragem.

O condicionamento de sinal por mudança de nível é o método que consiste na amplificação ou atenuação do sinal, que consiste respectivamente, no aumento ou na diminuição do nível de tensão do sinal. O condicionamento de sinal por linearização é o método que consiste na transformação de sinais que possuem uma proporção não linear em linear, quando relacionados com sua grandeza física.

O condicionamento de sinal por conversão é o método que consiste na conversão de um tipo de variação elétrica em outra (resistência para corrente ou resistência para tensão). O condicionamento de sinal por filtragem é o método que consiste na aplicação de filtros de sinais para eliminar ou reduzir a presença de sinais indesejáveis.

### 2.3.6 Prototipagem na manutenção preditiva

Segundo CNI (2021), a Quarta Revolução Industrial, mais conhecida como Indústria 4.0, é uma concepção que aborda a transformação do ambiente fabril através da automação e da integração de outros recursos tecnológicos, tais como: inteligência artificial, computação em nuvem, *Big Data*, *Cyber Security*, internet das coisas, robótica avançada, manufatura digital, manufatura aditiva e integração de sistemas.

Portanto, um dos pilares da Indústria 4.0 é o desenvolvimento de ambientes industriais que utilizam a interconexão de máquinas e equipamentos ao longo de

toda a cadeia de produção. Porém, antes de criar uma rede de compartilhamento de informações é estritamente importante possuir uma estrutura consistente para a coleta de dados desses recursos produtivos (RODRIGUES, 2021).

Assim, uma ferramenta que pode ser empregada para desenvolver uma estrutura primária de coleta e análise de dados é a própria manutenção preditiva, já que ela é uma metodologia que busca antever a ocorrência de uma falha, justamente utilizando o supervisionamento dos dados obtidos nas operações das cadeias de produção.

Segundo Deloitte (2017), a aplicação dessa ferramenta traz diversos benefícios, tais como a maximização do tempo de produção, a redução dos tempos de parada, um maior controle do estoque de peças de reposição, um melhor planejamento para as paradas de manutenção, a realização de reparos antes da ocorrência de falhas, entre outros.

Porém, embora a implementação da manutenção preditiva traga resultados expressivos, ela requer um investimento inicial considerável e uma equipe com conhecimento técnico especializado. Uma maneira de mitigar estes pontos negativos é utilizar a prototipagem eletrônica, que como citado anteriormente, permite a criação de projetos eletrônicos sem a necessidade de um alto investimento e de profissionais com um alto conhecimento técnico.

Um dos recursos avançados da prototipagem eletrônica que permite o desenvolvimento e a implementação de um incontável número de sensores e seus circuitos sobre o mesmo substrato, resultando em um sistema de coleta, análise e compartilhamento de informação para o monitoramento de equipamentos e ambientes industriais, são as placas de circuito impresso (PCI).

Segundo Schmidt (2012), as placas de circuito impresso (do inglês *printed circuited board*, PCB) são placas que possuem um caminho de metal com propriedades condutoras associado a um substrato composto por um isolante. Essa estrutura permite com que componentes eletrônicos sejam associados utilizando o material condutor como meio de ligação, eliminando a utilização de *jumpers* e *protoboards*.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho. O objetivo deste é expor ao leitor os componentes utilizados na implementação do sistema, os equipamentos utilizados na calibração dos sensores e na validação dos dados, além dos procedimentos experimentais para a aquisição dos parâmetros de operação.

#### 3.1 COMPONENTES E EQUIPAMENTOS

As próximas seções abordam e fazem uma reflexão dos componentes e equipamentos empregados neste projeto, realizando uma descrição geral destes, discorrendo sobre as suas aplicabilidades e as suas principais características.

##### 3.1.1 Plataforma de prototipagem eletrônica

A plataforma de prototipagem eletrônica empregada neste projeto é o Arduino versão Pro Mini, como demonstrado na Figura 13. Essa plataforma foi desenvolvida e fabricada pela SparkFun Electronics com a finalidade de fornecer uma plataforma com uma maior flexibilidade aliada a um baixo custo e dimensões compactas.

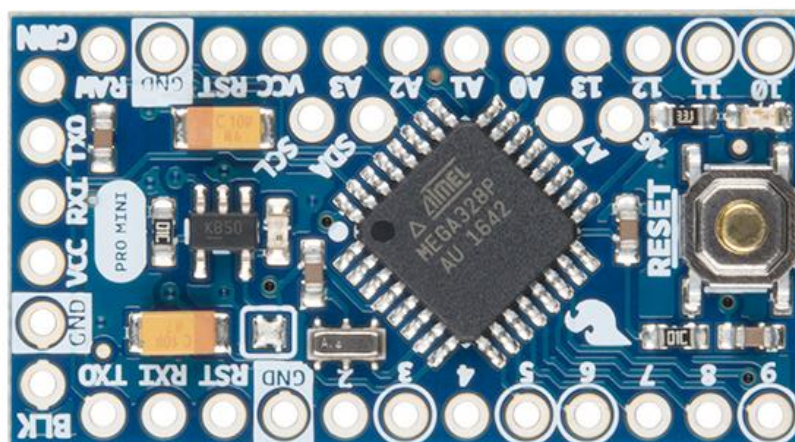


Figura 13 – Ilustração de uma plataforma Arduino Pro Mini  
Fonte: SparkFun Electronics (2021)



Segundo Arduino (2021), essa plataforma apresenta um microcontrolador ATmega 328, 14 pinos digitais de entrada/saída (onde 6 destes podem ser utilizados como saídas PWM, *Pulse Width Modulation*, que são saídas com modulação por largura de pulso), 6 entradas analógicas, um amplificador integrado, um botão de *reset* e furos para a montagem dos conectores elétricos (pinos).

Assim, o Arduino Pro Mini apresenta as funcionalidades essenciais quando comparado a um Arduino UNO, já que sua aplicação é voltada para sistemas semi-permanentes focados na otimização de espaço e na redução do custo de implementação. Porém, essas características acabam exigindo um certo grau de experiência dos programadores e usuários, por conta da falta de um conector USB integrado, que é responsável pela comunicação serial entre o computador e a plataforma.

A escolha do Arduino Pro Mini como a plataforma de prototipagem está alinhada com o objetivo desse trabalho de desenvolver um sistema compacto e econômico para a coleta de dados. Com relação a carência de um conector USB, esse empecilho será solucionado com a utilização de um módulo USB para a gravação do código no Arduino e de um módulo RF *wireless* HC-12 com antena para a transmissão dos dados coletados.

### 3.1.2 Sensores de Temperatura

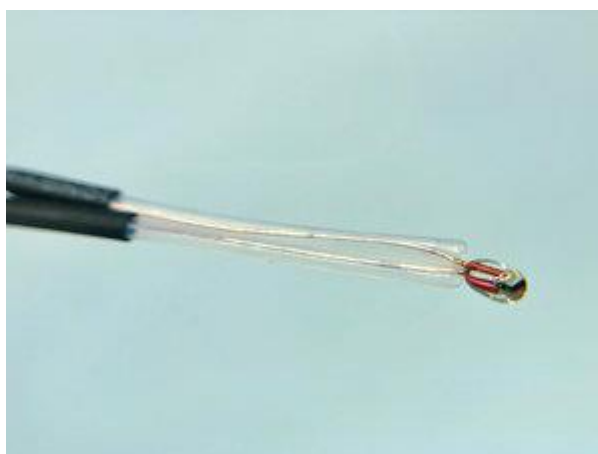


**Figura 14 – Ilustração de um sensor de temperatura NTC 3950**  
**Fonte: Oliveira (2021)**

Os sensores de temperatura empregados neste projeto são os termistores NTC 3950, como demonstrado na Figura 14. Esses sensores são do tipo com

coeficiente negativo de temperatura (do inglês, *negative temperature coefficient*, NTC), onde a temperatura e a resistência elétrica possuem uma proporção não linear, sendo inversamente proporcionais, já que com o aumento da temperatura a resistência diminui.

Segundo ElectroPeak (2021), esses sensores possuem um elemento de detecção composto por uma película de platina com revestimento de vidro, como demonstrado na Figura 15, que resulta em uma estrutura com maior resistência a temperaturas elevadas. Além disso, esses sensores apresentam cabos revestidos de Teflon ou PTFE, dimensões compactas, resistência elétrica nominal de 100 k $\Omega$  e uma precisão de  $\pm 1\%$ .



**Figura 15 – Ilustração do revestimento de vidro de um sensor NTC 3950**  
**Fonte: MakerPortal (2019)**

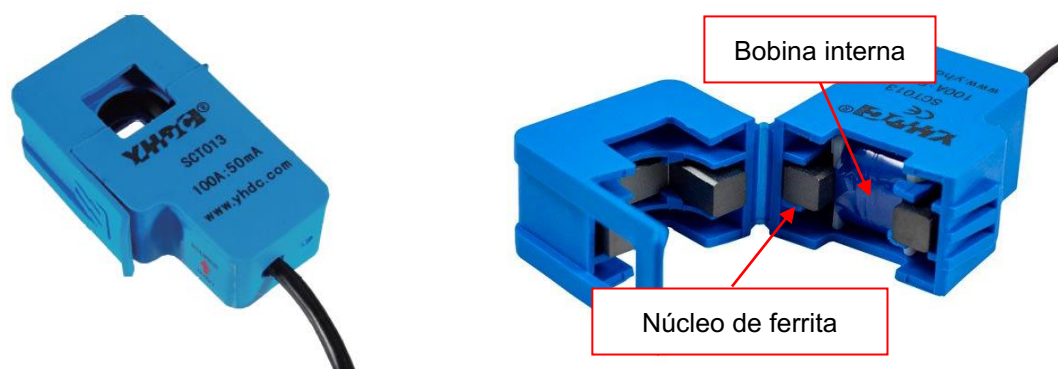
Assim, esses sensores apresentam dimensões compactas aliadas a uma alta resistência térmica e precisão, sendo que o modelo supracitado é aplicado para o monitoramento e o controle de temperaturas de impressoras 3D. Porém, uma característica desfavorável a este sensor é a relação não linear que sua resistência elétrica apresenta em relação a temperatura.

A escolha dos termistores NTC 3950 como os sensores de temperatura está alinhada com o objetivo desse trabalho de desenvolver um sistema compacto e preciso para a coleta de dados. Com relação à adversidade causada pela proporção não linear, essa dificuldade foi solucionada com a implementação do equacionamento de Steinhart-Hart junto ao código, que fornece uma relação aproximada da temperatura em função da resistência através de uma equação de 3ª ordem.

Além disso, ressalta-se que foi necessário a utilização de um condicionamento de sinal por conversão a fim de adequar o sinal de saída do termistor NTC 3950. Para isso, foi empregado um “divisor de tensão”, que consiste na associação em série do termistor com um resistor, com a finalidade de converter a variação da resistência em uma variação de tensão.

### 3.1.3 Sensores de Corrente

Os sensores de corrente empregados neste projeto são os sensores SCT013-100, como demonstrado na Figura 16. Esses sensores são conhecidos como Transformadores de Corrente (do inglês *Current Transformer*, CT), cujo funcionamento é baseado na transformação da corrente elétrica do enrolamento primário em uma corrente proporcional no enrolamento secundário.



**Figura 16 – Ilustração do sensor de corrente SCT013-100 e do seu núcleo**  
Fonte: YHDC (2021)

Segundo Demetras (2017) e YHDC (2021), esses sensores possuem um núcleo composto por ferrita e uma bobina interna, como demonstrado na Figura 16, que são os responsáveis por obter uma corrente elétrica através da indução de um campo magnético, gerado por conta da passagem de uma corrente através do núcleo. Além disso, esses sensores apresentam uma medição não invasiva, uma capacidade de medir correntes alternadas de até 100 A e uma precisão de  $\pm 1\%$ .

Assim, esses sensores apresentam uma medição não intrusiva aliada a robustez e precisão, já que sua aplicação é voltada para sistemas de proteção de motores, para o monitoramento de correntes elétricas em tempo real e para projetos de automação residencial. Porém, um ponto negativo é que esses sensores estão

expostos a histerese e a saturação magnética quando empregados na aferição de grandes campos magnéticos (correntes elevadas), o que limita a aplicabilidade em algumas situações.

A escolha dos sensores SCT013-100 como os sensores de corrente está alinhada com o objetivo desse trabalho de desenvolver um sistema não invasivo e preciso para a coleta de dados. Com relação à adversidade causada pela mensuração de correntes elevadas, essa dificuldade foi solucionada com uma determinação de que o sistema irá avaliar apenas motores que apresentam correntes de partida ou nominal com valores inferiores a 100 A.

Por final, ressalta-se que foi necessário a utilização de um condicionamento de sinal por conversão a fim de adequar o sinal de saída do sensor SCT013-100. Para isso, foi empregado um circuito elétrico, composto por resistores e um capacitor, com a finalidade de converter a variação de corrente em uma variação de tensão.

#### 3.1.4 Placa de Circuito Impresso

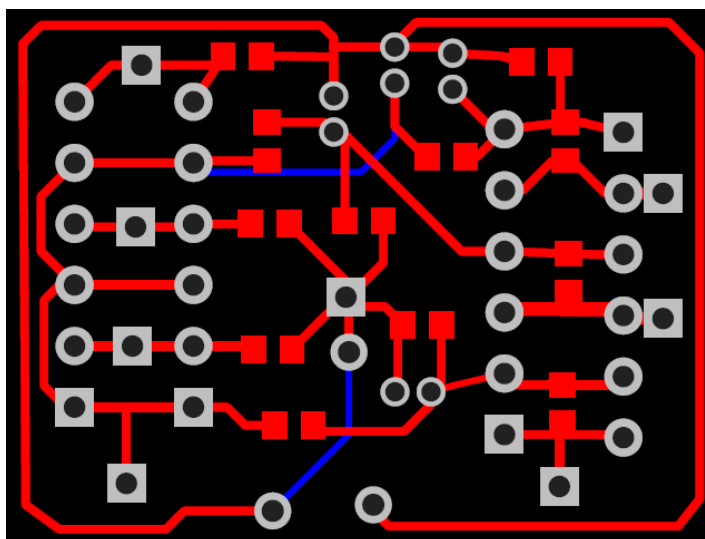
Apoiando-se nas informações apresentadas no capítulo anterior, pode-se reiterar que as *protoboards* são elementos essenciais para a prototipagem eletrônica, já que permitem a flexibilização de circuitos por conta de uma estrutura composta de conectores que dispensam a utilização do processo de soldagem. Porém, esses componentes apresentam algumas desvantagens como: fragilidade nas conexões e otimização limitada do espaço físico ocupado.

Uma opção para evitar esses problemas causados pela aplicação de *protoboards* junto a projetos eletrônicos é a utilização de placas de circuito impresso (PCI). Essas placas são elementos compostos por um material isolante, tais como fibra de vidro, teflon ou fenolite, revestidos por um material condutor, que é o responsável por delimitar os caminhos ou trilhos que serão utilizados como conexões condutoras de sensores e componentes.

Assim, o emprego de uma placa de circuito impresso, em oposição à uma *protoboard*, está alinhado com o objetivo desse trabalho de desenvolver um sistema compacto e robusto para a coleta de dados. Ressalta-se que essa placa foi

desenvolvida e fabricada especificamente para atender as necessidades do sistema proposto.

A primeira etapa para a fabricação da placa de circuito impresso foi a determinação do diagrama elétrico, apresentado no Apêndice A, que demonstra as conexões entre os componentes eletrônicos. A segunda etapa, foi a validação do circuito elétrico em uma *protoboard*, a fim de confirma a operacionalidade do circuito idealizado. A terceira etapa, foi a geração do layout do PCI, como demonstrado na Figura 17, que delimita os trilhos, furos e ilhas que eram necessários para a associação dos sensores conforme o diagrama elétrico



**Figura 17 – Layout PCI**  
**Fonte: Autoria Própria**

A quarta etapa, consiste na utilização da técnica de mascaramento, através do processo substrativo assistido por computador, que consiste na aplicação de um revestimento sobre a placa, denominado de máscara anti solda ou *solder resist*, que tem como função proteger os trilhos condutores contra a oxidação e contra o processo de soldagem. E por fim, foi realizado o processo de corrosão da placa empregando o cloreto de ferro como agente químico.

### 3.1.5 Componentes suplementares

Adicionalmente, foram inseridos no sistema: um conector de bateria 9 V, um módulo RTC DS3231, um módulo RF wireless HC-12 com antena e um módulo micro SD. O conector de bateria 9 V foi empregado neste projeto visando fornecer

uma fonte de alimentação alternativa para a placa, já que sem o conector USB, tanto a comunicação serial via computador quanto a alimentação da placa são inexistentes. Já o módulo RTC DS3231 foi empregado para gerar registros contendo data e hora dos dados coletados.

Conforme abordado nas seções anteriores, a falta de um conector USB integrado gera alguns empecilhos para o funcionamento do sistema. A fim de mitigá-los, optou-se por empregar também um módulo HC-12, que será responsável por transmitir os dados coletados para outra placa de prototipagem, um módulo micro SD, que será responsável pelo armazenamento dos dados, gerando um sistema de segurança (backup) para as informações.

Além desses componentes, também foram empregados micro resistores de 100 k $\Omega$ , micro resistores de 10 k $\Omega$ , micro resistores de 38  $\Omega$  e capacitores de 10  $\mu$ F. Esses elementos foram inseridos na placa de circuito integrado e fazem parte dos circuitos elétricos necessário para o condicionamento dos sinais obtidos pelos sensores.

Ressalta-se que o diagrama esquemático total do sistema, contendo todos os componentes e suas ligações, está disponível no Apêndice B. Além disso, para acomodar o sistema e fornecer uma proteção contra o ambiente externo foi modelado e fabricado um invólucro utilizando-se de uma impressora 3D, como demonstrado na Figura 18. Por fim, o algoritmo, demonstrado no Apêndice C, foi implementado e carregado no Arduino Pro Mini através do software Arduino IDE.



**Figura 18 – Invólucro de proteção**  
**Fonte: Autoria Própria**

### 3.1.6 Equipamentos de medição

O processo de calibração dos sensores e validação dos dados coletados exigiu a utilização de medidores de temperatura e corrente. O medidor de temperatura empregado neste projeto foi o termômetro digital infravermelho modelo STHT77365, enquanto o medidor de corrente empregado foi o alicate amperímetro digital modelo ET-3111.



**Figura 19 – Ilustração do medidor de temperatura STHT77365**  
**Fonte: Stanley (2020)**

De modo geral, o medidor de temperatura STHT77365, como demonstrado na Figura 19, apresenta um sistema de detecção da radiação infravermelha (RI) emitida por corpos ou superfícies sujeitos a variações de temperatura. Essa característica permite com que esse medidor realize a aferição de temperaturas sem um contato direto com o objeto avaliado.

Além disso, esse medidor apresenta uma resposta rápida à leitura de temperaturas, fornece uma mira a laser para auxiliar na identificação do local de análise, possui um alcance de 1,2 m e uma precisão de  $\pm 2\%$ . Assim, esse equipamento é principalmente aplicado para avaliar temperaturas de equipamentos

industriais, para o controle da temperatura de processos e para verificar superfícies sujeitas aos fenômenos de transferências de calor.

De modo geral, o medidor de corrente ET-3111, como demonstrado na Figura 20, apresenta um sistema de detecção do campo magnético gerado pelo fluxo da corrente elétrica que passa entre as garras do equipamento. Essa característica permite com que esse medidor realize a aferição de correntes elétricas de maneira não invasiva.



**Figura 20 – Ilustração do medidor de corrente ET-3111**  
Fonte: Minipa (2021)

O equipamento também fornece medições para tensões contínuas e alternadas, apresenta um monitor para facilitar as leituras dos resultados, fornece medições de resistência, testes de capacitância e possui uma precisão de  $\pm 3\%$ . Assim, esse medidor é principalmente aplicado para avaliar as condições elétricas de painéis e equipamentos industriais, verificar e testar as características de sistemas elétricos domésticos e prediais.

### 3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

As próximas seções abordam e fazem uma reflexão dos procedimentos para a calibração dos sensores, para a aquisição dos valores de temperatura e para a aquisição dos valores de corrente elétrica, descrevendo de maneira detalhada as metodologias empregadas durante a etapa experimental deste trabalho.



### 3.2.1 Calibração dos sensores

A metodologia empregada para a calibração dos valores de temperatura e corrente deste trabalho é baseada no método denominado de avaliação por similaridade, que envolve a utilização de medidores de corrente e de temperatura para a verificação dos valores obtidos pelos sensores do sistema. Essa metodologia contrapõe os valores obtidos pelos sensores e pelos equipamentos de medição, possibilitando a determinação de um fator de correção que é responsável por adequar as saídas obtidas pelos sensores.

Desta forma, o sistema de aquisição, como demonstrado na Figura 21, foi empregado junto a uma bobina de aquecimento elétrico, que possibilitou a determinação dos valores de temperatura e corrente desse componente. Paralelamente à atuação do sistema, foram empregados os medidores de temperatura e corrente, descritos no capítulo anterior, buscando obter valores de referência que foram utilizados na determinação dos fatores de correção.



**Figura 21 – Sistema de aquisição**  
Fonte: Autoria Própria

### 3.2.2 Aquisição dos valores de temperatura

A metodologia empregada na aquisição dos valores de temperatura deste trabalho é baseada no método denominado termométrico, que envolve a utilização de termômetros de resistência, termistores ou termopares para a verificação dos valores de temperaturas em pontos localizados nas superfícies acessíveis de um motor elétrico, tais como nos mancais, na carcaça, nas saídas de ar da carcaça e nas saídas de ar dos dutos.

Desta forma, a aquisição dos valores de temperatura deste projeto foi realizada através do conjunto de termistores NTC 3950, que foram inseridos na carcaça do motor em diferentes pontos, dois localizados na superfície das aletas e um localizado no interior da caixa de ligação, buscando obter um maior número de dados de temperatura.

Além disso, os sensores foram fixados junto à superfície do motor através de fitas isolantes e foi empregado uma pasta térmica para auxiliar a condução de calor no contato do sensor com a superfície. Ressalta-se que a validação dos valores de temperatura será realizada confrontando os dados obtidos de cada sensor com os dados obtidos pelo termômetro digital infravermelho.

### 3.2.3 Aquisição dos valores de corrente

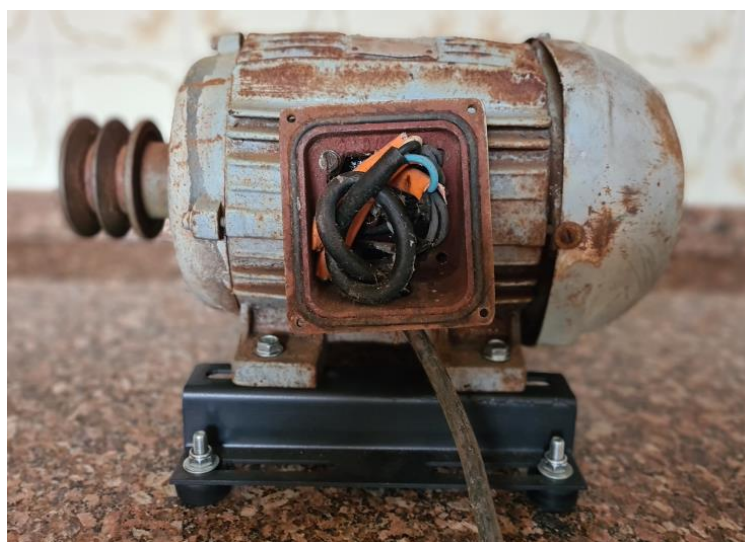
A metodologia empregada na aquisição dos valores de corrente elétrica deste trabalho é baseada em um método não invasivo que emprega transformadores de corrente, que são equipamentos que operam através da indução de um campo magnético, gerado através da passagem de uma corrente elétrica por um núcleo ferromagnético circular. Ressalta-se que o campo magnético gerado nos polos do equipamento é proporcional à corrente elétrica que passa pelo mesmo.

Desta forma, a aquisição dos valores de corrente elétrica deste projeto foi realizada através do conjunto de sensores de corrente SCT013-100, que foram inseridos individualmente nos condutores de cada fase do motor, a fim de evitar somas ou cancelamentos das correntes elétricas. Ressalta-se que a validação dos valores de corrente foi realizada confrontando os dados obtidos de cada sensor com os dados obtidos pelo alicate amperímetro digital.



**Figura 22 – Motor Eberle S80 1 CV**  
**Fonte: Autoria Própria**

Por fim, tanto as aquisições de temperatura quanto de corrente foram realizadas em dois motores distintos, um motor Eberle S80 1 CV, como demonstrado na Figura 22, e um motor Weg 100L 5 CV, como demonstrado na Figura 23. Primeiramente, os motores foram colocados em atividade por um período de 30 minutos, a fim de atingirem uma condição de operação onde a temperatura estivesse estável, depois, o sistema de monitoramento foi acionado para a coleta de dados com 3 repetições de 15 minutos cada.



**Figura 23 – Motor Weg 100L 5 CV**  
**Fonte: Autoria Própria**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados e discussões acerca dos dados coletados durante o desenvolvimento do trabalho. O objetivo deste é expor ao leitor as análises realizadas sobre os parâmetros de temperatura e de corrente dos motores avaliados, e debater sobre os custos para a implementação do sistema de monitoramento.

### 4.1 PARÂMETROS DE OPERAÇÃO

As próximas seções abordam e fazem uma reflexão das análises realizadas acerca dos parâmetros operacionais: corrente de alimentação e temperatura dos motores de indução trifásicos apresentados no capítulo anterior. Ressalta-se que o estudo realizado empregou a estatística descritiva como principal ferramenta de análise, a fim de sintetizar o comportamento e as características dos conjuntos de dados obtidos pelo sistema.

#### 4.1.1 Corrente de alimentação

Seguindo os procedimentos descritos no capítulo anterior, coletou-se os parâmetros operacionais, extraiu-se os dados relativos as correntes de alimentação para cada período amostral proposto (testes) e posteriormente, realizou-se a compilação desses, para a inclusão dos mesmos no software de análises estatísticas Minitab.

Assim, iniciando-se por uma análise descritiva dos valores de corrente do motor Eberle S80 1 CV, via software Minitab, obteve-se a média, o erro padrão da média, o desvio padrão, o valor mínimo, a mediana e o valor máximo para as três fases do sistema de alimentação, coletados em três repetições distintas, conforme demonstrado nas Tabelas 2 a 4.

**Tabela 2 – Análise estatística dos dados da corrente 1 – Motor Eberle**

Corrente 1 (A)	Estatística Descritiva					
	Média	EP Média	$\sigma$	Mínimo	Mediana	Máximo
Teste 1	4,7244	0,00253	0,0310	4,6400	4,7300	4,8000
Teste 2	4,7447	0,00432	0,0529	4,6500	4,7400	4,8600
Teste 3	4,7331	0,00288	0,0353	4,6400	4,7600	4,8300

Fonte: Autoria própria

**Tabela 3 – Análise estatística dos dados da corrente 2 – Motor Eberle**

Corrente 2 (A)	Estatística Descritiva					
	Média	EP Média	$\sigma$	Mínimo	Mediana	Máximo
Teste 1	4,7404	0,00420	0,0514	4,6300	4,7300	4,8500
Teste 2	4,7375	0,00515	0,0631	4,5900	4,7400	4,8700
Teste 3	4,7276	0,00423	0,0518	4,5700	4,7300	4,8700

Fonte: Autoria própria

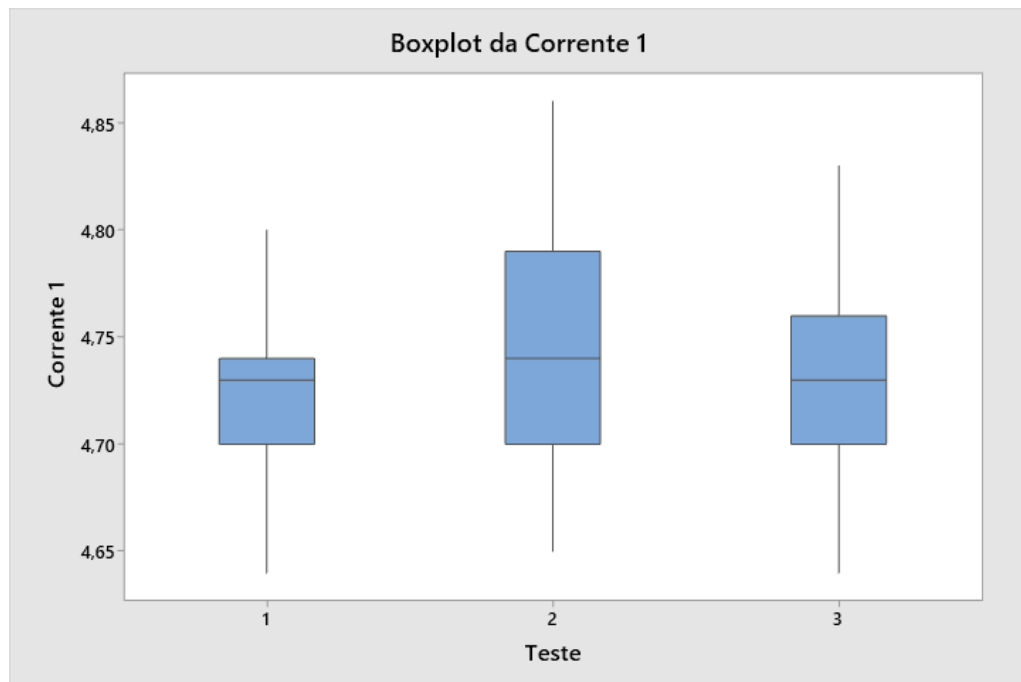
**Tabela 4 – Análise estatística dos dados da corrente 3 – Motor Eberle**

Corrente 3 (A)	Estatística Descritiva					
	Média	EP Média	$\sigma$	Mínimo	Mediana	Máximo
Teste 1	4,7447	0,00192	0,0236	4,6900	4,7400	4,8000
Teste 2	4,7341	0,00310	0,0380	4,6500	4,7400	4,8100
Teste 3	4,7239	0,00267	0,0327	4,6500	4,7200	4,8000

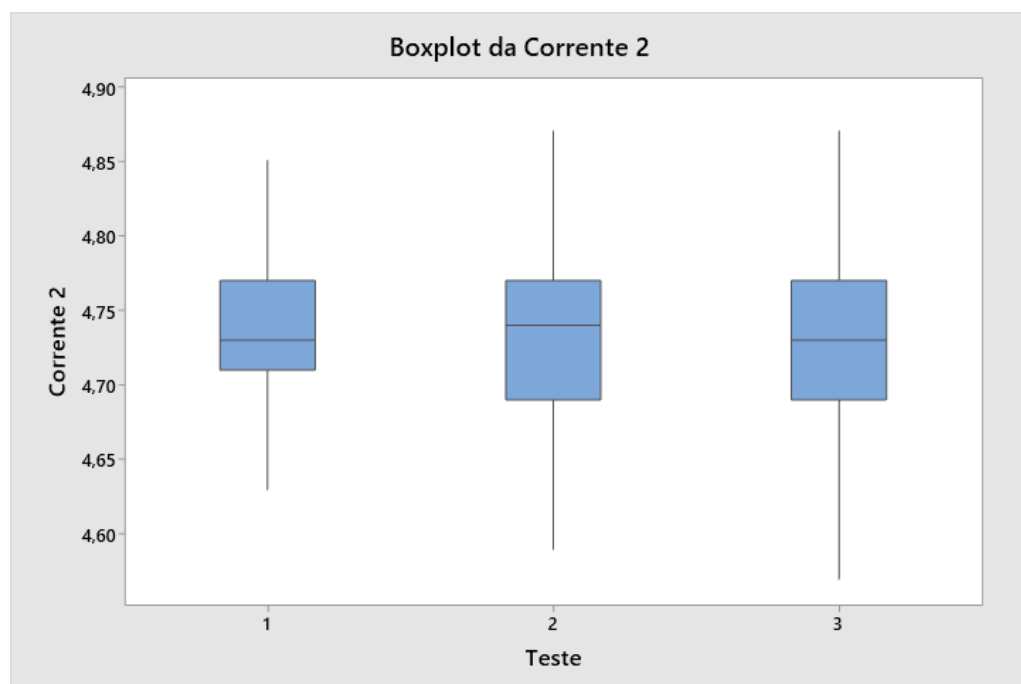
Fonte: Autoria própria

Avaliando a tendência central dos dados expostos nas tabelas acima, nota-se que as distribuições são simétricas, já que os valores da média e da mediana são muito próximos. Essa característica pode ser melhor observada através de gráficos de Boxplot, como demonstrado nos Gráficos 2 a 4, que expõem a posição, dispersão e simetria dos conjuntos de dados.

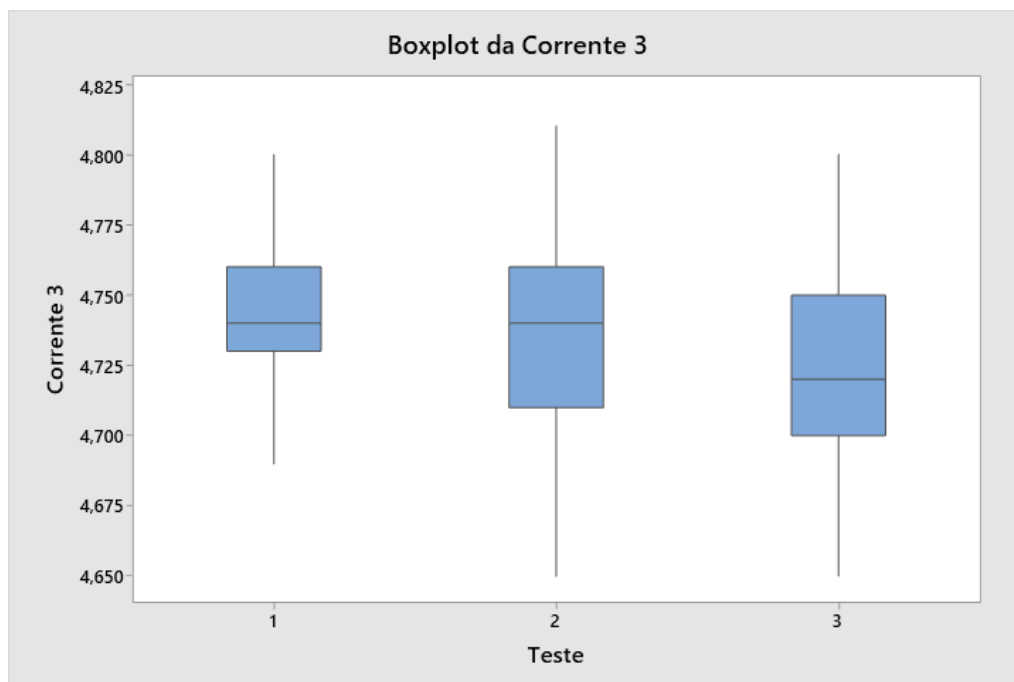
Através dos gráficos de Boxplot, nota-se que a localização dos dados não está deslocada para as regiões próximas aos limites superiores e inferiores, corroborando com a definição de que as distribuições são simétricas. Além disso, ressalta-se que à inexistência de pontos discrepantes (*outliers*), normalmente identificados com asteriscos, também corroboram com a definição acima, já que esses afetam drasticamente os valores da média, por serem pontos muito distantes do restante do conjunto de dados.



**Gráfico 2 – Gráfico de Boxplot da Corrente 1 – Motor Eberle**  
Fonte: Autoria própria



**Gráfico 3 – Gráfico de Boxplot da Corrente 2 – Motor Eberle**  
Fonte: Autoria própria



**Gráfico 4 – Gráfico de Boxplot da Corrente 3 – Motor Eberle**  
**Fonte: Autoria própria**

Avaliando o erro padrão da média e o desvio padrão dos conjuntos de dados, expostos nas Tabelas 2 a 4, nota-se que por conta dos baixos valores do erro padrão, há uma estimativa precisa entre as médias das amostras e a média da população. Além disso, por conta dos baixos valores do desvio padrão, pode-se afirmar que os conjuntos de dados apresentam um baixo grau de dispersão em relação às suas médias, como demonstrado nos gráficos de Boxplot.

Contrapondo os valores de mínimo e de máximo, expostos nas Tabelas 2 a 4, com os gráficos de Boxplot, nota-se que esses valores se mantiveram entre os limites superiores e inferiores, que são calculados através dos quartis e seus desvios interquartílicos, corroborando com a afirmação de que não houve a presença de *outliers*, que são pontos que representem erros ou condições anormais durante a coleta de dados.

Além disso, conforme demonstrado na Tabela 5, também foram calculados os erros das correntes médias em relação à corrente de referência da rede de alimentação, que foi obtida através da mensuração da corrente conduzida nas fases, empregando o alicate amperímetro descrito no capítulo anterior. Ressalta-se que os erros obtidos ficam localizados entre os valores de 2,69% e 3,15%, para um valor de corrente de referência de 4,6 A.

**Tabela 5 – Erro relativo dos dados de corrente média – Motor Eberle**

Erro (%)	Erro relativo percentual		
	Corrente 1	Corrente 2	Corrente 3
Teste 1	2,70%	3,05%	3,15%
Teste 2	3,15%	2,99%	2,92%
Teste 3	2,89%	2,77%	2,69%

Fonte: Autoria própria

Por fim, realizando-se uma análise descritiva dos valores de corrente do motor Weg 100L 5 CV, via software Minitab, obteve-se a média, o erro padrão da média, o desvio padrão, o valor mínimo, a mediana e o valor máximo para as três fases do sistema de alimentação, coletados em três repetições distintas, conforme demonstrado nas Tabelas 6 a 8.

**Tabela 6 – Análise estatística dos dados da corrente 1 – Motor Weg**

Corrente 1 (A)	Estatística Descritiva					
	Média	EP Média	$\sigma$	Mínimo	Mediana	Máximo
Teste 1	5,6236	0,00377	0,0462	5,5200	5,6250	5,7400
Teste 2	5,6136	0,00442	0,0541	5,5000	5,6100	5,7400
Teste 3	5,6171	0,00260	0,0319	5,5300	5,6200	5,6900

Fonte: Autoria própria

**Tabela 7 – Análise estatística dos dados da corrente 2 – Motor Weg**

Corrente 2 (A)	Estatística Descritiva					
	Média	EP Média	$\sigma$	Mínimo	Mediana	Máximo
Teste 1	5,6187	0,00483	0,0592	5,4800	5,6200	5,7400
Teste 2	5,6077	0,00667	0,0817	5,4400	5,6100	5,8100
Teste 3	5,6189	0,00411	0,0503	5,4600	5,6200	5,7200

Fonte: Autoria própria

**Tabela 8 – Análise estatística dos dados da corrente 3 – Motor Weg**

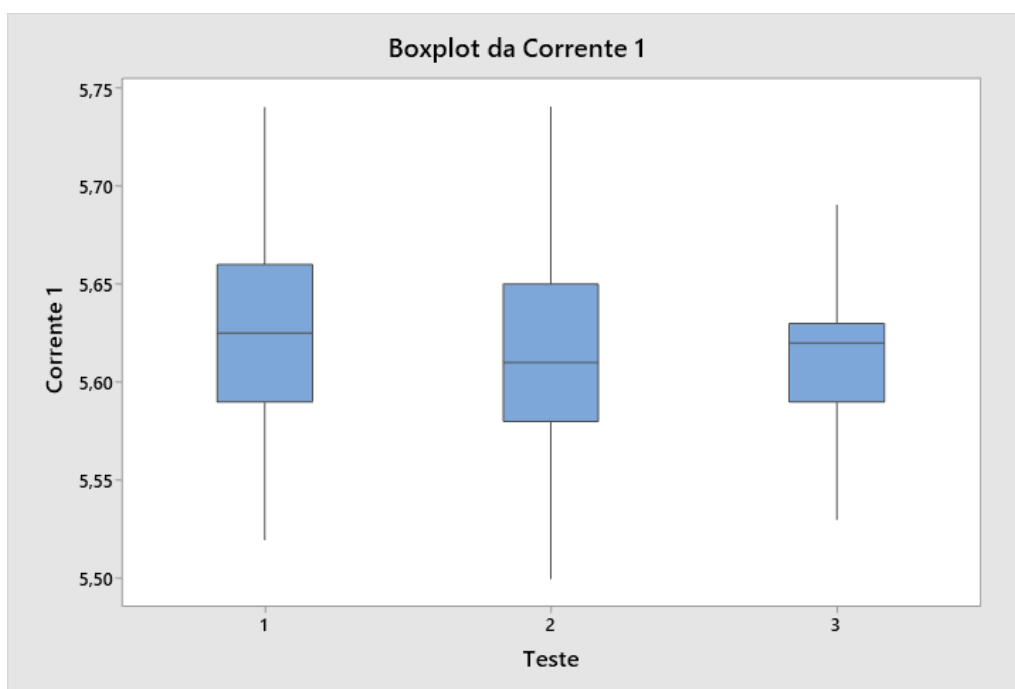
Corrente 3 (A)	Estatística Descritiva					
	Média	EP Média	$\sigma$	Mínimo	Mediana	Máximo
Teste 1	5,6187	0,00316	0,0387	5,5200	5,6200	5,7100
Teste 2	5,6077	0,00422	0,0517	5,4600	5,6100	5,7300
Teste 3	5,6189	0,00393	0,0482	5,5100	5,6100	5,7300

Fonte: Autoria própria

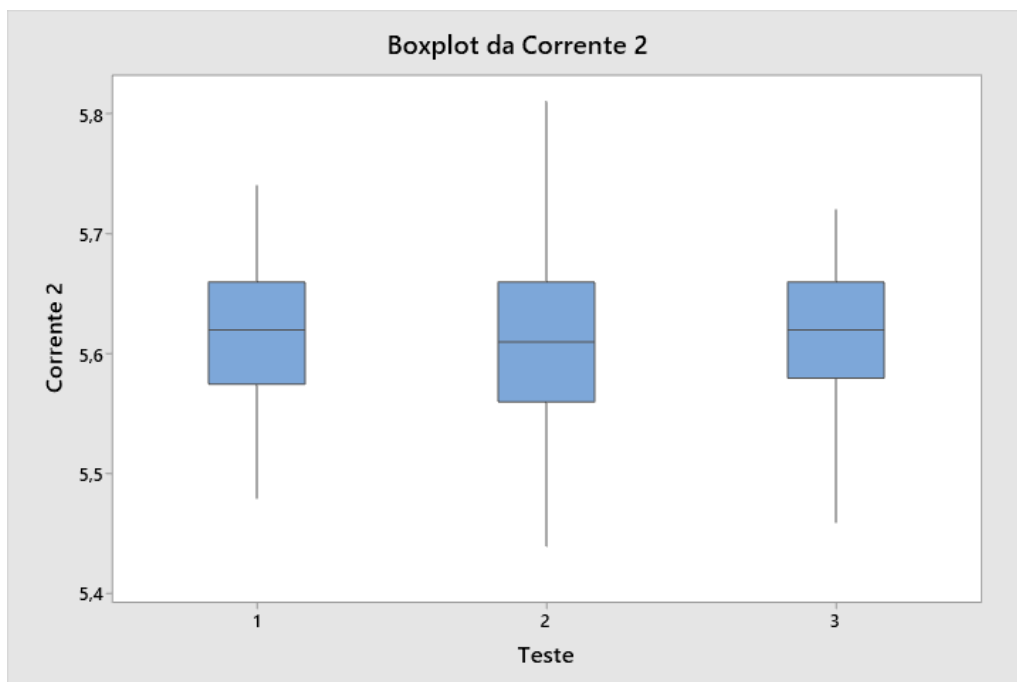


Avaliando a tendência central dos dados expostos nas tabelas acima, nota-se que as distribuições são simétricas, já que os valores da média e da mediana são muito próximos. Essa característica pode ser melhor observada através de gráficos de Boxplot, como demonstrado nos Gráficos 5 a 7, que expõem a posição, dispersão e simetria dos conjuntos de dados.

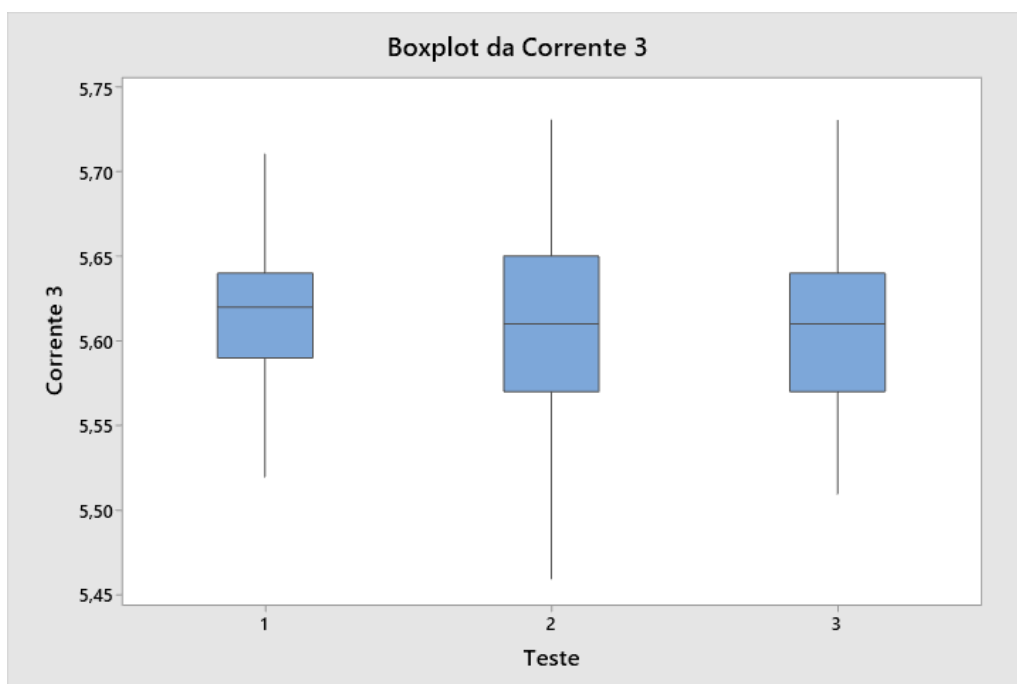
Através dos gráficos de bloxplot, nota-se que a localização dos dados não está deslocada para as regiões próximas aos limites superiores e inferiores, corroborando com a definição de que as distribuições são simétricas. Além disso, ressalta-se que à inexistência de pontos discrepantes (outliers), normalmente identificados com asteriscos, também corroboram com a definição acima, já que esses afetam drasticamente os valores da média, por serem pontos muito distantes do restante do conjunto de dados.



**Gráfico 5 – Gráfico de Boxplot da Corrente 1 – Motor Weg**  
**Fonte: Autoria própria**



**Gráfico 6 – Gráfico de Boxplot da Corrente 2 – Motor Weg**  
Fonte: Autoria própria



**Gráfico 7 – Gráfico de Boxplot da Corrente 3 – Motor Weg**  
Fonte: Autoria própria

Avaliando o erro padrão da média e o desvio padrão dos conjuntos de dados, expostos nas Tabelas 6 a 8, nota-se que por conta dos baixos valores do erro padrão, há uma estimativa precisa entre as médias das amostras e a média da

população. Além disso, por conta dos baixos valores do desvio padrão, pode-se afirmar que os conjuntos de dados apresentam um baixo grau de dispersão em relação às suas médias, como demonstrado nos gráficos de Boxplot.

Contraopondo os valores de mínimo e de máximo, expostos nas Tabelas 6 a 8, com os gráficos de Boxplot, nota-se que esses valores se mantiveram entre os limites superiores e inferiores, que são calculados através dos quartis e seus desvios interquartílicos, corroborando com a afirmação de que não houve a presença de *outliers*, que são pontos que representem erros ou condições anormais durante a coleta de dados.

Além disso, conforme demonstrado na Tabela 9, também foram calculados os erros das correntes médias em relação à corrente de referência da rede de alimentação, que foi obtida através da mensuração da corrente conduzida nas fases, empregando o alicate amperímetro descrito no capítulo anterior. Ressalta-se que os erros obtidos ficam localizados entre os valores de 1,96% e 2,25%, para um valor de corrente de referência de 5,5 A.

**Tabela 9 – Erro relativo dos dados de corrente média – Motor Weg**

Erro (%)	Erro relativo percentual		
	Corrente 1	Corrente 2	Corrente 3
Teste 1	2,25%	2,16%	2,16%
Teste 2	2,07%	1,96%	1,96%
Teste 3	2,13%	2,16%	2,16%

**Fonte: Autoria própria**

#### 4.1.2 Temperatura

Seguindo os procedimentos descritos no capítulo anterior, coletou-se os parâmetros operacionais, extraiu-se os dados relativos às temperaturas dos pontos avaliados para cada período amostral proposto (testes) e posteriormente, realizou-se a compilação desses, para a inclusão dos mesmos no software de análises estatísticas Minitab.

Assim, iniciando-se por uma análise descritiva dos valores de temperatura do motor Eberle S80 1 CV, via software Minitab, obteve-se a média, o erro padrão da média, o desvio padrão, o valor mínimo, a mediana e o valor máximo para os três

pontos do motor, coletados em três repetições distintas, conforme demonstrado nas Tabelas 10 a 12.

**Tabela 10 – Análise estatística dos dados da temperatura 1 – Motor Eberle**

Temperatura 1 (°C)	Estatística Descritiva					
	Média	EP Média	$\sigma$	Mínimo	Mediana	Máximo
Teste 1	61,724	0,0921	1,128	59,330	61,785	64,320
Teste 2	61,806	0,0806	0,987	59,690	61,815	63,760
Teste 3	61,844	0,122	1,500	58,380	62,045	64,720

Fonte: Autoria própria

**Tabela 11 – Análise estatística dos dados da temperatura 2 – Motor Eberle**

Temperatura 2 (°C)	Estatística Descritiva					
	Média	EP Média	$\sigma$	Mínimo	Mediana	Máximo
Teste 1	50,907	0,0544	0,666	49,330	50,770	52,710
Teste 2	50,730	0,0618	0,757	49,080	50,600	52,360
Teste 3	50,768	0,0539	0,661	49,160	50,705	52,390

Fonte: Autoria própria

**Tabela 12 – Análise estatística dos dados da temperatura 3 – Motor Eberle**

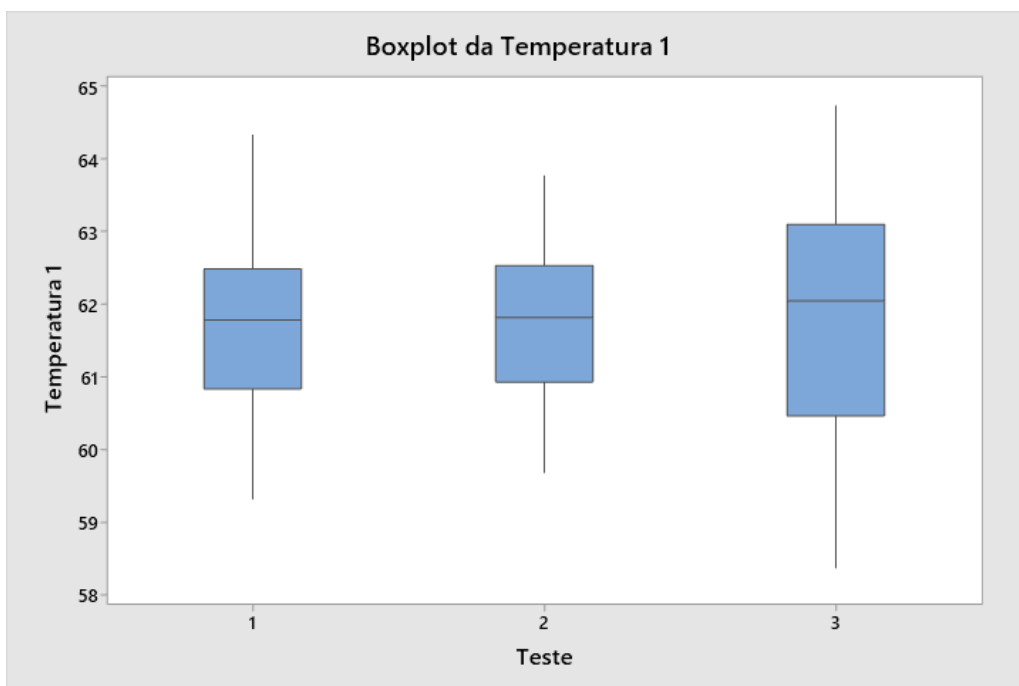
Temperatura 3 (°C)	Estatística Descritiva					
	Média	EP Média	$\sigma$	Mínimo	Mediana	Máximo
Teste 1	57,005	0,0536	0,657	55,500	57,140	58,550
Teste 2	57,074	0,0291	0,356	56,210	57,075	58,000
Teste 3	57,141	0,0371	0,454	56,400	57,130	58,260

Fonte: Autoria própria

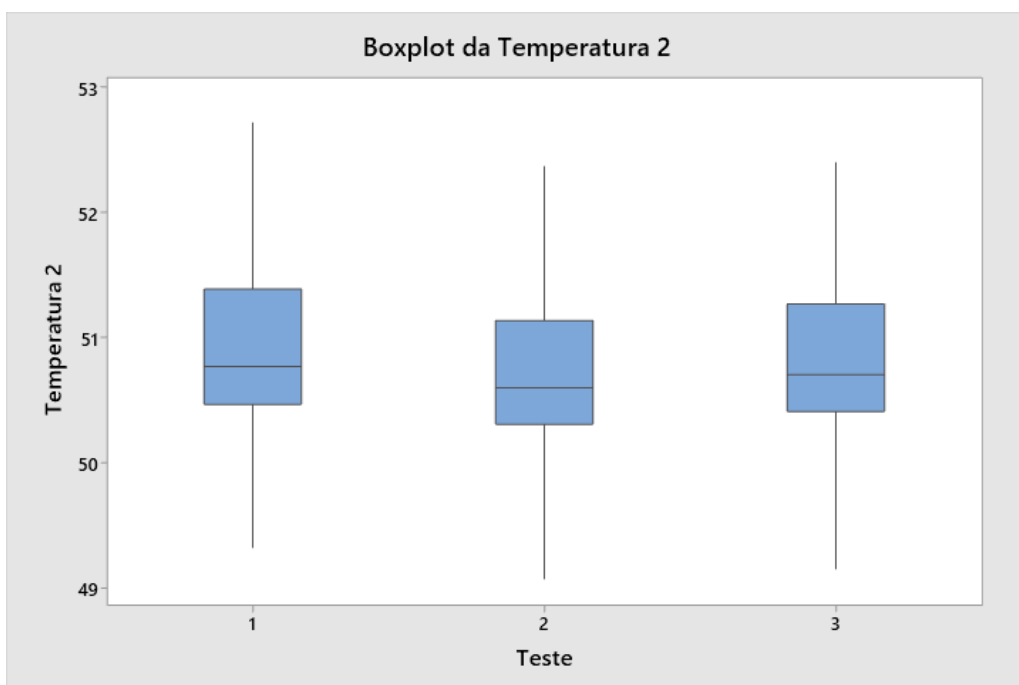
Avaliando a tendência central dos dados expostos nas tabelas acima, nota-se que as distribuições são simétricas, já que os valores da média e da mediana são muito próximos. Essa característica pode ser melhor observada através de gráficos de Boxplot, como demonstrado nos Gráficos 8 a 10, que expõem a posição, dispersão e simetria dos conjuntos de dados.

Através dos gráficos de Boxplot, nota-se que a localização dos dados não está deslocada para as regiões próximas aos limites superiores e inferiores, corroborando com a definição de que as distribuições são simétricas. Além disso, ressalta-se que à inexistência de pontos discrepantes (*outliers*), normalmente identificados com asteriscos, também corroboram com a definição acima, já que

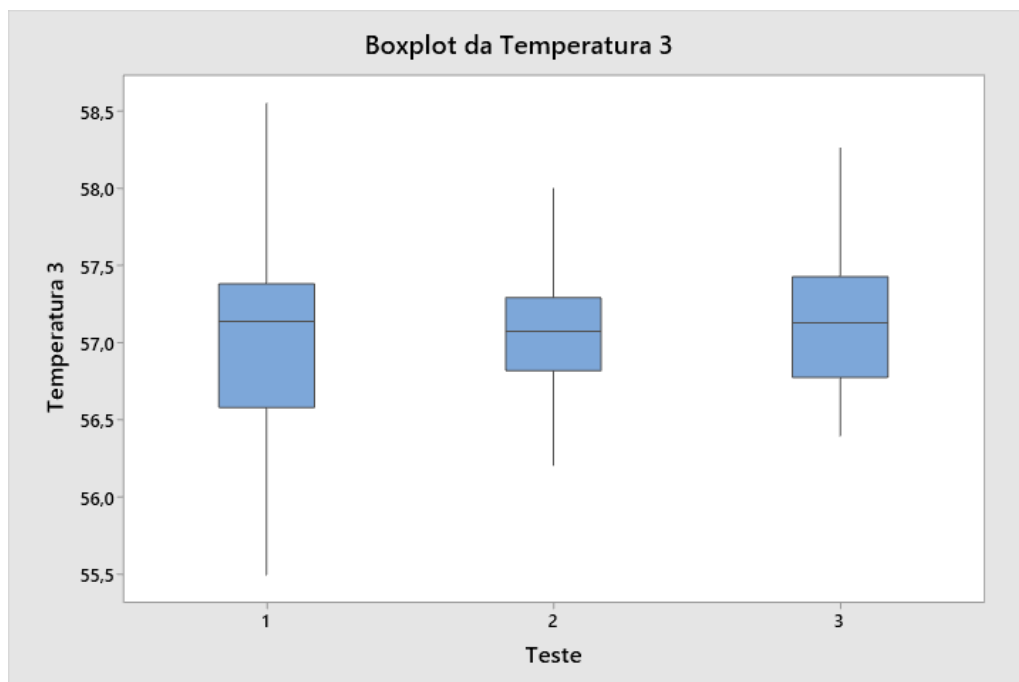
esses afetam drasticamente os valores da média, por serem pontos muito distantes do restante do conjunto de dados.



**Gráfico 8 – Gráfico de Boxplot da Temperatura 1 – Motor Eberle**  
Fonte: Autoria própria



**Gráfico 9 – Gráfico de Boxplot da Temperatura 2 – Motor Eberle**  
Fonte: Autoria própria



**Gráfico 10 – Gráfico de Boxplot da Temperatura 3 – Motor Eberle**  
**Fonte: Autoria própria**

Avaliando o erro padrão da média e o desvio padrão dos conjuntos de dados, expostos nas Tabelas 10 a 12, nota-se que por conta dos baixos valores do erro padrão, há uma estimativa precisa entre as médias das amostras e a média da população. Além disso, por conta dos baixos valores do desvio padrão, pode-se afirmar que os conjuntos de dados apresentam um baixo grau de dispersão em relação as suas médias, como demonstrado nos gráficos de Boxplot.

Contrapondo os valores de mínimo e de máximo, expostos nas Tabelas 10 a 12, com os gráficos de Boxplot, nota-se que esses valores se mantiveram entre os limites superiores e inferiores, que são calculados através dos quartis e seus desvios interquartílicos, corroborando com a afirmação de que não houve a presença de *outliers*, que são pontos que represem erros ou condições anormais durante a coleta de dados.

Além disso, conforme demonstrado na Tabela 13, também foram calculados os erros das temperaturas médias em relação as temperaturas de referências dos pontos analisados, que foram obtidas através da mensuração da temperatura nas superfícies, empregando o termômetro digital infravermelho descrito no capítulo anterior.

Ressalta-se que diferentemente dos dados de corrente, que apresentavam um único valor de referência, já que todas as fases devem estar sujeitas a mesma corrente de alimentação quando os motores estiverem conformes, os dados de temperatura possuem valores de referência para cada ponto avaliado já que cada um deles estão expostos a uma condição diferente de transferência de calor.

No caso da temperatura 1, que representa a temperatura no interior da caixa de ligação, que é uma superfície que não estava exposta à convecção forçada do ventilador, os erros obtidos ficam localizados entre os valores de 2,53% e 2,73%, para um valor de temperatura de referência de 60,2 °C.

Já no caso da temperatura 2, que representa a temperatura sobre as aletas da carcaça do motor, que é uma superfície que estava diretamente exposta à convecção forçada do ventilador, os erros obtidos ficam localizados entre os valores de 2,28% e 2,64%, para um valor de temperatura de referência de 49,6 °C.

Já no caso da temperatura 3, que representa a temperatura sobre a carcaça do motor, que é uma superfície que estava eventualmente exposta à convecção forçada do ventilador, os erros obtidos ficam localizados entre os valores de 1,25% e 1,49%, para um valor de temperatura de referência de 56,3 °C.

**Tabela 13 – Erro relativo dos dados de temperatura média – Motor Eberle**

Erro (%)	Erro relativo percentual		
	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3
Teste 1	2,53%	2,64%	1,25%
Teste 2	2,67%	2,28%	1,37%
Teste 3	2,73%	2,35%	1,49%

**Fonte: Autoria própria**

Por fim, realizando-se uma análise descritiva dos valores de temperatura do motor Weg 100L 5 CV, via software Minitab, obteve-se a média, o erro padrão da média, o desvio padrão, o valor mínimo, a mediana e o valor máximo para os três pontos do motor, coletados em três repetições distintas, conforme demonstrado nas Tabelas 14 a 15.

**Tabela 14 – Análise estatística dos dados da temperatura 1 – Motor Weg**

Temperatura 1 (°C)	Estatística Descritiva					
	Média	EP Média	$\sigma$	Mínimo	Mediana	Máximo
Teste 1	34,063	0,0158	0,194	33,660	34,030	34,600
Teste 2	34,020	0,0125	0,153	33,690	34,020	34,370
Teste 3	34,006	0,0145	0,178	33,620	33,990	34,430

Fonte: Autoria própria

**Tabela 15 – Análise estatística dos dados da temperatura 2 – Motor Weg**

Temperatura 2 (°C)	Estatística Descritiva					
	Média	EP Média	$\sigma$	Mínimo	Mediana	Máximo
Teste 1	30,668	0,0134	0,164	30,250	30,700	31,010
Teste 2	30,652	0,0168	0,206	30,150	30,650	31,060
Teste 3	30,667	0,0199	0,244	30,160	30,655	31,290

Fonte: Autoria própria

**Tabela 16 – Análise estatística dos dados da temperatura 3 – Motor Weg**

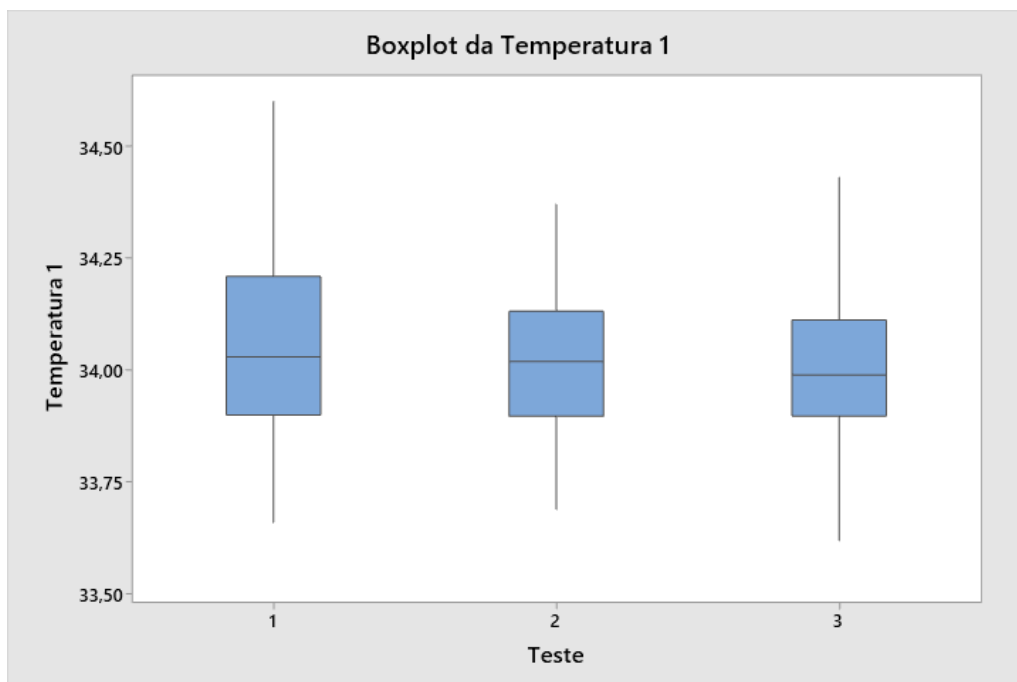
Temperatura 3 (°C)	Estatística Descritiva					
	Média	EP Média	$\sigma$	Mínimo	Mediana	Máximo
Teste 1	27,248	0,0139	0,170	26,830	27,250	27,690
Teste 2	27,272	0,0128	0,156	26,870	27,270	27,650
Teste 3	27,230	0,0165	0,202	26,790	27,200	27,720

Fonte: Autoria própria

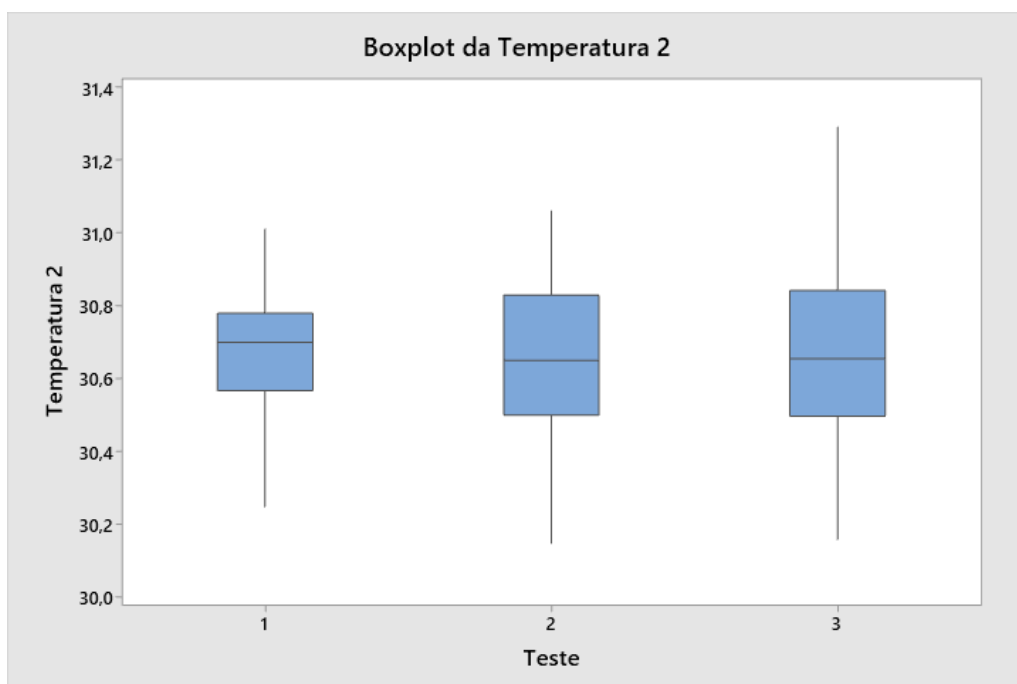
Avaliando a tendência central dos dados expostos nas tabelas acima, nota-se que as distribuições são simétricas, já que os valores da média e da mediana são muito próximos. Essa característica pode ser melhor observada através de gráficos de Boxplot, como demonstrado nos Gráficos 11 a 13, que expõem a posição, dispersão e simetria dos conjuntos de dados.

Através dos gráficos de Boxplot, nota-se que a localização dos dados não está deslocada para as regiões próximas aos limites superiores e inferiores, corroborando com a definição de que as distribuições são simétricas. Além disso, ressalta-se que à inexistência de pontos discrepantes (*outliers*), normalmente identificados com asteriscos, também corroboram com a definição acima, já que esses afetam drasticamente os valores da média, por serem pontos muito distantes do restante do conjunto de dados.

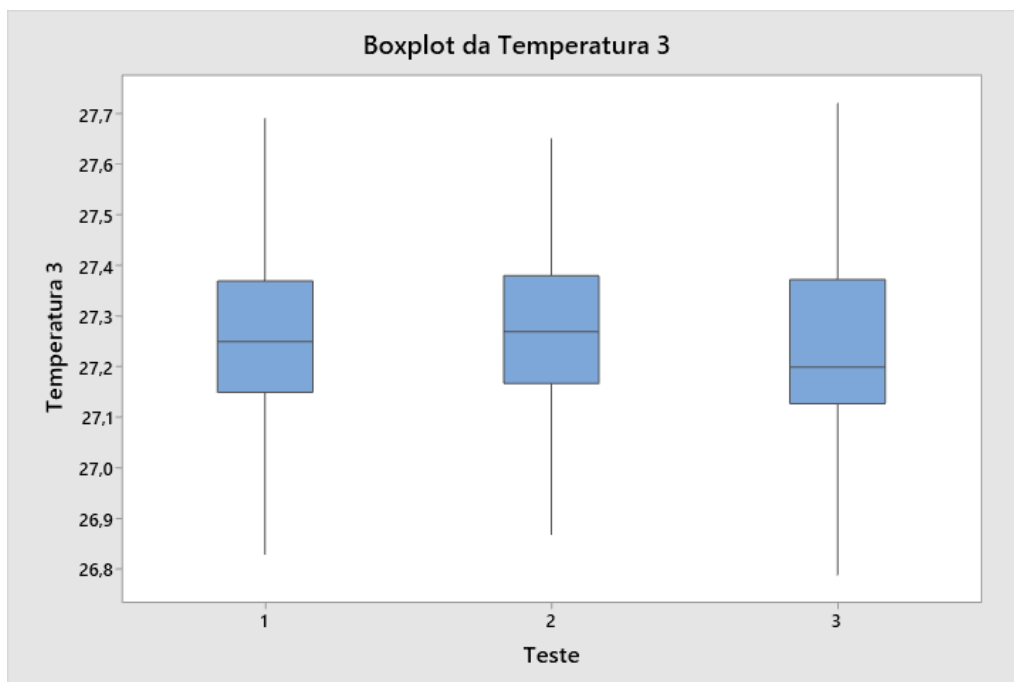




**Gráfico 11 – Gráfico de Boxplot da Temperatura 1 – Motor Weg**  
Fonte: Autoria própria



**Gráfico 12 – Gráfico de Boxplot da Temperatura 2 – Motor Weg**  
Fonte: Autoria própria



**Gráfico 13 – Gráfico de Boxplot da Temperatura 3 – Motor Weg**  
Fonte: Autoria própria

Avaliando o erro padrão da média e o desvio padrão dos conjuntos de dados, expostos nas Tabelas 14 a 16, nota-se que por conta dos baixos valores do erro padrão, há uma estimativa precisa entre as médias das amostras e a média da população. Além disso, por conta dos baixos valores do desvio padrão, pode-se afirmar que os conjuntos de dados apresentam um baixo grau de dispersão em relação às suas médias, como demonstrado nos gráficos de Boxplot.

Contrapondo os valores de mínimo e de máximo, expostos nas Tabelas 14 a 16, com os gráficos de Boxplot, nota-se que esses valores se mantiveram entre os limites superiores e inferiores, que são calculados através dos quartis e seus desvios interquartílicos, corroborando com a afirmação de que não houve a presença de *outliers*, que são pontos que representem erros ou condições anormais durante a coleta de dados.

Além disso, conforme demonstrado na Tabela 17, também foram calculados os erros das temperaturas médias em relação às temperaturas de referências dos pontos analisados, que foram obtidas através da mensuração da temperatura nas superfícies, empregando o termômetro digital infravermelho descrito no capítulo anterior.

Ressalta-se que diferentemente dos dados de corrente, que apresentavam um único valor de referência, já que todas as fases devem estar sujeitas a mesma corrente de alimentação quando os motores estiverem conformes, os dados de temperatura possuem valores de referência para cada ponto avaliado, já que cada um deles estão expostos a uma condição diferente de transferência de calor.

No caso da temperatura 1, que representa a temperatura no interior da caixa de ligação, que é uma superfície que não estava exposta à convecção forçada do ventilador, os erros obtidos ficam localizados entre os valores de 3,05% e 3,22%, para um valor de temperatura de referência de 33,0 °C.

Já no caso da temperatura 2, que representa a temperatura sobre as aletas da carcaça do motor, que é uma superfície que estava eventualmente exposta à convecção forçada do ventilador, os erros obtidos ficam localizados entre os valores de 2,86% e 2,91%, para um valor de temperatura de referência de 29,8 °C.

Já no caso da temperatura 3, que representa a temperatura sobre a carcaça do motor, que é uma superfície que estava diretamente exposta à convecção forçada do ventilador, os erros obtidos ficam localizados entre os valores de 2,75% e 2,91%, para um valor de temperatura de referência de 26,5 °C.

**Tabela 17 – Erro relativo dos dados de temperatura média – Motor Weg**

Erro (%)	Erro relativo percentual		
	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3
Teste 1	3,22%	2,91%	2,82%
Teste 2	3,09%	2,86%	2,91%
Teste 3	3,05%	2,91%	2,75%

**Fonte: Autoria própria**

## 4.2 CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO

A fim de estimar o custo de implementação do sistema de monitoramento proposto neste trabalho, foi realizado um levantamento acerca do aporte necessário para a aquisição e fabricação dos componentes descritos no capítulo anterior. O resultado dessa verificação está exposto na Tabela 18, que demonstra os principais componentes, as quantidades utilizadas, os custos unitários, assim como o valor total por componente e do projeto.

**Tabela 18 – Custo de implementação do sistema**

<b>Componente</b>	<b>Custo de aquisição e fabricação por componente</b>		
	Quantidade	Preço	Valor
Arduino Pro Mini	1	42,80	42,80
Termistores NTC 3950	3	10,14	30,42
Sensores SCT013-100	3	45,90	137,70
Módulo RF wireless HC-12	2	44,95	89,90
Módulo RTC DS3231	1	15,00	15,00
Módulo micro SD	1	11,49	11,49
Módulo USB	1	14,85	14,85
Arduino UNO	1	31,5	31,50
Placa de Circuito Impresso	1	10,00	10,00
Bateria 9 V	1	34,00	34,00
Invólucro	1	45,00	45,00
Capacitores 10uF	3	0,12	0,36
Micro resistores de 100 k $\Omega$	3	0,05	0,15
Micro resistores de 10 k $\Omega$	6	0,05	0,30
Micro resistores de 38 $\Omega$	3	0,05	0,15
<b>Total</b>			<b>463,62</b>

**Fonte: Autoria própria**

Portanto, o sistema proposto teve um custo total de implementação de R\$ 463,62, entregando um valor de aquisição inferior quando comparado com soluções comerciais. Por exemplo, pode-se citar o Ability Smart Sensor, que é um sensor desenvolvido e comercializado pela ABB, que possui um valor de £ 106,00, representando R\$ 769,56 na conversão monetária, comprovando a diferença entre o custo do sistema desenvolvido e de uma solução comercial.

## 5 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi desenvolvido um sistema de monitoramento dos parâmetros de operação de motores elétricos de indução trifásicos, visando fornecer uma solução compacta, robusta e de baixo custo para a implementação da filosofia de manutenção preditiva em um ambiente industrial. Para isso, foram empregadas soluções da prototipagem eletrônica, tais como plataformas de prototipagem, módulos, sensores e placas de circuito integrado, buscando fornecer uma alternativa a sistemas de monitoramentos muito onerosos.

O sistema de monitoramento da corrente de alimentação e da temperatura mostrou-se eficiente em relação à medição e ao armazenamento dos valores coletados. Porém, o sistema de transmissão dos dados via radiofrequência se mostrou deficiente, já que durante o desenvolvimento do trabalho a transmissão do sinal apresentou períodos de instabilidade e por fim acabou sendo interrompida por completo.

A metodologia de monitoramento dos parâmetros se mostrou eficiente para o acompanhamento em tempo real das condições de operação de motores de indução trifásicos. Ressalta-se apenas que seria ideal o desenvolvimento de um componente para facilitar a fixação e o contato dos sensores de temperatura, já que os mesmos durante o desenvolvimento do trabalho, foram fixados utilizando fita isolante, uma solução não muito prática e flexível.

Por fim, para trabalhos futuros, sugere-se buscar soluções para a transmissão dos dados via rádio frequência e para a fixação dos sensores de temperatura, além de otimizar o design do sistema, buscar alternativas mais eficientes para o monitoramento dos parâmetros, correlacionar os dados com condições de não conformidade dos motores e implementar uma coleta de parâmetros de vibração.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. T. Manutenção Preditiva: Confiabilidade e Qualidade. **Revista Indústria em Foco**, 2007.

ARDUINO. **Arduino Pro Mini**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/ArduinoBoardProMini>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

ARDUINO. **Arduino Uno REV3**. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>>. Acesso em: 7 jul. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

BACCARINI, L. M. R.; DE MENEZES, B. R.; GUIMARÃES, H. N. **Detecção e Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução**. Tese de Doutorado — Belo Horizonte: UFMG, 2005.

BARNES, M. **Practical variable speed drives and power electronics**. Oxford: Newnes, 2003.

BEN-DAYA, M. et al. (EDS.). **Handbook of Maintenance Management and Engineering**. London: Springer London, 2009.

BORGES, J. G. **Aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA) no Diagnóstico de Defeitos em Rolamentos através da Assinatura Elétrica de Motores de Indução**. Tese de Mestrado — Itajubá: UNIFEI, 2008.

BRAZILEIRO, R. B. **tAMARINO: uma abordagem visual para prototipagem rápida em computação física**. Tese de Mestrado — Recife: UFPE, 2013.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS. **Indústria 4.0: Entenda seus conceitos e fundamentos**. Disponível em: <<http://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/industria-4-0/>>. Acesso em: 7 jul. 2021.

DEL TORO, V. **Basic electric machines**. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall, 1990.

DELOITTE. **Predictive Maintenance**. Berlin: Deloitte Consulting, 2017.

DEMETRAS, E. **SCT-013 - SENSOR DE CORRENTE ALTERNADA COM ARDUINO**. Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/sct-013-sensor-de-corrente-alternada/>>. Acesso em: 13 jul. 2021.

ELECTROPEAK. **NTC 3950 Thermistor 100K with 1 Meter Cable Wire**. Disponível em: <<https://electropeak.com/ntc-thermistor-100k-1-3950-resistant-to-200-degrees>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

EL-FERIK, S.; BEN-DAYA, M. Model for imperfect age-based preventive maintenance with age reduction. **Journal of the Operational Research Society**, v. 59, n. 12, p. 1644–1651, dez. 2008.

GOMES, J. **Disciplina: Redes de Computadores** Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/1774253/>>. Acesso em: 7 jul. 2021.

GONZALEZ-PARADA, A. et al. Computational Modeling of Common Failures in Electrical Induction Machines. **International Journal of Computer and Electrical Engineering**, v. 7, n. 6, p. 417–423, 2015.

GURU, B. S.; HIZIROĞLU, H. R. **Electric machinery and transformers**. 3rd. ed. New York: Oxford University Press, 2001.

HANSEN, R. C. **Overall equipment effectiveness: a powerful production/maintenance tool for increased profits**. 1st. ed. New York: Industrial Press, 2002.

HARTMANN, B. et al. **Reflective physical prototyping through integrated design, test, and analysis**. . In: THE 19TH ANNUAL ACM SYMPOSIUM. Montreux, Switzerland: ACM Press, 2006.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Implementation strategies and tools for condition based monitoring at nuclear power plants**. Vienna: IAEA, 2007.

KIANE, R. **Conheça o Arduino e o seu papel no makerspace**. Disponível em: <<https://via.ufsc.br/arduino-e-o-seu-papel-no-makerspace/>>. Acesso em: 23 ago. 2020.

KNÜPPE, L. **Máquinas I - campo girante trifásico**. Disponível em: <<http://leoknuppe.wordpress.com/2013/11/07/272/>>. Acesso em: 2 ago. 2020.

KOTHAMASU, R.; HUANG, S. H.; VERDUIN, W. H. System Health Monitoring and Prognostics – A Review of Current Paradigms and Practices. In: **Handbook of Maintenance Management and Engineering**. London: Springer London, 2009. p. 337–362.

LIMA, J.; SANTOS, A.; SAMPAIO, R. **Sistemas de gestão da manutenção - uma revisão bibliográfica visando estabelecer critérios para avaliação de maturidade**. In: XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. São Carlos, Brasil: 2010.

LINESSIO, R. P. **Caracterização de um acelerômetro óptico biaxial para monitoramento de vibrações em máquinas elétricas**. Tese de Mestrado — Curitiba: UTFPR, 2016.

MAKER PORTAL. **Arduino Thermistor Theory, Calibration, and Experiment**. Disponível em: <<https://makersportal.com/blog/2019/1/15/arduino-thermistor-theory-calibration-and-experiment>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

MCCOY, R. M. et al. **Improved motors for utility applications. Volume 1. Industry assessment study: update and analysis. Final report**. United States: OSTI, 1 set. 1985.

MINIPA. **Visão Geral – Alicates Amperímetro**. Disponível em: <<https://www.minipa.com.br/alicates-produtos/alicates-digitais/32-et-3111>>. Acesso em: 24 jul. 2021.

NANDI, S. et al. Detection of Eccentricity Faults in Induction Machines Based on Nameplate Parameters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 58, n. 5, p. 1673–1683, maio 2011.

O'DONNELL, P. Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-21, n. 4, p. 853–864, 1985a.



O'DONNELL, P. Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part II. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-21, n. 4, p. 865–872, 1985b.

O'DONNELL, P. Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part III. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-23, n. 1, p. 153–158, jan. 1987.

OLIVEIRA, E. **Como usar com Arduino – Sensor de Temperatura NTC 100K 3950 para Impressora 3D**. Disponível em: <<https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-sensor-de-temperatura-ntc-100k-3950-para-impressora-3d>>. Acesso em: 12 out. 2021.

OTANI, M.; MACHADO, W. V. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. **Revista Gestão Industrial**, v. 4, n. 2, 1 nov. 2008.

POÓR, P.; ŽENÍŠEK, D.; BASL, J. **Historical Overview of Maintenance Management Strategies: Development from Breakdown Maintenance to Predictive Maintenance in Accordance with Four Industrial Revolutions**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT. 2019.

PROGRESSIVE AUTOMATIONS. **Actuator as a keystone of motion**. Disponível em: <<https://www.progressiveautomations.com/pages/actuators>>. Acesso em: 7 jul. 2021.

RODRIGUES, GUILHERME. **O que falta para o desenvolvimento da indústria 4.0 no Brasil?** Disponível em: <<https://certi.org.br/blog/industria-4-0-no-brasil/>>. Acesso em: 7 jul. 2021.

SCHMIDT, P. N. DA S. **A qualidade de placas de circuito impresso confeccionadas a partir de poliestireno reciclado**. Tese de Mestrado — Guaratinguetá: UNESP, 2012.

SLACK, N. et al. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

SOLUÇÕES INDUSTRIAIS. **Rotores bobinados**. Disponível em: <[https://www.solucoesindustriais.com.br/images/produtos/imagens\\_11088/p\\_venda-de-rotor-preco\\_11088\\_62022\\_3.jpg](https://www.solucoesindustriais.com.br/images/produtos/imagens_11088/p_venda-de-rotor-preco_11088_62022_3.jpg)>. Acesso em: 16 jun. 2021.

SPARKFUN ELECTRONICS. **Arduino Pro Mini 328 - 5V/16MHz**. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/products/11113>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

STANLEY. **Visão Geral – Medidor de Temperatura Digital**. Disponível em: <[https://br.stanleytools.global/ptbr/Hand\\_Tools\\_Electronic\\_Tools\\_Stud\\_Sensors\\_Detectors\\_Inspection\\_Cameras/product/STHT77365/medidor-de-temperatura-digital](https://br.stanleytools.global/ptbr/Hand_Tools_Electronic_Tools_Stud_Sensors_Detectors_Inspection_Cameras/product/STHT77365/medidor-de-temperatura-digital)>. Acesso em: 24 jul. 2021.

TEIXEIRA, E. L. G. **Comportamento de um gerador de indução trifásico autoexcitado**. Trabalho de conclusão de curso—Rio de Janeiro: UFRJ, 2018.

UMANS, S. D.; FITZGERALD, A. E. **Fitzgerald & Kingsley's electric machinery**. 7th. ed. New York: McGraw-Hill Companies, 2014.

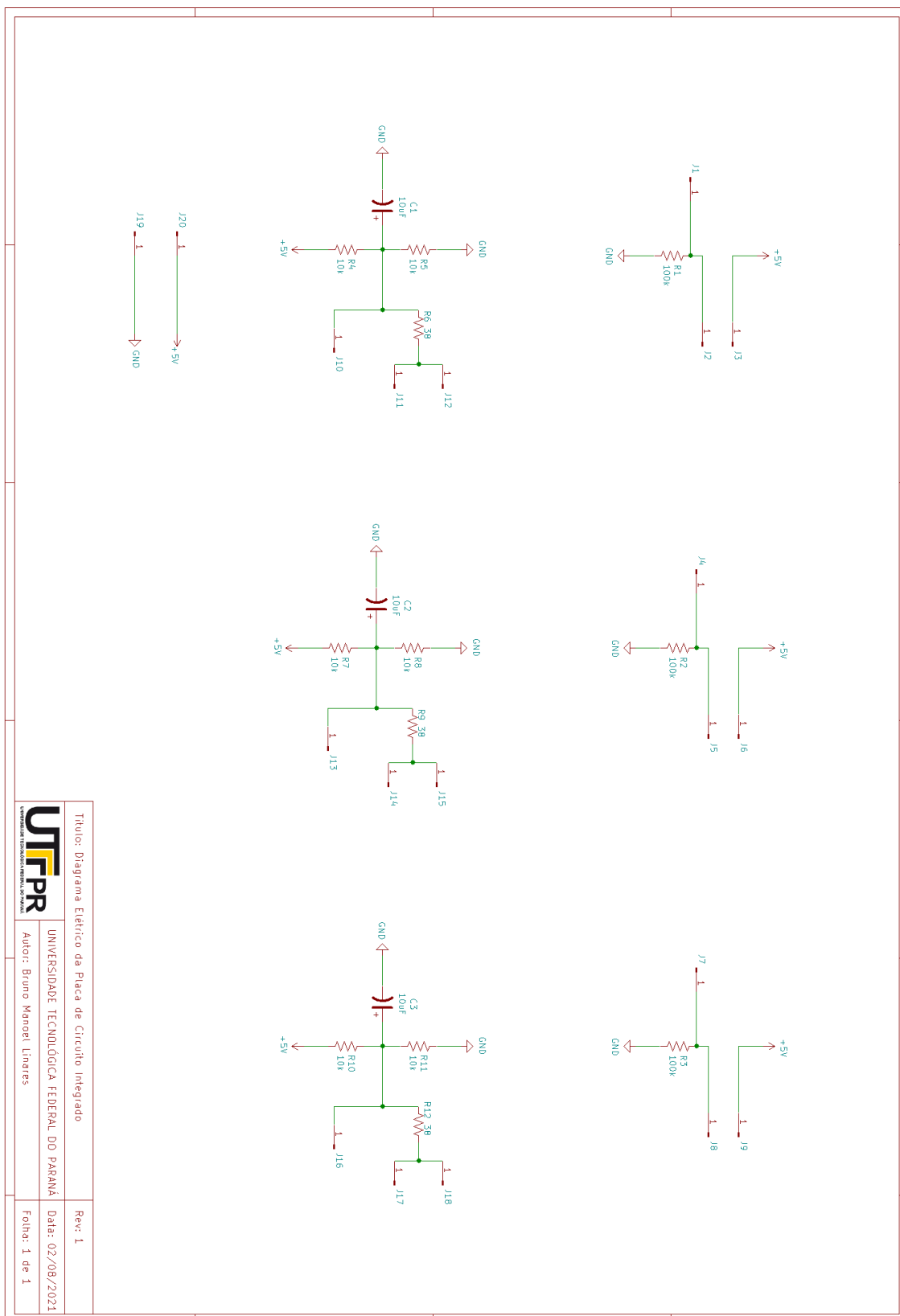
WEG. **Manual geral de instalação, operação e manutenção de motores elétricos**. Jaraguá do Sul: Grupo WEG - Unidade de Motores, 2020.

WIKIMEDIA COMMONS. **Squirrel cage rotor**. Disponível em: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wirnik\\_by\\_Zureks.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wirnik_by_Zureks.jpg)>. Acesso em: 6 ago. 2020.

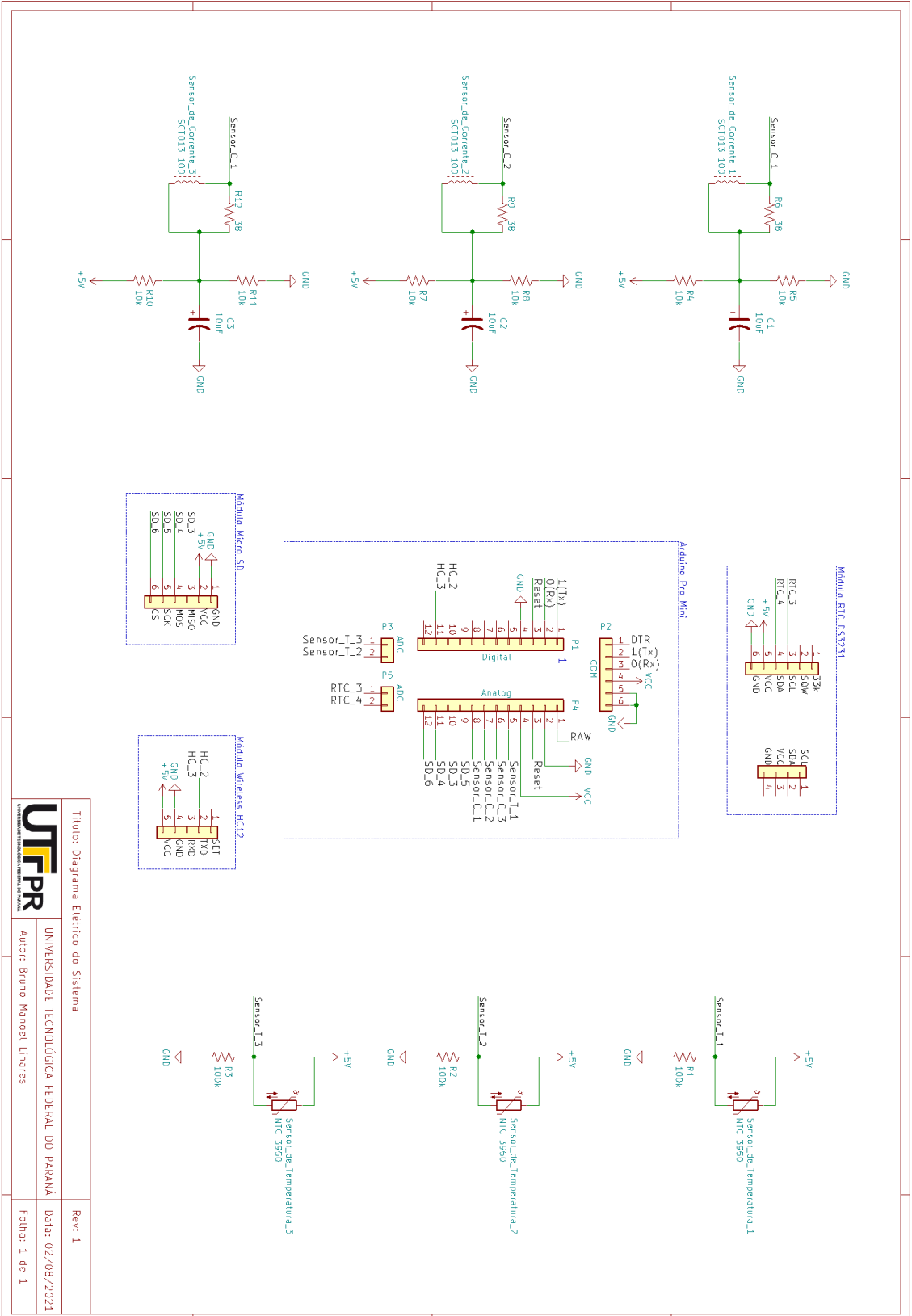
XYLEM. **Visão Geral – Estatores dos Motores Flygt**. Disponível em: <<https://www.xylem.com/es-cl/products-services/parts-supplies/genuine-flygt-parts/stators>>. Acesso em: 12 ago. 2020.

YHDC. **Split core current transformer**. Disponível em: <<http://en.yhdc.com/comp/file/download.do?id=941>>. Acesso em: 13 jul. 2021.

## APÊNDICE A - Diagrama Elétrico da Placa de Circuito Impresso



## APÊNDICE B - Diagrama Elétrico do Sistema de Monitoramento



Título: Diagrama Elétrico do Sistema	Rev: 1
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	Data: 02/08/2021
Autor: Bruno Manoel Linhares	Folha: 1 de 1



**APÊNDICE C - Código do Sistema de Monitoramento**

```
#include <Wire.h>
#include "RTCLib.h"
RTC_DS3231 rtc;
#include "EmonLib.h"
#include <SoftwareSerial.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include "HardwareSerial.h"
#define TEMPERATURENOMINAL 25
#define NUMSAMPLES 50

// pinos NTC
const int pinTermistor1 = A0;
const int pinTermistor2 = A6;
const int pinTermistor3 = A7;

// Parâmetros do termistor
const double beta = 3600.0;
const double r0 = 91800;
const double t0 = 273.0 + 25.0;
const double rx = r0 * exp(-beta/t0);

// Parâmetros do circuito
const double vcc = 5.0;
const double R = 100000;

// Numero de amostras na leitura
const int nAmostras = 100;

//DECLARAÇÃO DOS DIAS DA SEMANA
```

```
char daysOfTheWeek[7][12] = {"Domingo", "Segunda", "Terça", "Quarta", "Quinta",
"Sexta", "Sábado"};
```

```
SoftwareSerial HC12(9, 8); // HC-12 TX Pin, HC-12 RX Pin
//File myFile;
```

```
const int chipSelect = 10;
```

```
EnergyMonitor SCT0131;
```

```
EnergyMonitor SCT0132;
```

```
EnergyMonitor SCT0133;
```

```
int pinSCT1 = A1; //Pino analógico conectado ao SCT-0131
```

```
int pinSCT2 = A2; //Pino analógico conectado ao SCT-0132
```

```
int pinSCT3 = A3; //Pino analógico conectado ao SCT-0133
```

```
int tensao = 127;
```

```
int potencia1;
```

```
int potencia2;
```

```
int potencia3;
```

```
void setup()
```

```
{
```

```
pinMode(chipSelect, OUTPUT); // Declara pinoSS como saída
```

```
SCT0131.current(pinSCT1, 60.6); //valor de calibração (numero de espiras
sensor/resistor de carga)
```

```
SCT0132.current(pinSCT2, 60.6);
```

```
SCT0133.current(pinSCT3, 60.6);
```

```
Serial.begin(9600);
```

```
HC12.begin(9600);
```

```
if(! rtc.begin())
```

```
{
```

```
Serial.println("DS3231 não encontrado");
```

```
while(1);
```

```
}
```

```

if(rtc.lostPower())//SE RTC FOI LIGADO PELA PRIMEIRA VEZ / FICOU SEM
ENERGIA / ESGOTOU A BATERIA, FAZ
{
Serial.println("DS3231 OK!"); //IMPRIME O TEXTO NO MONITOR SERIAL
//REMOVA O COMENTÁRIO DE UMA DAS LINHAS ABAIXO PARA INSERIR AS
INFORMAÇÕES ATUALIZADAS EM SEU RTC
//rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__))); //CAPTURA A DATA E HORA
EM QUE O SKETCH É COMPILADO
//rtc.adjust(DateTime(2020, 11, 14, 20, 01, 35)); //(ANO), (MÊS), (DIA), (HORA),
(MINUTOS), (SEGUNDOS)
}
delay(100);
while (!Serial) {
;
}

Serial.print("Initializing SD card...");

if (!SD.begin(chipSelect))

{
Serial.println("Card failed, or not present");

while (1);

Serial.println("card initialized.");

}}

void loop() {

DateTime now = rtc.now();

```

```

float soma1 = 0;
float soma2 = 0;
float soma3 = 0;
for (int i = 0; i < nAmostras; i++) {
soma1 += analogRead(pinTermistor1);
delay (10);
soma2 += analogRead(pinTermistor2);
delay (10);
soma3 += analogRead(pinTermistor3);
delay (10);
}

double v1 = (vcc*soma1)/(nAmostras*1024.0);
double rt1 = (vcc*R)/v1 - R;

double v2 = (vcc*soma2)/(nAmostras*1024.0);
double rt2 = (vcc*R)/v2 - R;
double v3 = (vcc*soma3)/(nAmostras*1024.0);
double rt3 = (vcc*R)/v3 - R;

// Calcula a temperatura
double t1 = beta / log(rt1/rx);
float temp1 = (t1-273.0);

double t2 = beta / log(rt2/rx);
float temp2 = (t2-273.0);
double t3 = beta / log(rt3/rx);
float temp3 = (t3-273.0);

float Irms1 = SCT0131.calclrms(1480);
float Irms2 = SCT0132.calclrms(1480);
float Irms3 = SCT0133.calclrms(1480);
potencia1 = Irms1 * tensao;
potencia2 = Irms2 * tensao;

```



```
potencia3 = Irms3 * tensao;  
//myFile.print(potencia1);  
File myFile = SD.open("Dados.txt", FILE_WRITE);
```

```
if (myFile)  
{  
  
myFile.print(" / Horas: ");  
myFile.print(now.hour(), DEC);  
myFile.print(':');  
myFile.print(now.minute(), DEC);  
myFile.print(':');  
myFile.print(now.second(), DEC);  
myFile.println();  
myFile.print("Corrente = ");  
myFile.print(Irms1);  
myFile.print(" ");  
myFile.print(Irms2);  
myFile.print(" ");  
myFile.print(Irms3);  
myFile.print(" ");  
myFile.println(" A");  
myFile.print("Potencia = ");  
myFile.print(potencia1);  
myFile.print(" ");  
myFile.print(potencia2);  
myFile.print(" ");  
myFile.print(potencia3);  
myFile.println(" W");  
myFile.print("Temperatura ");  
myFile.print(temp1);  
myFile.print(temp2);
```

```
myFile.println(temp3);
myFile.flush();
myFile.close();

}
else {
Serial.println("error opening datalog.txt");
}
Serial.print(F(" / Horas: "));
Serial.print(now.hour(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.print(now.minute(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.print(now.second(), DEC);
Serial.print("  ");
Serial.print("Corrente = ");
Serial.print(lrms1);
Serial.print(" ");
Serial.print(lrms2);
Serial.print(" ");
Serial.print(lrms3);
Serial.print(" ");
Serial.println(" A");
Serial.print("Potencia = ");
Serial.print(potencia1);
Serial.print(" ");
Serial.print(potencia2);
Serial.print(" ");
Serial.print(potencia3);
Serial.println(" W");
Serial.print("Temperatura ");
Serial.print(temp1);
Serial.print(" ");
```

```
Serial.print(temp2);  
Serial.print(" ");  
Serial.println(temp3);
```

```
if (HC12.available() > 1) {  
int input = HC12.read();
```

```
Serial.println(input);  
}
```

```
HC12.print(" / Horas: ");  
HC12.print(now.hour(), DEC);  
HC12.print(':');  
HC12.print(now.minute(), DEC);  
HC12.print(':');  
HC12.print(now.second(), DEC);  
HC12.print("temperatura");  
HC12.print(temp1);  
HC12.print(temp2);  
HC12.println(temp3);  
HC12.print(" ");  
HC12.print("Corrente = ");  
HC12.print(lrms1);  
HC12.print(" ");  
HC12.print(lrms2);  
HC12.print(" ");  
HC12.print(lrms3);  
HC12.print(" ");  
HC12.println(" A");  
HC12.print("Potencia = ");  
HC12.print(potencia1);
```

```
HC12.print(" ");  
HC12.print(potencia2);  
HC12.print(" ");  
HC12.print(potencia3);  
HC12.println(" W");  
HC12.flush();  
  
delay(10);  
}
```