

**MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO**

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
SISTEMA DE CONTROLE E ELETRICIDADE EM NAVIOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PROJETO DE UM SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA PREVENÇÃO DE FALHAS DE
UMA BOMBA INCÊNDIO E LASTRO.**



1º TEN EVERTON DOS SANTOS DO NASCIMENTO
Rio de Janeiro
2023

1º TEN EVERTON DOS SANTOS DO NASCIMENTO

PROJETO DE UM SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA PREVENÇÃO DE FALHAS DE
UMA BOMBA INCÊNDIO E LASTRO.

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Sistema de Controle e Eletricidade de Navios.

Orientadores:

D. Sc. Carlos Fernando Teodósio Soares

M. Eng. Anderson Figuerêdo Lopes

CIAA
Rio de Janeiro
2023

1º TEN EVERTON DOS SANTOS DO NASCIMENTO

PROJETO DE UM SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA PREVENÇÃO DE FALHAS DE
UMA BOMBA INCÊNDIO E LASTRO.

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Sistema de Controle e Eletricidade em Navios.

Aprovada em _____

Banca Examinadora:

Anderson Figuerêdo Lopes, M. Sc. – DEN Anderson Figuerêdo Lopes

Bruno Souza Lopes da Costa, D. Sc. – INPG B U

Carlos Fernando Teodósio Soares, D. Sc. – UFRJ Carlos Fernando Teodósio Soares

CIAA
Rio de Janeiro
2023

Dedico esse trabalho a todos os meus familiares e amigos que ao decorrer dessa caminhada sempre estiveram ao meu lado e nunca deixaram de apoiar minha busca por realizar meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Nelsia Maria Barbosa dos Santos do Nascimento, em primeiro lugar, sem a qual nada disso seria possível, por nunca ter medido esforços para me apoiar em diversas decisões da minha vida e por ter sempre me conduzido, pelo exemplo, a sempre acreditar no meu potencial e em dias gloriosos.

Ao meu querido Pai, Edson Pereira do Nascimento, que sempre me apoio em meus estudos, se esforçando para me proporcionar a melhor educação possível permitida na época de juventude.

A minha querida avó, Nilza Gonçalves Pereira do Nascimento, que sempre foi um exemplo de alegria, santuário de fé e de cuidado para mim.

A minha amada esposa, Zelia Fernanda Domingos da Silva, pelos incontáveis momentos de apoio, companheirismo, paciência e incentivo. Além da compreensão diária, entendendo meus compromissos de trabalho e em muitas vezes abdicando de momento de lazer para estar comigo em momento onde eu não pude a acompanhar.

Ao meu coordenador D. Sc. Cesar Augusto Lampe Linhares da Fonseca, pela disponibilidade, dedicação e atenção. Sua orientação precisa durante as reuniões de Metodologia de Pesquisa soube me direcionar na organização das etapas de conclusão do trabalho. Sua vocação partícula para carreira docente é algo orgânico que transforma seus conselhos em garantias de bons resultados.

Ao meu orientador D. Sc. Carlos Fernando Teodósio Soares, pela atenção, organização e paciência em ensinar conceitos básicos sobre este trabalho durante as aulas ministradas no Centro de Instrução Almirante Alexandrino (CIAA). Sua didática para lidar com assuntos difíceis de maneira simplificada foi algo capaz de aguçar minha curiosidade em aprofundar a temática das pesquisas do trabalho.

Ao Capitão de Corveta (EN) Anderson Figuerêdo Lopes por sempre estar disponível e interessado em me ajudar na condução das pesquisas para realização do trabalho acadêmico.

“O engano dos dominadores é supor que sua dominação é eterna. Não é: tudo passa. Todos serão julgados. E a história só registra os que permanecem de pé.”

Nelson Werneck Sodré

PROJETO DE UM SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA PREVENÇÃO DE FALHAS DE UMA BOMBA INCÊNDIO E LASTRO.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo encontrar soluções através da pesquisa de outros trabalhos acadêmicos que abordem um projeto de um sistema supervisório para prevenção de falhas de Motores de Indução Trifásicos, com um custo relativamente baixo, porém que atenda as demandas de funcionamento de um Sistema de Incêndio e Lastro de Embarcação de Desembarque de Carga Geral (EDCG) e contribua para a aplicação da manutenção preventiva preditiva na Marinha do Brasil (MB). O projeto visa monitorar as condições de vibração, temperatura do estator e corrente do motor elétrico de indução e analisar o sinal adquirido para a detecção de defeitos no funcionamento da Bomba de Incêndio e Lastro (BIL). Através de uma pesquisa bibliográfica foram identificados os elementos essenciais que compõem um sistema de análise, coleta e processamento de dados até a interpretação do operador por meio de uma Interface homem-máquina (IHM) implementada por meio da plataforma *Ubidots*. Com base nesse entendimento, são detalhadas as fases envolvidas na criação do dispositivo sugerido por meio do estudo bibliográfico de outros trabalhos acadêmicos que abordam a mesma temática.

Palavras-chave: Falhas. Bomba de Incêndio e Lastro. Manutenção Preditiva. Motor de Indução. Vibração.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transdutor de Pressão.....	29
Figura 2 – Transdutor de Torque Rotativo.....	29
Figura 3 – Transmissores de Temperatura Zurich.....	29
Figura 4 – Indicador de Temperatura/ Velocidade do Ar, OMEGA.....	30
Figura 5 – Registrador Gráfico Estacionário.....	31
Figura 6 – Conversor de Sinal Siemens 3RS17.....	31
Figura 7 – Controlador de Processos HW4300.....	32
Figura 8 – Disposição dos instrumentos de um sistema de automação.....	33
Figura 9 - EDCG em faina de abastecimento de aguada.....	38
Figura 10 - EDCG “Camboriú” realizando faina de transbordo.....	39
Figura 11 – EDCG “Guarapari”	39
Figura 12 – Vista superior da EDCG.....	40
Figura 13 – (a) Esquema de uma bomba centrífuga; (b) BIL da EDCG Classe “Guarapari”.....	41
Figura 14 – Representação gráfica do campo magnético girante.....	43
Figura 15 - Conjunto bomba centrífuga e motor de indução da EDCG.....	44
Figura 16 - Diagrama de Falhas de Motores de Indução.....	46
Figura 17 – Enrolamento do estator em boas condições de funcionamento.....	50
Figura 18 – Enrolamento do estator com deterioração do isolamento em uma fase.....	50
Figura 19 – Vista explodida motor elétrico radial.....	51
Figura 20 – Situações de incorreta instalação dos rolamentos por (a) desalinhamento do veio; (b) deflexão do veio; (c) anel exterior torcida e (d) anel interior torcida.....	52
Figura 21 - Progressão da manutenção ao longo dos anos.....	53
Figura 22 - Perspectiva arquitetônica.....	56
Figura 23 – Dano causado pelo aumento de pulso.....	59
Figura 24 – Expressão gráfica do valor Médio, RMS e de Pico.....	60
Figura 25 – (a) Condição do rolamento e (b) Variação do fator de crista.....	60
Figura 26 – Variação do Fator K.....	62
Figura 27 - Técnica de Envelope.....	63
Figura 28 - Diâmetro de um rolamento de esferas.....	63
Figura 29 - Eixo de sustentação de um motor.....	64

Figura 30 – (a) Sinal de defeito na pista interna de um rolamento; (b) Sinal de defeito na pista externa de um rolamento e (c) Sinal de defeito na esfera de um rolamento.....	68
Figura 31 – Microcontrolador ESP32.....	70
Figura 32 - Acelerômetro MPU6050.....	72
Figura 33 – Sensor de Temperatura IR MPU6050.....	73
Figura 34 – Sensor de Corrente SCT-013.....	74
Figura 35 -Modelagem do circuito integrado do projeto.....	76
Figura 36 – Barramento I2C.....	77
Figura 37 – Representação do barramento I2C com Master/ Slave.....	78
Figura 38 – Representação do barramento I2C com NodeMCU e Arduino UNO.....	79
Figura 39 –Topologia do protocolo MQTT.....	80
Figura 40 – Configuração de novo dispositivo no <i>Ubidots</i>	82
Figura 41 – Representação um Dashboard na Plataforma <i>Ubidots</i>	83
Figura 42 – Painel elétrica integrado com interface homem-máquina.....	84
Figura 43 – Condições dos <i>widjets</i>	85
Figura 44 – Placa de identificação do motor original da EDCG.....	86
Figura 45 –Alerta de temperatura alta.....	87
Figura 46 – Alarme de temperatura alta.....	87
Figura 47 –Indicação de sobrecorrente no motor.....	88
Figura 48 –Indicação de vibração elevada.....	89
Figura 49 – Montagem do sistema elétrico IDE: Fase 1.....	91
Figura 50 – Caixa Patola Frontal e base de fixação. Fase 2.....	91
Figura 51 – Conjunto bomba e motor elétrico da BI de uma EDCG.....	92
Figura 52 – Instalação do protótipo. IDE: Fase 01.....	93
Figura 53: Protótipo instalado, pronto para uso. IDE: Fasso 02.....	94
Figura 54 - Dashboard do MIT IoT.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sistema internacional de unidades.....	36
Tabela 2 – Unidade de medida derivada.....	37
Tabela 3 – Comparativo do EPRI de 1983 e das pesquisas IEEE de 1984 e 1995.....	48
Tabela 4 – Especificações ESP32.....	70
Tabela 5 – Especificações do acelerômetro MPU6050.....	71
Tabela 6 – Especificações do Sensor de IR MLX90614.....	73
Tabela 7 – Especificações do Sensor de Corrente SCT-013.....	74
Tabela 8 – Diagrama de I/O do ESP32.....	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição das falhas, segundo estudo publicado pela EPRI.....	47
Gráfico 2 – Comparação de falhas de motores de indução das pesquisas EPRI 1983 e IEEE 1984 e 1995.....	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Composição da temperatura em função da classe de isolamento.....	86
Quadro 2 – Critérios de vibrações elevadas.....	89

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AMRJ	Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro
BIL	Bomba de Incêndio e Lastro
CFN	Corpo de Fuzileiros Navais
CM	Manutenção Corretiva (<i>Corrective Maintenance</i>)
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DGPM	Diretor Geral de Material da Marinha
EDCG	Embarcação de Desembarque de Carga Geral
FRF	função resposta em frequência (<i>frequency response function</i>)
EI	Instituto Norte Americano de Pesquisa de Energia Elétrica (<i>Edison Electric Institute</i>)
EPRI	Instituto Norte Americano de Pesquisa de Energia Elétrica (<i>Electric Power Research Institute</i>)
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FEM	Método dos Elementos Finitos (<i>Finite Element Method</i>)
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
GED	Grupamento de Embarcações de Desembarque
GPIO	portas programáveis de entrada/ saída de dados (<i>General-Purpose Input/Output</i>)
HTTP	protocolo de comunicação (<i>Hypertext Transfer Protocol Secure</i>)
GruMeC	Grupamento de Mergulhadores de Combate
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional (<i>Internacional Electrotechnical Commission</i>)
IEEE	Instituto de Engenheiros Elétrico e Eletrônicos (<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>)

IoT	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)
MB	Marinha do Brasil
MCA	Motor de Combustão Auxiliar
MCSA	Assinatura de Corrente do Motor (<i>Motor Current Signature Analysis</i>)
MCP	Motor de Combustão Principal
MEMS	Sistema Micro eletromecânico (<i>Microelectromechanical Systems</i>)
MNT	Movimento Navio-Terra
MIT	Motor de Indução Trifásico
MPrePRE	Manutenção Preventiva Preditiva
MPrePer	Manutenção Preventiva Periódica
MQTT	protocolo de comunicação (<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>)
MV	Variável Manipulada (<i>Manipulated Variable</i>)
OM	Organização Militar
OpAnf	Operação Anfíbia
OoS	Qualidade do Serviço (<i>OoS</i>)
PdM	Manutenção Preditiva (<i>Predictive Maintenance</i>)
PV	Variável Primária (<i>Primary Variable</i>)
RAM	Memória de Acesso Aleatório (<i>Random Access Memory</i>)
RMS	Raiz Média Quadrada (<i>Root Mean Square</i>)
RPM	Revolução por Minuto (<i>Revolutions per Minute</i>)
RUL	Unidade de tempo de vida remanescente (<i>Remaining Unit Lifetime</i>)
SI	Sistema Internacional
SP	Ponto de Ajuste (<i>Set Point</i>)
SKF	Fábrica de Rolamento Sueca (<i>Svenska Kullager Fabriken</i>)
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

LISTAS DE SÍMBOLOS

Σ	somatório
A	unidade de corrente elétrica no Sistema Internacional (Ampere)
HP	unidades de medida de potência (<i>Horse Power</i>)
<i>Pico</i>	valor máximo de uma função medido a partir do valor zero
<i>RMS</i>	valor eficaz de uma onda periódica
<i>RPM</i>	rotações por minuto
<i>bit</i>	menor unidade de informação
<i>byte</i>	unidade de informação equivalente a 8 bits
<i>Kbytes</i>	submúltiplo da unidade de informação do SI equivalente a 10^3 <i>bytes</i>
<i>Mbytes</i>	submúltiplo da unidade de informação do SI equivalente a 10^6 <i>bytes</i>
<i>Gbytes</i>	submúltiplo da unidade de informação do SI equivalente a 10^9 <i>bytes</i>
<i>s</i>	escorregamento
$\cos\omega$	função cosseno
<i>Hz</i>	unidade de frequência no SI (Hertz)
<i>kHz</i>	submúltiplo da unidade de frequência do SI equivalente a 10^3 <i>Hz</i>
<i>MHz</i>	submúltiplo da unidade de frequência do SI equivalente a 10^6 <i>Hz</i>
<i>GHz</i>	submúltiplo da unidade de frequência do SI equivalente a 10^9 <i>Hz</i>
<i>T</i>	período
<i>V</i>	unidade de tensão elétrica no SI
<i>a</i>	aceleração
<i>d</i>	diâmetro
<i>f</i>	frequência
<i>g</i>	faixa de medição
<i>gpm</i>	galões por minutos

s	unidade de medida de tempo (segundos)
t	tempo
v	velocidade
x	posição
π	constante matemática com valor aproximado de 3,1415

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Delimitação do Tema.....	23
1.2 Apresentação do Problema.....	23
1.3 Justificativa e Relevância.....	24
1.4 Objetivos.....	25
1.4.1 Objetivo Geral	25
1.4.2 Objetivos Específicos	25
1.5 Metodologia.....	25
1.5.1 Classificação da pesquisa.....	25
1.5.2 Técnicas de pesquisa utilizadas.....	26
1.6 Organização do trabalho.....	27
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	28
2.1 Conceitos de Instrumentação.....	28
2.2 Classificação de Instrumentação de Medição.....	28
2.2.1 Classificação por Função.....	28
2.2.1.1 <i>Transdutores</i>	28
2.2.1.2 <i>Transmissor</i>	28
2.2.1.3 <i>Indicador</i>	30
2.2.1.4 <i>Registrador</i>	30
2.2.1.5 <i>Conversor</i>	31
2.2.1.6 <i>Unidade Aritmética</i>	32
2.2.1.7 <i>Integrador</i>	32
2.2.1.8 <i>Controlador</i>	32
2.2.1.9 <i>Elemento Final de controle ou atuador</i>	32
2.2.2 Configuração Típica dos Sistemas de Automação.....	33
2.2.3 Classificação por sinal transmitido.....	33
2.2.3.1 <i>Elementos Pneumáticos</i>	33
2.2.3.2 <i>Elementos Hidráulicos</i>	34
2.2.3.3 <i>Elétrico Analógico</i>	34
2.2.3.4 <i>Elétrico Digital</i>	35
2.3 Grandezas e Unidades.....	35

2.3.1	Grandeza.....	35
2.3.2	Sistema de grandezas	35
2.3.3	Grandeza de base.....	35
2.3.4	Grandeza derivada.....	35
2.3.5	Unidade de medida.....	36
2.3.6	Símbolo de uma unidade de medida.....	36
2.3.7	Sistema de uma unidade de medida.....	36
2.3.8	Unidade de media derivada.....	36
2.4	Sistema de Incêndio e Lastro.....	37
2.4.1	Bomba Centrífuga.....	40
2.4.2	Motor de Indução Trifásico.....	41
2.4.2.1	<i>Princípio de Funcionamento.....</i>	<i>41</i>
2.4.2.2	<i>Normas estabelecidas ao MIT.....</i>	<i>44</i>
2.4.2.3	<i>Principais falhas do MIT.....</i>	<i>45</i>
2.4.2.4	<i>Levantamento estatístico de confiabilidade de motores elétricos.....</i>	<i>46</i>
2.4.2.5	<i>Principais falhas no estator.....</i>	<i>49</i>
2.4.2.6	<i>Principais falhas no enrolamento.....</i>	<i>51</i>
2.5	Gerenciamento da Manutenção.....	52
2.5.1	Manutenção Corretiva.....	54
2.5.2	Manutenção Preventiva Periódica.....	54
2.5.3	Manutenção Preventiva Preditiva.....	55
2.6	Técnicas para Análise de Vibrações Mecânicas.....	56
2.6.1	Características da análise de vibração.....	57
2.6.2	Análise de vibração no domínio do tempo.....	58
2.6.3	Análise de vibração no domínio da frequência.....	62
3	DESCRIÇÃO DO PROJETO.....	69
3.1	Hardware.....	69
3.1.1	Microcontrolador.....	70
3.1.2	Acelerômetro.....	71
3.1.3	Sensor de Temperatura.....	72
3.1.4	Sensor de Corrente.....	73
3.1.5	Modelagem do Hardware.....	75
3.2	Rede de Comunicação.....	76
3.2.1	Hardware.....	77

3.2.2 Software.....	77
3.2.3 Protocolo I2C com Arduino e NodeMCU.....	78
3.2.4. Protocolo MQTT.....	79
3.2.5. <i>Publish x Subscribe</i>	80
3.2.6. <i>Broker</i>	80
3.2.7. Segurança do MQTT.....	81
3.2.8 MQTT na Plataforma <i>Ubidots</i>	81
3.3 Plataforma <i>Ubidots Steam</i>.....	82
3.4 Software.....	84
3.4.1. Critérios de Alarmes.....	84
3.4.2. Temperatura	85
3.4.3. Sobrecorrente.....	87
3.4.4. Vibração Elevada.....	88
3.5 Sistema supervisorio de prevenção de falhas.....	90
3.5.1. Construção do supervisorio de prevenção de falhas.....	90
3.5.1.1. <i>Circuito Elétrico</i>	90
3.5.1.2 <i>Motor de Indução Trifásico da EDCG Classe “Guarapari”</i>	92
3.5.2. Instalação do dispositivo no MIT.....	92
3.5.3. Apresentação do <i>Dashboard</i> de Monitoramento.....	94
4 CONCLUSÃO	96
4.1 Considerações Finais.....	96
4.2 Sugestões para futuros trabalhos.....	96
REFERÊNCIAS.....	98

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente avanço tecnológico dos motores de combustão, compressores, geradores, motores elétricos entre outras máquinas, impulsionado pela intensa demanda de desenvolvimento dos processos industriais, surgia a necessidade de obter mais precisão nas etapas da cadeia de produção das indústrias, devido ao elevado nível de energia envolvido no funcionamento desse maquinário.

Nos primórdios do controle de processos industriais, indicadores de temperatura e pressão, assim como válvulas, eram monitorados por operadores que percorriam todas as malhas do sistema de controle e ajustavam o fechamento e a abertura das válvulas buscando obter o valor da variável no ponto desejado.

Hoje, a instrumentação desempenha um papel imprescindível no controle, monitoramento, otimização e processamento de dados, permitindo, dessa forma, que as empresas atinjam níveis de produtividade e qualidade jamais imaginados no passado, onde podemos citar a implementação de tecnologias como: sensores inteligentes, internet das coisas (IoT), inteligência artificial, automação avançada e controle de precisão.

Nesse contexto, a indústria marítima, importante setor da economia brasileira, responsável por cerca de 90% das importações e exportações através de portos em 2022, e indispensável para a defesa da soberania nacional no que tange a proteção do nosso território necessita cada vez mais que as embarcações operem com máxima eficiência e uma menor ocorrência de falhas em seus equipamentos. Com base nesses critérios, a manutenção se torna uma questão central no gerenciamento de custos das indústrias, além de também ser um fator preponderante na exequibilidade de tarefas de patrulhamento e transporte logístico marítimo pelo território nacional no caso do Estado brasileiro.

É importante minimizar as instâncias de falhas ao longo de um intervalo de tempo, a fim de evitar impactos negativos na produção e economizar recursos e tempo. Dada a importância da manutenção, é essencial examinar de maneira criteriosa o tipo a ser selecionado:

- a) Manutenção corretiva não planejada;
- b) Manutenção corretiva planejada;
- c) Manutenção preventiva preditiva;
- d) Manutenção detectiva e
- e) Manutenção preventiva periódica.

Segundo as afirmações de Almeida (2011, p.4), a aplicação da manutenção preditiva traz aprimoramentos para a qualidade do produto, os ganhos financeiros e a eficiência global da produção das indústrias, uma vez que minimiza os custos e interrupções decorrentes de falhas nas máquinas. Além disso, ela contribui para um planejamento mais eficaz da manutenção, permitindo que as máquinas sejam desligadas somente quando estritamente necessário e quando for adequado. Pinto e Nascif (2002, p.49) destacam, que a adoção da manutenção preditiva, em contraste com a manutenção corretiva não planejada, tem o potencial de reduzir pela metade os custos de manutenção por unidade de potência (Horse Power) instalada em uma planta industrial.

Em um sistema de incêndio e lastro de uma Embarcação de Desembarque de Carga Geral (EDCG), a bomba centrífuga responsável pela pressurização da rede, conhecida também como Bomba de Incêndio e Lastro (BIL) desempenha um papel crítico na segurança e na operação de um navio, pois são essenciais em operações de: Manutenção da estabilidade do meio, drenagem de água do porão, combate a incêndio, drenagem de água de lastro e prevenção de alagamentos a bordo (LIVRO DA EDCG, 1981). Devido à sua relevância vital na manutenção das condições de segurança de um navio, torna-se imprescindível que esse equipamento tenha uma atenção especial na prevenção de falhas em seu funcionamento.

Uma vez que o objetivo é evitar o mau funcionamento de equipamentos essenciais à operação de um meio devem ser observados os principais parâmetros que possam indicar uma possível ocorrência de falha do mesmo e, assim, auxiliar os operadores da máquina na aplicação da manutenção preditiva. É frequente a percepção de que a manutenção é um gasto adicional essencial para prevenir perdas maiores, e, muitas vezes, a equipe de manutenção é valorizada apenas no contexto de reparos emergenciais. No entanto, uma análise minuciosa da questão revela que, mediante a adoção de uma manutenção preditiva eficaz, é possível alcançar uma significativa redução nos custos de manutenção (NEPOMUCENO, 1989).

Atualmente, existem várias técnicas e métodos disponíveis para realizar análise preditivas do estado de um equipamento rotativo. E com as técnicas preditivas, é viável avaliar as condições de funcionamento por meio da observação da temperatura (usando termografia), utilizando sistemas de alinhamento de eixos com laser, realizando o balanceamento, analisando a corrente elétrica ou ainda empregando a análise de vibração.

A técnica de análise de temperatura, conhecida como termografia, possibilita a medição e representação precisa da temperatura em uma superfície (PICAZO-RÓDENAS R. ROYO, 2012). Uma das principais vantagens dessa abordagem é que ela não exige contato direto entre

o sensor e o equipamento rotativo, além de capacitar a detecção de padrões de temperatura anormais no funcionamento e possíveis problemas de alinhamento em acoplamentos.

Por outro lado, segundo Devaney e Eren (2004), as avaliações baseadas em corrente elétrica e vibração são as mais abrangentes e eficazes quando se trata de realizar a manutenção preditiva em máquinas rotativas. A análise da corrente elétrica, também conhecida na literatura como Análise de Assinatura de Corrente do Motor (Motor Current Signature Analysis - MCSA), destaca-se como a técnica menos intrusiva para identificar as condições mecânicas e anomalias elétricas em equipamentos rotativos (DEVANEY; EREN, 2004).

Já a análise pela vibração em equipamentos rotativos (BEZERRA, 2004) buscam encontrar assinaturas no espectro de frequência de vibração do motor, que possuem como sua característica diversas harmônicas. A característica distintiva da harmônica principal de uma máquina rotativa, que se manifesta em frequência mais baixas, é determinada pela relação entre a velocidade de rotação, expressa em rotações por minuto (RPM), e a frequências da tensão de alimentação aplicada ao equipamento rotativo.

Através da prevenção de falhas devido à aplicação da manutenção preditiva, a importância da instrumentação industrial surge por meio da capacidade de detectar problemas ou anomalias em tempo real através da análise de dados coletados por sensores e também de atribuir maior dinamismo no controle e operação de equipamentos a bordo de um navio. Isso permite uma resposta rápida a quaisquer situações de mau funcionamento, evitando falhas catastróficas que possam comprometer a segurança da tripulação, da embarcação e do meio ambiente marítimo.

Dessa forma, por meio dos sistemas supervisionados, os operadores podem tomar decisões corretas e realizar manutenções preditivas com base em dados em tempo real. Isso prolonga a vida útil dos sistemas e reduz os riscos de paralisações inesperadas, especialmente durante longas travessias ou em condições adversas. Com o intuito de desenvolver um dispositivo capaz de prever falhas em um motor de indução trifásico, que compõe a única BIL existente em Embarcações de Desembarque de Carga Geral (EDCG) da Classe “Guarapari”, este trabalho propõe projetar um sistema supervisório para prevenção de falhas através da análise da vibração, temperatura e da assinatura da corrente elétrica do motor.

1.1 Delimitação do Tema

Elaboração do projeto de um Sistema Supervisório para prevenção de falhas de uma Bomba de Incêndio e Lastro (BIL) da Embarcação de Desembarque de Carga Geral (EDCG) Classe “Guarapari”.

1.2 Apresentação do Problema

As Embarcações de Desembarque de Carga Geral da Classe “Guarapari” foram construídas pelo Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro (AMRJ), Ilhas das Cobras, Rio de Janeiro e incorporadas a MB em 6 de janeiro de 1981, em cerimônia presidida pelo então Diretor Geral de Material da Marinha (DGPM), Almirante de Esquadra Fernando Ernesto Carneiro Ribeiro, passando logo depois a fazer parte do Comando da Força de Transporte da Esquadra (NOMAR, 1988). Em dezembro de 1991 por decisão da Administração Naval da época deixou de ser uma Organização Militar (OM) autônoma passando a compor o Grupamento de Embarcações de Desembarque (GED) e após trinta anos foram reincorporadas¹ como meios da Esquadra em 22 de novembro de 2021.

As EDCG são navios que possuem como principal tarefa realizar o movimento Navio-Terra (MNT) durante as Operações Anfíbias (OpAnf), transportando pessoal, viaturas e equipamentos a partir de um Navio-Doca ou por meios próprios, apoiar infiltração e extração de elementos de Operações Especiais do Corpo de Fuzileiros Navais (CFN) e também do Grupamento de Mergulhadores de Combate (GruMeC). Possuem motores de combustão interna robustos e importantes tanto para propulsão como para a geração de energia elétrica do navio além de outras máquinas que operam com combustível a diesel, também, essências para o encalhe controlado da embarcação quando realizando as operações de desembarque e embarque de material e pessoal em cabeças de praia.

Operações de desembarque ou embarque anfíbio são períodos onde mais é exigido o correto funcionamento dos motores e bombas do navio, pois a embarcação necessita estar em uma determinada situação de estabilidade, quando abicada na cabeça de praia, capaz de permitir que o pessoal ou material embarcado na EDCG possa desembarcar na praia ou embarcar no navio com a maior segurança possível. Nesses instantes é comum ocorrer a necessidade de

¹<Disponível em:<https://www.marinha.mil.br/noticias/cerimonia-marca-reincorporacao-das-edcg-classe-guarapari/>. Acesso em:15 mai. 2023. >

realizar alterações na estabilidade do navio, através de procedimentos de manobras de lastro por meio do acionamento da BIL responsável por pressurizar a rede incêndio e lastro, ou a ocorrência de incêndios em situações mais extremas devido ao nível de potência demandada pelos motores do navio durante a operação. Em ambos os casos a única BIL existente no projeto original das EDCG deve estar operando com a menor probabilidade de ocorrência de falha.

Por se tratar de um navio incorporado à Marinha do Brasil em 1981 muitos dos sistemas de monitoramento do meio já se encontram obsoletos ou incompatíveis com tecnologias mais modernas devido a falta de intercambialidade com novos produtos existentes no mercado. Estabelecer unidades especializadas em cada navio não é uma solução viável devido aos altos custos associados à aquisição de equipamentos especializados e à alta rotatividade de equipe a bordo, que requer treinamento contínuo e aumenta os custos indiretos da manutenção preditiva. Então, para resolver o problema de monitoramento e contribuir para a disponibilidade contínua das embarcações, torna-se indispensável encontrar uma ferramenta integrada que possa realizar medições a bordo de maneira acessível, fácil de operar e com níveis aceitáveis de confiabilidade, sem custos excessivos (CAVALCANTI, 2021).

Devido a essas dificuldades, a priorização do suporte técnico especializado em prever falhas nos equipamentos não é imediata nas operações, o que pode resultar em manutenções tardias ou até mesmo a falta delas. As consequências dessa ausência da previsão de falhas se manifestam abruptamente, causando perdas materiais e operacionais, afetando assim a restrição de operação do meio. Logo, surgiu como solução a implementação de ferramentas integradas ao funcionamento dessas máquinas, que possam realizar medições dos equipamentos a bordo facilitando a operação e atribuindo confiabilidade ao equipamento.

1.3 Justificativa e Relevância

Devido à inexistência de uma bomba de esgoto e incêndio secundária no projeto de concepção das Embarcações de Desembarque de Carga Geral Classe “Guarapari” torna-se indispensável adotar medidas alternativas que corroborem para prevenção de falhas e aumento da vida útil de um equipamento essencial para a operação do navio. A fim de elaborar ideias que possam mitigar possíveis problemas relacionados à manutenção de equipamento com notável importância para a operação do meio, este projeto objetiva encontrar uma solução de relativo baixo custo que possa ser implementada nas embarcações da Classe “Guarapari”.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Com o presente projeto, tem-se por objetivo geral, contribuir para o aprimoramento dos processos de manutenção preditiva das Embarcações de Desembarque da Classe “Guarapari”, através da elaboração de um sistema supervisor capaz de realizar análise de dados dos principais parâmetros de funcionamento de uma bomba de esgoto e incêndio e assim contribuir para diminuição da quantidade de eventuais avarias que possam ocorrer com o equipamento.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Revisar manuais técnicos da bomba de incêndio e lastro da embarcação a fim de conhecer o seu funcionamento;
- b) Apresentar as técnicas utilizadas para o processamento e análise dos dados amostrados;
- c) Propor um projeto modelo utilizando o software Tinkercad, para monitorar os principais parâmetros de funcionamento de uma bomba de incêndio e lastro;
- d) Contribuir para ampliar a compreensão a respeito de manutenção preditiva na Marinha do Brasil; e
- e) Contribuir para melhorar o gerenciamento de recursos destinados à manutenção dos meios empregados em Operações Anfíbias.

1.5 Metodologia

1.5.1 Classificação da pesquisa

O propósito principal deste trabalho consiste em conceber um projeto de sistema de baixo custo destinado a monitorar a corrente elétrica, temperatura e vibração de um motor de indução trifásico, além de transmitir sua condição em tempo real, utilizando a tecnologia da Internet das Coisas (IoT). As grandezas elétricas serão captadas por sensores e processadas por um microcontrolador. Através da IoT, os dados serão enviados para a plataforma *Ubidots* na nuvem, onde ficaram armazenados e disponíveis para visualização em formato de gráficos.

Por meio de uma abordagem que combina elementos qualitativos e quantitativos, este estudo procurar noções básicas dos fenômenos associados à análise de vibração, temperatura e corrente elétrica de um MIT e investigar o impacto da integração deste tópico no contexto da Manutenção Baseada em Condição (MB).

Finalmente, esta pesquisa se enquadra no âmbito explicativo e exploratório em termos de seus objetivos, uma vez que tem por objetivo investigar as técnicas mais frequentemente empregadas na análise de vibração, temperatura e corrente elétrica, no que diz respeito à coleta e processamento dos dados amostrados. Esse trabalho visa proporcionar as bases necessárias para o desenvolvimento do equipamento proposto.

1.5.2 Técnicas de pesquisa utilizadas

Com o propósito de alcançar a meta estabelecida, conduziu-se uma pesquisa bibliográfica com o intuito de obter fundamentação teórica a respeito das principais técnicas utilizadas para a coleta e processamento de dados. A pesquisa se concentrou na consulta de materiais relacionados ao processamento e análise de sinais, incluindo livros, artigos científicos, dissertações e teses. O objetivo dessa investigação foi utilizar os princípios teóricos já abordados por outros pesquisadores para fundamentar e validar a aplicação desses conceitos no desenvolvimento do projeto proposto.

Para estabelecer metas para a exequibilidade do projeto, foram definidos os objetivos abaixo:

- a) Definir conceitos sobre instrumentação industrial;
- b) Estudo sobre as principais falhas e técnicas de manutenção nos motores de indução trifásico;
- c) Estudo sobre o sistema de aquisição de dados viável para o projeto;
- d) Definição sobre o protocolo de comunicação do sistema com plataforma em nuvem;
- e) Proposta de construção de um protótipo.

1.6 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em quatro capítulos. No primeiro capítulo, são apresentadas as razões motivadoras da criação da pesquisa e objetivos e métodos para encontrar a solução do problema estudado.

No segundo capítulo, é realizada uma breve introdução sobre os conceitos da instrumentação industrial, apresentação dos aspectos técnicos do equipamento analisado e da gestão da manutenção no cenário contemporâneo, assim como uma visão teórica sobre os principais problemas encontrados na prevenção de falhas de máquinas rotativas.

O terceiro capítulo trata sobre os aspectos construtivos da solução encontrada através pesquisas bibliográficas, explicando os procedimentos realizados para a construção do dispositivo, assim como sua operação.

Por fim, o quarto capítulo reúne as considerações finais e os trabalhos futuros como sugestão para posteriores pesquisas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceitos de Instrumentação

Instrumentação é a ciência que aplica e desenvolve técnicas para adequação de instrumentos de medição, transmissão, indicação, registro e controle de variáveis físicas em equipamentos nos processos industriais.

Nas indústrias que se enquadram nas categorias de “indústrias de processos”, a instrumentação de campo desempenha um papel crucial nos sistemas de controle e automação. As principais grandezas físicas presentes e monitoradas em tais processos industriais incluem pressão, nível, vazão, temperatura, massa, densidade, pH, deslocamento, velocidade angular e outras. O objetivo deste capítulo é fornecer uma introdução aos conceitos fundamentais relacionados à classificação, especificação e análise de dispositivos de campo no contexto da automação industrial.

2.2 Classificação de Instrumentação de Medição

2.2.1 Classificação por Função

Os instrumentos em sistemas de automação são interligados para realizar uma determinada tarefa de controle ou monitoramento em processos industriais. Um conjunto desses instrumentos chama-se malha, e os instrumentos que compõem uma malha são então classificados pela função que executam, conforme a lista a seguir.

2.2.1.1 Transdutores

São os dispositivos ou elementos que detectam alterações nas variáveis físicas de processo e fornecem uma grandeza de saída geralmente elétrica. O elemento do transdutor, ou elemento primário, que entram em contato direto com a variável física a ser medida (mensurado) é denominado sensor. Quando o elemento é responsável pela “detecção” de determinada condição no processo ele pode ser também denominado detector.

Figura 1 - Transdutor de Pressão



Fonte: Página da Mecânica Industrial

Figura 2 - Transdutor de Torque Rotativo



Fonte: Página da OMEGA

2.2.1.2 Transmissor

Instrumento que tem a função de converter sinais do transdutor, geralmente sinais elétricos de baixa potência, em outra forma de sinal (analógico ou digital) capaz de ser enviado à distância para um instrumento receptor, normalmente localizado longe do ponto de medição.

Figura 3 – Transmissores de Temperatura Zurich



Fonte: Página da ZURICH temperatura & pressão

2.2.1.3 Indicador

Instrumento para indicação visual da quantidade medida e eventualmente enviada por transmissor. Todo instrumento indicador possui uma faixa de indicação. Em indicadores analógicos pode-se denominar esta faixa de escala. A escala possui divisões (parte de uma escala compreendida entre duas marcas sucessivas) com seus correspondentes valores expressos na unidade de engenharia indicada. As escalas podem ser lineares (coeficiente de proporcionalidade constante ao longo da escala) ou não lineares.

Figura 4 – Indicador de Temperatura/ Velocidade do Ar, OMEGA



Fonte: Página comercial da OMEGA

2.2.1.4 Registrador

Dispositivo que captura de forma gráfica informações instantâneas medidas ao longo do tempo, informações essas que são transmitidas por emissores e controladores.

Figura 5 – DS400 - Registrador Gráfico Estacionário



Fonte: Página Melo Automação

2.2.1.5 Conversor

Instrumento cuja função é receber um determinado sinal, alterar esta forma de sinal e em seguida emitir um sinal de saída proporcional ao de entrada.

Figura 6 – Conversor de Sinal Siemens 3RS17



Fonte: Página da Siemens

2.2.1.6 Unidade Aritmética

Instrumento que realiza operações aritméticas em seus sinais de entrada de acordo com uma determinada expressão, fornecendo um sinal de saída resultante.

2.2.1.7 Integrador

Instrumento que indica um valor obtido pela integração de sinais medidos em determinado período de tempo.

2.2.1.8 Controlador

Dispositivo que confronta uma medida atual (variável primária ou “PV”) com um valor desejado (referência ou *set point* ou “SP”) e, baseado na diferença entre eles (erro), emite um sinal de correção (variável manipulada ou *manipulated variable* ou “MV”) a fim de que a atuação no processo causado pela MV leve o erro calculado a zero.

Figura 7 – Controlador de Processos HW4300



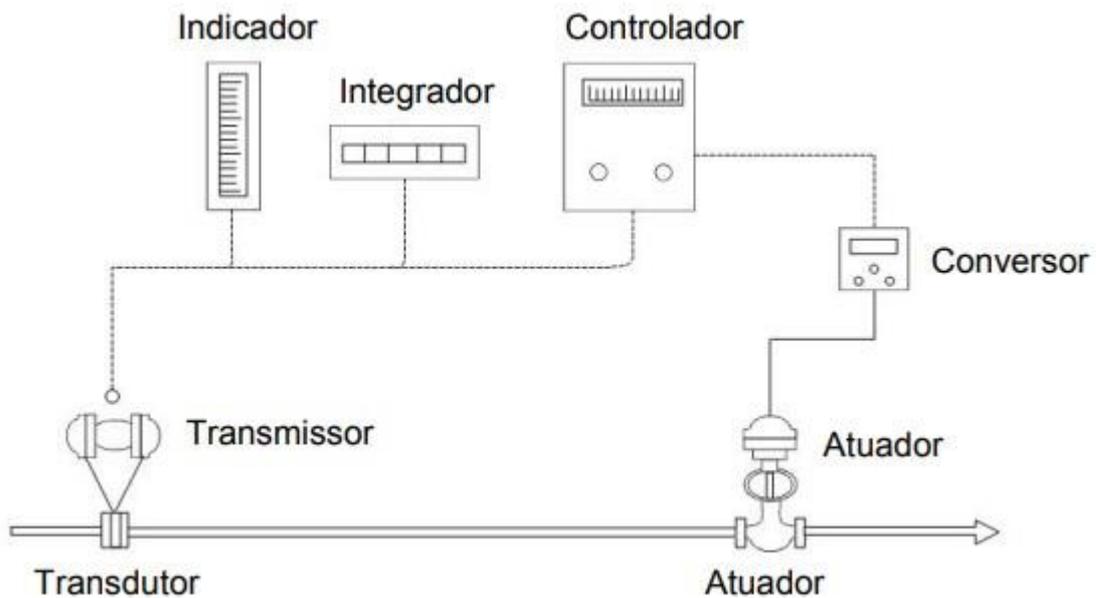
Fonte: Página da Coel Company

2.2.1.9 Elemento Final de controle ou atuador

Instrumento cuja função é transformar um sinal MV vindo de um controlador em uma atuação física efetiva no processo, por exemplo, válvulas, motores ou atuadores pneumáticos.

2.2.2 Configuração Típica dos Sistemas de Automação

Figura 8 – Disposição dos instrumentos de um sistema de automação



Fonte: ResearchGate ²

2.2.3 Classificação por sinal transmitido

Os elementos apresentados também podem ser classificados conforme o tipo de sinal a ser transmitido. A seguir observamos de forma simplificada os principais tipos de sinais a serem transmitidos e suas respectivas vantagens e desvantagens.

2.2.3.1 Elementos Pneumáticos

Nesses sistemas, emprega-se um gás comprimido para a modulação do sinal, no qual a pressão é ajustada de acordo com o valor que se deseja representar. A flutuação na pressão do gás é manipulada de forma linear em uma faixa especificada por padrões internacionais, abrangendo a variação de uma grandeza física ou sinal desde seu limite inferior até seu limite superior.

² <Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Arquitetura-de-um-sistema-de-automacao-industrial-As-tecnologias-e_fig1_229037374/ Acesso em: 07 jun. 2023.>

O método de modulação de pressão mais amplamente adotado na indústria para a representação de grandezas e para a transmissão ou recepção em instrumentos pneumáticos é o intervalo de 3 a 15 psi (aproximadamente 0,2 a 1,0 kgf/cm²), cobrindo a faixa de 0% a 100% do sinal em questão.

Normalmente, em sistemas de transmissão analógica, o valor de 0% da grandeza medida é representado por um sinal não nulo, o que facilita a detecção de falhas no caso de interrupção da comunicação, como no caso de rompimento da linha de gás comprimido. O ar comprimido é o gás mais comumente utilizado para transmissão, embora, em algumas situações, o nitrogênio também possa ser empregado.

2.2.3.2 Elementos Hidráulicos

Semelhante ao sistema pneumático e com desvantagens comparáveis, o sistema hidráulico se baseia na variação de pressão em fluidos hidráulicos para transmitir sinais ou potência. Esse método é especialmente empregado em situações que demandam alto torque ou quando o processo envolve pressões elevadas.

As vantagens associadas ao uso de dispositivos hidráulicos estão relacionadas à incompressibilidade do fluido e à sua capacidade de gerar consideráveis forças, permitindo o acionamento rápido de equipamentos de grande porte e dimensões. Já as desvantagens são atribuídas à necessidade de tubulações de óleo para transmissão e suprimento, inspeção periódica do nível de óleo bem como sua troca e a disponibilidade de reservatório para o armazenamento do fluido hidráulico.

2.2.3.3 Elétrico Analógico

A modulação de sinais é uma técnica aplicada tanto na corrente quanto na tensão de sinais elétricos. Devido aos avanços na tecnologia dos dispositivos eletrônicos microprocessados, essa forma de transmissão é amplamente adotada.

Assim como na transmissão pneumática, o sinal elétrico analógico é modulado linearmente dentro de uma faixa de valores predefinida, representando o intervalo completo de uma variável física em um processo industrial. Para comunicações de longa distância, é comum utilizar sinais de corrente contínua modulados entre 4 e 20mA como padrão. Em situação de curtas distâncias, aproximadamente até 15 metros, também são empregados sinais de tensão contínua modulados entre 1 e 5V.

2.2.3.4 Elétrico Digital

Nesse contexto de sinalização, informações sobre a variável medida ou outros dados relevantes para o processo industrial são transmitidos por meio de sinais digitais que passam por um processo de modulação e seguem padrões específicos.

Para garantir que a comunicação entre o emissor e receptor ocorra sem problemas, é estabelecida uma linguagem padrão ou protocolo de comunicação, semelhante ao que ocorre nas redes de computadores utilizadas em ambiente de escritório.

2.3 Grandezas e Unidades

2.3.1 Grandeza

É a característica de um evento, objeto ou substância que pode ser discernida com base em qualidades específicas e quantificada em termos numéricos. O termo grandeza pode se referir a uma propriedade genérica, como a noção de comprimento em um contexto amplo ou em uma propriedade particular como o comprimento de uma barra.

2.3.2 Sistema de grandezas

É uma estrutura organizada que consiste em diversas grandezas fundamentais, que são as grandezas básicas a partir das quais todas as outras grandezas são derivadas, e por unidade de medidas fundamentais que são utilizadas para quantificar essas grandezas.

2.3.3 Grandeza de base

Grandeza que, em um sistema de grandezas, é por convenção aceita como funcionalmente independente de outra grandeza.

2.3.4 Grandeza derivada

É uma medida que resulta da combinação de duas ou mais grandezas fundamentais em um sistema de grandezas. Ao contrário das grandezas fundamentais que são consideradas

independentes e não derivadas de outras, as grandezas derivadas são obtidas através de operações matemáticas ou combinações de grandezas fundamentais.

2.3.5 Unidade de medida

É uma grandeza específica, definida e adotada por convenção, com a qual outras grandezas de mesma natureza são comparadas para expressar suas magnitudes em relação àquela grandeza.

2.3.6 Símbolo de uma unidade de medida

Sinal convencional que designa uma unidade de medida.

2.3.7 Sistema de uma unidade de medida

Conjunto das unidades de base e unidades derivadas, definido de acordo com regras específicas, para um dado sistema de grandezas. Exemplo: Sistema Internacional de Unidades, (SI), baseado atualmente nas sete unidades de base apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Sistema Internacional de Unidades

GRANDEZA	Unidade	SI
	Nome	Símbolo
Comprimento	Metro	m
Massa	Quilograma	Kg
Tempo	Segundo	S
Corrente Elétrica	Ampère	A
Temperatura Termodinâmica	Kelvin	K
Quantidade de Matéria	Mol	Mol
Intensidade Luminosa	Candela	Cd

Fonte: (O autor, 2023).

2.3.8 Unidade de media derivada

Unidade de medida de uma grandeza derivada a partir de outras unidades mais fundamentais de um sistema de grandezas. Algumas unidades derivadas possuem nomes e símbolos especiais; por exemplo no SI tem-se as unidades derivadas listadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Unidades de medida derivadas

GRANDEZA	Unidade	SI
	Nome	Símbolo
Força	Newton	N
Energia	Joule	J
Pressão	Pascal	Pa

Fonte: (O autor, 2023).

2.4 Sistema de Incêndio e Lastro

As redes responsáveis pelo alagamento (lastro) e esgoto das EDCG Classe “Guarapari” funcionam de forma interligada tendo elementos de ligação comuns, sendo as manobras feitas unicamente através de válvulas. Assim o sistema de incêndio e lastro é projetado primeiramente para abastecer as tomadas de incêndio, sistemas de borrifadores, sistema de esguicho do convés e para encher os tanques de lastro. Suas características secundárias são proporcionar o esvaziamento dos tanques de lastro e alimentar o edutor de esgoto. Por funcionar através do acionamento da bomba de incêndio, o sistema de lastro está interligado ao de incêndio por meio de válvulas. Não existem válvulas de fundo para providenciar o alagamento total dos compartimentos (LIVRO DA EDCG, 1981).

O sistema de esgoto tem a função de retirar água dos compartimentos abaixo do convés de veículos, tanques de lastro e espaços vazios e geralmente opera através da atuação de uma bomba depende acoplada ao Motor de Combustão Principal (MCP) de bombordo (LIVRO DA EDCG, 1981). Contudo, é comum utilizar a BIL como um recurso auxiliar para pressurizar a rede de esgoto, promovendo assim arrastamento da água dos porões da embarcação através dos bocais de aspiração das redes que são providas de ralos. Segundo o Livro da EDCG (1981), a BIL é responsável por atender aos seguintes recursos do navio:

a) Coletores de água do mar: A água salgada é aspirada da caixa de mar principal existente no fundo em BE entre a antepara 62 ½ e a carena 61. Desta caixa de mar saem três (3) tomadas d'água. Uma (1) de 3" de diâmetro para as redes de incêndio e lastro e duas (2) de 1 ½" de diâmetro sendo uma (1) para suspiro e outra para tomada de água de mangueira. Através desses coletores, é possível pressurizar a rede de incêndio do navio através do processo de arrastamento da água para combater um sinistro a bordo.

b) Equalização dos lastros através da Rede de Incêndio e Lastro: Como foi mencionado anteriormente, as redes de lastro e incêndio trabalham intimamente ligadas, pois utilizam a mesma bomba (BIL). No entanto, essa ligação se reduz somente na área próxima à referida bomba, na Praça de Máquinas nº 2, de onde são efetuadas as manobras principais que colocam em funcionamento um ou outro sistema. A tubulação está dimensionada para assegurar uma eficiente retirada de lastro quando se utiliza a bomba de incêndio e lastro e o edutor simultaneamente. As redes de incêndio são dimensionadas para uma pressão mínima de trabalho de cerca de 4,6 Kg/cm² (65 psi) nas tomadas de incêndio com filtro, com escoamento de 150 l/min (40 gpm) na forma pulverizada e 300 l/min (80 gpm) na forma de jato sólido. O ramal principal da rede de incêndio tem 3" de diâmetro e a rede de lastro tem 4" de diâmetro.

Figura 9 – EDCG em faina de abastecimento de aguada



Fonte: (O autor,2023)

Figura 10 – EDCG “Camboriú” realizando faina de transbordo



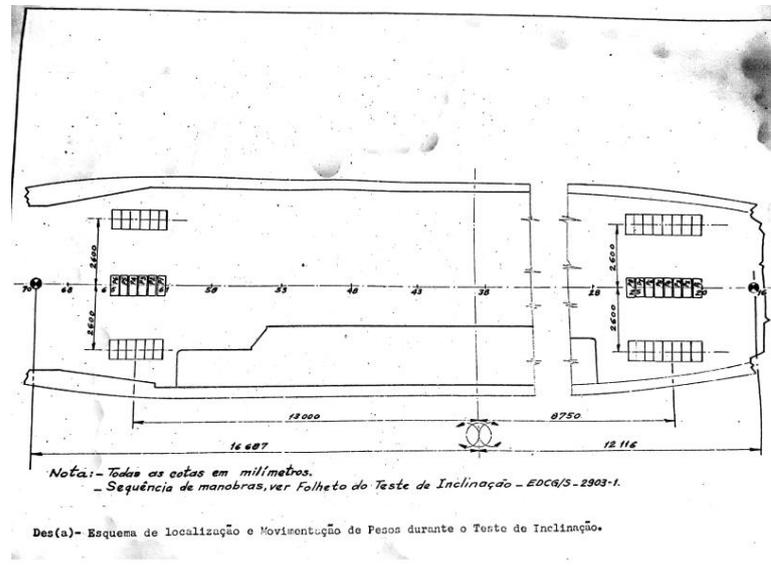
Fonte: (O autor, 2023)

Figura 11 – EDCG “Guarapari”



Fonte: (O autor, 2023)

Figura 12 – Vista superior da EDCG

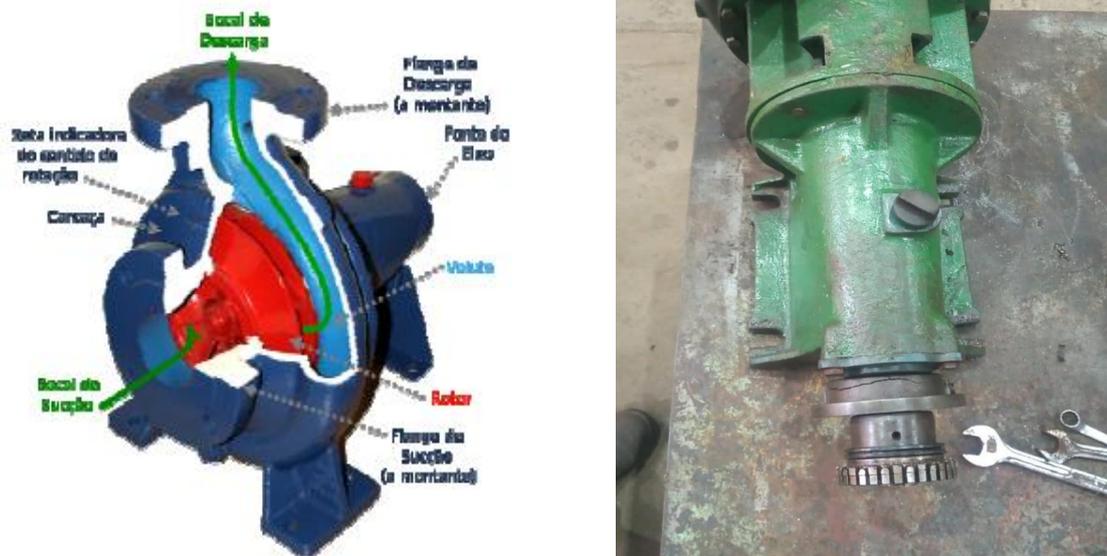


Fonte: (LIVRO DA EDCG, 1981)

2.4.1 Bomba Centrífuga

As bombas centrífugas são classificadas como máquinas de fluxo geradoras, pois convertem trabalho mecânico em energia para o fluido, e essa energia aumenta conforme o fluido é arrastado pela máquina. Estas bombas são utilizadas em diversos campos, como indústrias petroquímicas, usinas nucleares, saneamento básico ou em navios, assim como descreve o objetivo desse estudo. São constituídas por três partes principais: corpo (carcaça), rotor (impelidor) e eixo de acionamento, conforme apresentado nas Figuras 13(a) e 13(b).

Figura 13 – (a) Esquema de uma bomba centrífuga; (b) BIL da EDCG Classe “Guarapari”



Fonte: (O autor, 2023)

O acionamento das bombas centrífugas ocorre através de motores diesel, turbinas a vapor ou motores elétricos. Nesse trabalho, não serão abordados os aspectos de falhas que ocorrem em bombas centrífugas do conjunto bomba e motor elétrico de uma BIL de uma EDCG, pois o objeto do trabalho está em projetar um dispositivo de monitoramento para a análise de falhas do MIT componente desse conjunto.

2.4.2 Motor de Indução Trifásico

2.4.2.1 Princípio de Funcionamento

O estator é formado por um núcleo composto por lâminas magnéticas com ranhuras para acomodar o enrolamento trifásico. O rotor, que possui uma configuração do tipo tambor, também é construído a partir da sobreposição de lâminas magnéticas e possui ranhuras para acomodar o enrolamento do rotor, que é distribuído de maneira adequada. Durante o processo de partida, quando o enrolamento trifásico é conectado à tensão, o campo girante começa a girar no enrolamento do estator a uma velocidade total (ns). Esse movimento também afeta o enrolamento do rotor, induzindo nele tensões alternadas com a frequência da rede.

As correntes que fluem nas bobinas estão defasadas entre si, gerando um campo girante comum no rotor. Os polos desse campo estão atrasados em 90 graus em relação ao campo girante do estator, de acordo com a regra da mão direita. Portanto, durante a partida, é possível criar um conjugado constante entre os polos do estator e do rotor, que é aproximadamente 2 a 3 vezes maior que o conjunto nominal. Esse conjugado extra é capaz de superar a inércia da massa do rotor e da carga completa, iniciando o movimento do rotor a partir do repouso.

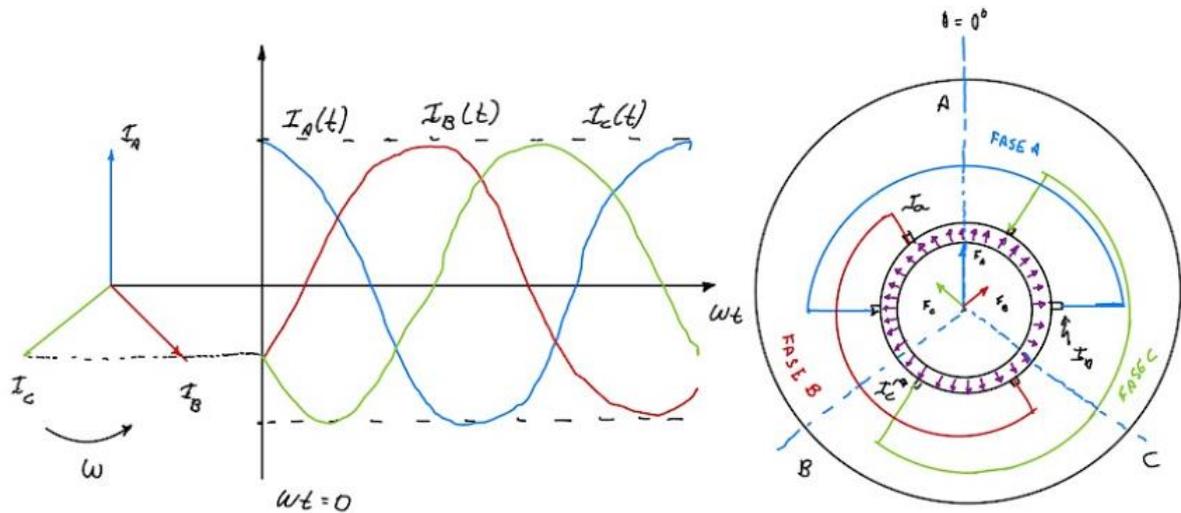
Ao observar o movimento do rotor, nota-se que ele gira na direção do campo girante, e, na fase inicial, a velocidade relativa entre os dois campos se torna cada vez mais próxima. Isso significa que a diferença de velocidade diminui progressivamente. Uma vez que a tensão induzida é resultado do corte entre esses campos, a redução na diferença de velocidade diminui a tensão, a frequência, a corrente e o campo do rotor, levando a uma redução no conjugado, que eventualmente atinge zero quando a velocidade se iguala à velocidade síncrona.

No entanto, se houver um conjugado agindo sobre o rotor, ele começa a atrasar em relação ao campo girante, aumentando assim a diferença de velocidade. Somente quando esse atraso ocorre é que são induzidas tensões nos enrolamentos do rotor, permitindo a existência de um campo de rotor e, conseqüentemente, a existência de um conjugado. Portanto, o rotor não precisa girar na mesma velocidade do campo girante, o que leva a essa categoria de motor ser chamada de motor assíncrono. A diferença de velocidade entre o rotor e o campo girante é conhecida como escorregamento, e sua medida é expressa como uma porcentagem da velocidade do campo girante do estator, sendo de 100% no momento da partida (FACENS, PINTO, 2016).

Em um motor assíncrono, o campo magnético girante do estator tem duas funções:

- a) Criação de um conjugado em conjunto com o campo girante do rotor, para deslocar o rotor e a carga;
- b) Criação de uma tensão no rotor por indução, formando dessa assim o campo magnético girante do rotor.

Figura 14 – Representação gráfica do campo magnético girante



Fonte: (O autor, 2023)

Segundo Chapman (2018), a tensão induzida nas barras do rotor de um motor de indução depende da velocidade do rotor em relação aos campos magnéticos. Como o comportamento de um motor de indução depende da tensão e da corrente do rotor, muitas vezes é mais lógico falar em velocidade relativa. Dois termos são comumente utilizados para definir o movimento relativo do rotor e dos campos magnéticos. Um deles é a velocidade de escorregamento, definida como a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor definida pela Equação (1), onde são relacionadas a velocidade de escorregamento da máquina (n_{esc}), velocidade dos campos magnéticos (n_{sinc}) e a velocidade mecânica do eixo do motor (n_m):

$$n_{esc} = n_{sinc} - n_m \quad (1)$$

Além da velocidade de escorregamento, existe outro termo usado para descrever esse movimento relativo. Esse termo é conhecido com escorregamento (s) e é definido pelas Equações (2) e (3):

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} (* 100\%) \quad (2)$$

$$s = \frac{\omega_{sinc} - \omega_m}{\omega_{sinc}} (* 100\%) \quad (3)$$

Devido ao aumento do escorregamento, a tensão e a corrente no rotor aumentam. Como resultado, um campo mais robusto é formado, acompanhado por um conjugado mais forte que pode superar a carga aplicada. No entanto, a rotação do motor cai apenas ligeiramente, uma vez que o aumento na carga devido ao aumento do escorregamento resulta em um conjugado mais elevado. Somente em situações de sobrecarga, o escorregamento aumenta significativamente, levando o motor a atingir seu conjugado máximo, mas mesmo assim a rotação diminui e o rotor para de girar. O valor máximo do escorregamento é normalmente de cerca de 20 a 30%, e o valor do conjugado máximo é estabelecido por regulamentos padrões (FACENS, PINTO, 2016).

Figura 15 – Conjunto bomba centrífuga e motor de indução da EDCG



Fonte: (O autor, 2023)

2.4.2.2 Normas estabelecidas ao MIT

Em todos os produtos fabricados em ambientes industriais, incluindo motores elétricos, existem regulamentações técnicas que orientam seu processo de fabricação, montagem e condições de operação. De acordo com os catálogos fornecidos pela EBERLE, que comercializa o MIT do projeto original das EDCG Classe “Guarapari”, há um conjunto de normas internacionais que estabelecem as diretrizes para o projeto desses motores. A norma de referência principal é a IEC 60034 (ARAÚJO, 2015).

Essas normas, regulamentadas pela *Internacional Electrotechnical Commission (IEC)*, estabelecem um padrão global de desempenho e construção para motores elétricos de indução utilizados na indústria, de acordo com a classe de eficiência à qual pertencem. Neste trabalho de pesquisa, as normas abordadas pela IEC 60034 foram seguidas para a classificação e análise dos motores. A norma 60034-1 define as classes de eficiência, como *IE1 (standard)*, *IE2 (high)* e *IE3 (premium)* para motores de indução com velocidade única de 2 a 6 polos.

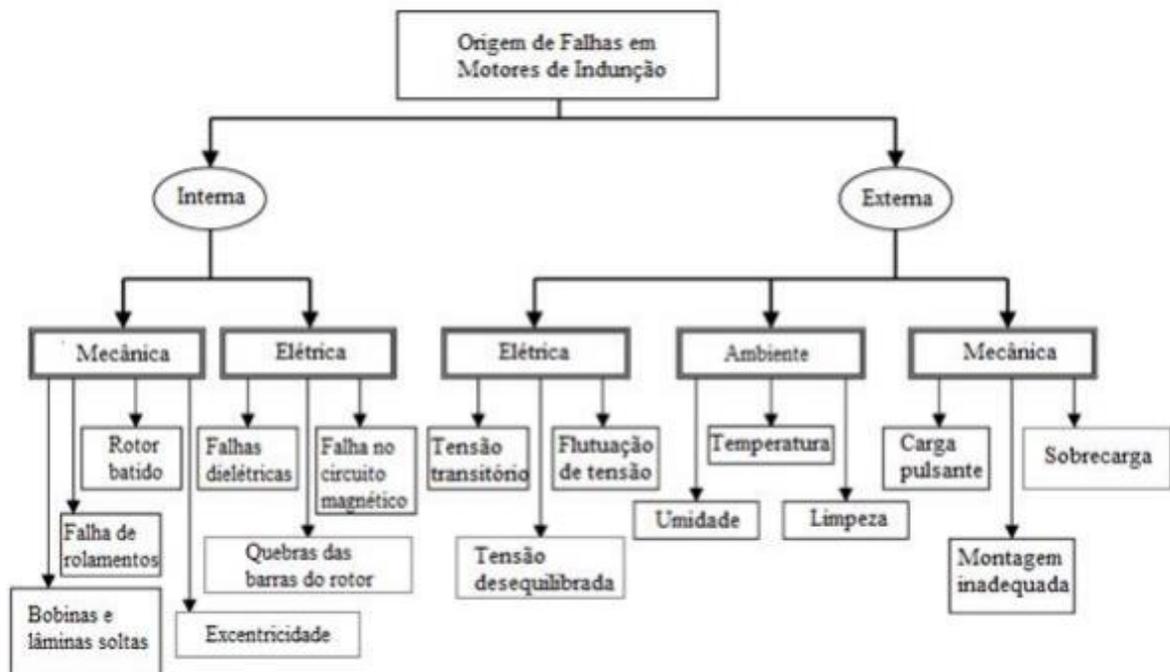
O presente projeto visa o desenvolvimento de um sistema de monitoramento com base nos critérios de desempenho estabelecidos pela norma mencionada. Os métodos para testar a eficiência e as perdas serão definidos de acordo com a norma IEC 60034-2. As medições de vibração devem seguir a norma IEC 6034-14 e a implícita ISO 10816-1, que trata da análise de máquinas por meio da medição de vibrações em partes fixas. Além disso, a instrumentação utilizada deverá utilizar a norma ISO 2954 (ARAÚJO, 2015).

2.4.2.3 Principais falhas do MIT

Conforme mencionado por AL Kazzaz (2003), os motores de indução são máquinas conhecidas por sua robustez e alta tolerância a falhas, tornando-se amplamente utilizados na indústria. É crucial tomar medidas preventivas para diagnosticar o estado dessas máquinas com antecedência, a fim de evitar possíveis problemas. As falhas em máquinas elétricas rotativas podem ter diversas origens, resultando de questões relacionadas ao projeto, imperfeições na fabricação, montagem, instalação, ambiente, natureza da carga e programação de manutenção. Motores de indução, assim como outras máquinas rotativas, estão sujeitos a forças tanto eletromagnéticas quanto mecânicas. Portanto, seu projeto deve ser cuidadosamente realizado de modo a garantir a interação harmoniosa entre essas forças, desde que as condições de instalação e operação sejam adequadas. Isso assegura um funcionamento estável e com níveis mínimos de ruído e vibrações. No entanto, quando ocorrem falhas, o equilíbrio entre essas forças é prejudicado, levando a problemas ainda mais graves.

As falhas em motores elétricos podem ser categorizadas com base em sua origem, sendo elas de natureza mecânica, elétrica ou associadas ao ambiente de operação. Estas falhas podem resultar de fatores como temperatura, umidade e condições de limpeza no ambiente (AL KAZZAZ, 2003; PINHEIRO, 2011). A Figura 16 apresenta a classificação das falhas em motores de indução com suas principais origens.

Figura 16 – Diagrama de Falhas de Motores de Indução



Fonte: (AL KAZZAZ, 2003).

2.4.2.4 Levantamento estatístico de confiabilidade de motores elétricos

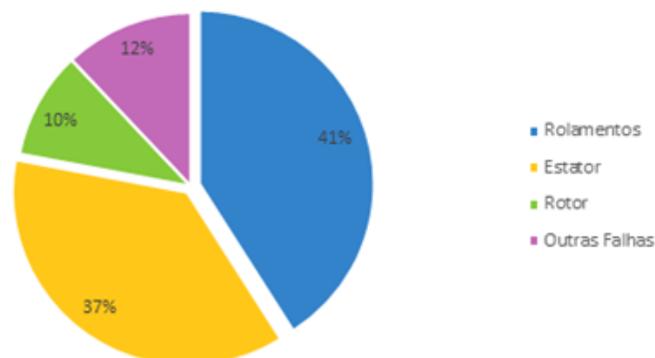
De acordo com Cardoso (1991), embora em alguns casos pontuais tenham sido identificados os mecanismos específicos relativos a ocorrências de falhas, até o início da década de setenta esse conhecimento era apenas qualitativo, não existindo, até essa data, qualquer documentação estatística que permitisse aos fabricantes e utilizadores dispor de uma referência precisa nesta matéria.

Uma síntese dos dados estatísticos mais relevantes para o estudo sobre de confiabilidade dos equipamentos elétricos utilizados em instalações industriais publicado por Dickinson em 1961 (BRITO, 2012), é apresentada na norma IEEE 493-1980. Conclui-se que a manutenção inadequada (17%) e defeitos de fabricação (15%) representam os principais fatores que

impactam a ocorrência de falhas em motores elétricos. Em termos das partes afetadas, o isolamento dos enrolamentos (50%) e os rolamentos (29%) são as áreas mais suscetíveis a problemas. No entanto, devido a algumas imprecisões encontradas nos trabalhos publicados em 1973/74, resultantes da falta de dados adequados, principalmente no contexto de motores, uma nova pesquisa foi realizada, com foco exclusivo nos equipamentos elétricos, sendo este estudo o único aprofundado, conforme observado em CARDOSO (1991).

Além dos trabalhos realizados pelo IEEE, outros institutos, como o EEI (*Edison Electric Institute*) e o EPRI (*Electric Power Research Institute*), também se empenharam em investigações semelhantes relacionadas à confiabilidade de equipamentos elétricos na indústria, como mencionado por CARDOSO (1991). Um estudo abrangendo 4.797 motores com potência superior a 100 HP conduzido pela General Electric e publicado pela EPRI utilizava diversas centrais de geração de energia elétrica, sendo disponibilizado ao público em 1983.

Gráfico 1 – Distribuição das falhas, segundo estudo publicado pela EPRI



Fonte: (Adaptado de CARDOSO, 1991, p.20).

Após a divulgação deste estudo, surgiu a oportunidade de confrontar algumas das conclusões prévias provenientes das pesquisas do IEEE. Como resultado, nos anos subsequentes, diversos trabalhos foram publicados para debater esse assunto, e simultaneamente, as análises anteriores foram atualizadas por diferentes institutos. De 1984 a 1986, o IEEE, de fato, publicou uma análise mais aprofundada dos dados previamente coletados, com o propósito de extrair conclusões adicionais e abordar questões que haviam sido levantadas na primeira publicação. Desses trabalhos, se destaca o publicado em 1984 devida a minuciosidade na apresentação de informações relacionadas aos motores de indução e pela análise dos efeitos da manutenção inadequada na confiabilidade de diversos componentes.

Em 1995 o IEEE publicou um novo estudo de falhas em motores de indução trifásicos na indústria petroquímica, terminais de gás e refinarias de petróleo. Este novo trabalho modificou ainda mais as descobertas, identificando o tamanho e a alimentação do motor, condições de condução, proteção elétrica, manutenção e análises adicionais iniciadoras de falhas.

Na Tabela 3 é apresentado um quadro comparativo sobre os principais resultados obtidos pela EPRI e IEEE, contudo, o estudo apresenta algumas características distintas que ainda tornam possível comparar alguns resultados (CARDOSO, 1991).

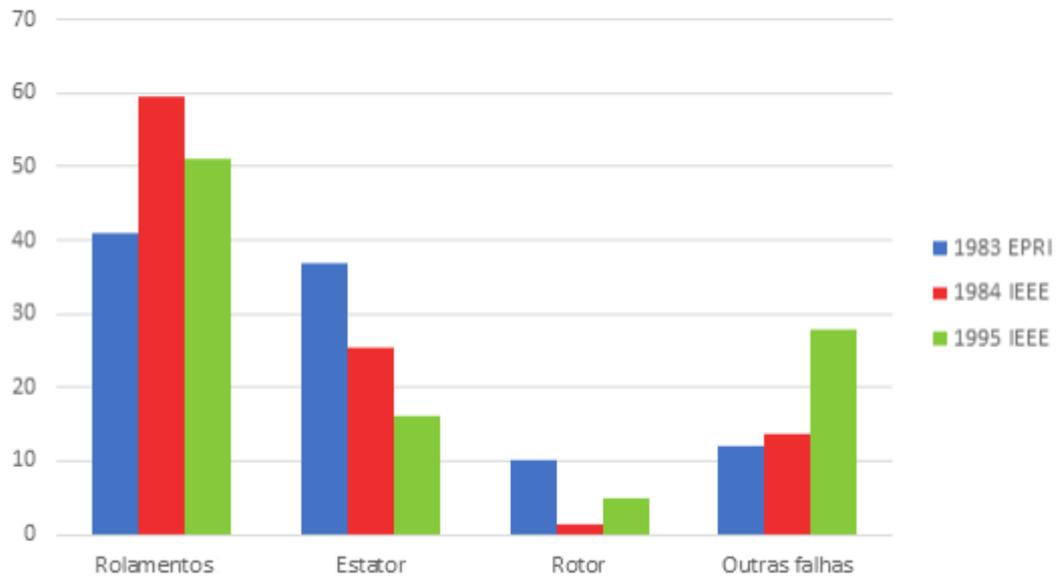
Tabela 3 – Comparativo do EPRI de 1983 e das pesquisas IEEE de 1984 e 1995

	Dickinson		IEEE				EPRI		
	1962 ⁽¹⁾		1974	1980	1984	1986	1983	1985	
Número de instalações	66	58	68	75	75	75	132	168	
Número de empresas	33	33	30	33	33	33	56	65	
Número de motores	-	-	5.631	1.141	1.141	1.141	4.797	6.312	
Potência (HP)	< 200	> 250	> 50	> 200	> 200	> 200	> 100	> 100	
Tempo de uso (anos)	-	-	> 10 (65%)	< 15	< 15	< 15	10	10	
Unidade/ano	185.686	1.932	42.463	5.085	5.085	5.085	⁽²⁾	⁽²⁾	
Total de avarias (média)	-	-	561	360	360	360	1.221	1.221	
Taxa de avarias	0,0513	0,1087	0,0132	0,0708	0,0708	0,0708	0,034 ⁽²⁾	0,0313 ⁽²⁾	
Causas de avarias									
			⁽¹⁾	⁽³⁾	⁽⁴⁾				
Defeitos de fábrica	-	-	15	20,1	20,3	22,8	20,5	32,8	31,1
Funcionamento impróprio	-	-	4	3,6	3,3	1,3	1,0	-	-
Erros de operadores	-	-	0	6,8	5,7	2,5	8,1	-	-
Funcionamento inadequado	-	-	4 ⁽⁶⁾	10,4 ⁽⁶⁾	9,0 ⁽⁶⁾	3,8 ⁽⁶⁾	9,1 ⁽⁶⁾	10,2	10,2
Adaptação motor-carga	-	-	-	4,9	4,9	6,3	4,8	-	-
Proteção elétrica inadequada	-	-	-	5,8	5,3	10,1	1,4	-	-
Proteção física inadequada	-	-	-	6,1	6,5	7,6	6,2	-	-
Utilização inadequada	-	-	9	16,8 ⁽⁶⁾	16,7 ⁽⁶⁾	24,0 ⁽⁶⁾	12,4 ⁽⁶⁾	6,8	6,1
Manutenção inadequada	-	-	17	21,4	22,8	16,5	25,2	-	-
Instalação e testes deficientes	-	-	1	12,9	15,9	11,4	14,3	-	-
Agentes externos	-	-	1	3,9	2,8	2,5	4,8	-	-
Transporte inadequado	-	-	0	0,6	0,8	1,3	0	-	-
Outras, não especificadas	-	-	53	13,9	11,7	17,7	13,7	50,2	52,6
Componentes avariados ou áreas afetadas (%)									
			⁽¹⁾	⁽³⁾					
Mancais	-	-	29	50,0	59,6	-	-	41	41
Estator, enrolamentos	-	-	50	24,7	25,4	-	-	37	36
Rotor, acoplamentos	-	-	4	8,9	1,4	-	-	10	9
Escovas e anéis	-	-	-	0	8,5	-	-	-	-
Acessórios, outros	-	-	17	16,4	5,1	-	-	12	14
Total de avarias considerado	-	-	561	304	71	-	-	872	1.052

Fonte: (BRITO, 2002, p.11).

A partir das análises realizadas sobre as origens das falhas, (CARDOSO, 1991) chegou à conclusão de que, nos ambientes externos, a principal causa para ocorrência de falhas é a utilização imprópria, frequentemente agravada pela soma de diversas causas relacionadas. Além disso, defeitos de fabricação e manutenção inadequada também desempenham um papel significativo. Já em ambientes internos, a utilização inadequada é um fator de importância limitada, enquanto defeitos de fabricação e, em particular, a manutenção inadequada, surgem como as causas principais das falhas.

Gráfico 2 – Comparação de falhas de motores de indução das pesquisas EPRI 1983 e IEEE 1984 e 1995



Fonte: (Adaptado de PENROSE, 2012).

De acordo com os estudos estatísticos realizados, é possível identificar a maior ocorrência de falhas de funcionamento do MIT oriundas de problemas nos enrolamentos e no estator da máquina de indução. Assim, segundo Brito (2002), se as falhas na operação do equipamento não forem detectadas, poderão provocar a quebra do motor, causando prejuízos e transtornos.

2.4.2.5 Principais falhas no estator

Segundo Cardoso (1991), a maior parte das falhas relacionadas ao estator dos motores de indução encontra-se associada aos respectivos enrolamentos e falhas no núcleo ferromagnético. A deterioração térmica da isolamento em uma fase do enrolamento do estator pode ser ocasionada por desequilíbrio de tensão entre as fases ou pela falta de uma fase. A falha em uma única fase do enrolamento resulta da interrupção na alimentação do motor. O desequilíbrio de tensão pode ser provocado por cargas desbalanceadas conectadas à fonte de alimentação do motor (BACCARINI, 2005).

De acordo com Baccarini (2005), a degradação do isolamento do estator geralmente tem início com um curto-circuito envolvendo apenas algumas espiras de uma mesma fase. Esse curto-circuito, que atinge cerca de duas vezes a corrente do rotor bloqueado, resulta em um superaquecimento localizado que rapidamente se espalha para outras partes do enrolamento. Portanto, a detecção de falhas entre as espiras é particularmente crucial, pois é considerada o

ponto de partida para o desenvolvimento de outras falhas nos enrolamentos. Isso inclui curto-circuitos entre bobinas da mesma fase, entre bobinas de fases distintas e entre fase e terra, que podem causar danos irreversíveis ao núcleo do estator.

Figura 17 – Enrolamento do estator em boas condições de funcionamento



Fonte: Site da TRACTIAN ³

Figura 18 – Enrolamento do estator com deterioração do isolamento em uma fase



Fonte: Catálogo WEG.net ⁴

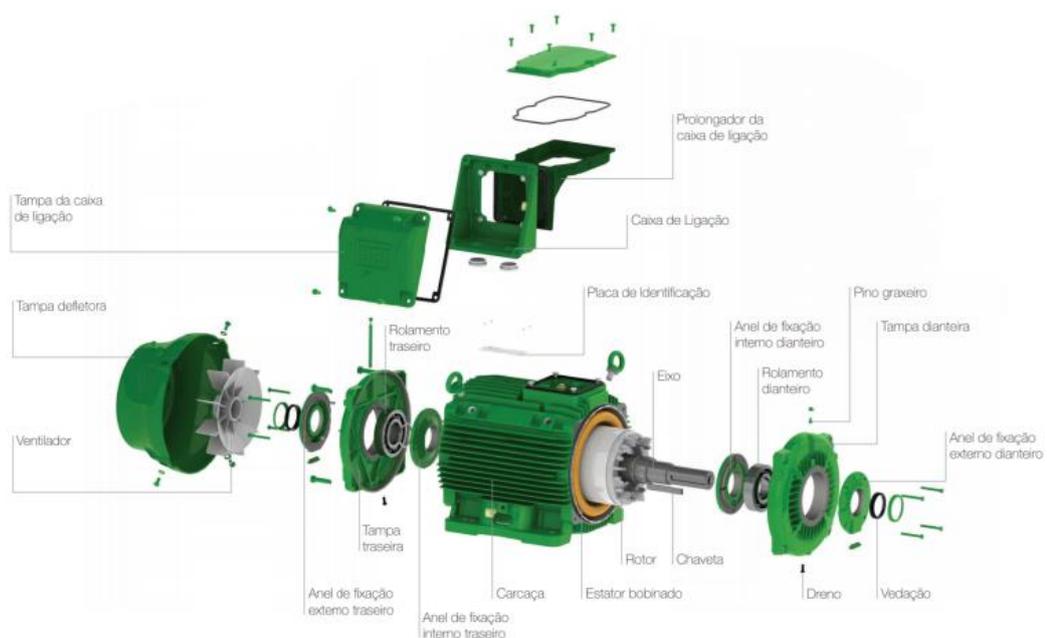
³ <Disponível em: <https://traction.com/blog/por-que-os-motores-eletricos-queimam/> Acesso em: 07 jun. 2023.>

⁴ <Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h0b/hbf/WEG-danos-em-enrolamentos-motores-trifasicos-50009255-brochure-portuguese-web.pdf>>

2.4.2.6 Principais falhas no enrolamento

A grande maioria dos motores de indução emprega rolamentos como sistema de apoio para o eixo. Normalmente, são utilizados dois rolamentos, um localizado na tampa frontal e o outro na tampa traseira, conforme ilustrado na Figura 19. Esses rolamentos desempenham o papel de sustentar o eixo de forma radial, permitindo que ele realize movimentos rotacionais com facilidade. Isso, por sua vez, reduz a fricção entre as partes móveis. A principal função dos rolamentos é assegurar que o rotor seja adequadamente suspenso, de modo que possa girar livremente, evitando qualquer contato físico entre o rotor e o estator.

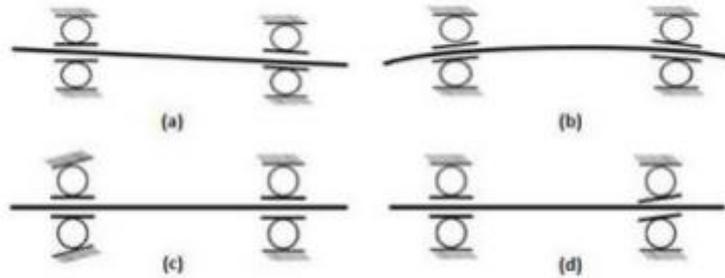
Figura 19 – Vista explodida motor elétrico radial



Fonte: Página da WEG

A instalação inadequada dos rolamentos também pode resultar em falhas provocadas pelo excesso de pressão exercida sobre o rolamento em relação ao eixo ou à carcaça, bem como pelo desalinhamento, pela flexão do eixo e pela deformação da pista deslizante interna ou externa, causando danos físicos. Esses problemas podem surgir devido a cargas mais pesadas do que as previstas, sobrecarga ou ajustes excessivamente apertados. O desalinhamento do rolamento, que pode ocorrer de quatro maneiras diferentes conforme ilustrado na Figura 20 (ARAÚJO, 2015), é uma das principais causas dessas falhas.

Figura 20 – Situações de incorreta instalação dos rolamentos por (a) desalinhamento do veio, (b) deflexão do veio, (c) anel exterior torcida e (d) anel interior torcida.



Fonte: (ÁRAUJO, 2015, p. 32).

A fadiga é outro tipo de falha causada por circunstâncias naturais de uso, que está relacionada ao esforço mecânico do material devido às altas tensões que ocorrem entre as pistas e as esferas durante a operação. Depois de certo tempo, essa fadiga gera rachaduras no material e rompimentos nas pistas do rolamento. Defeitos que, durante a operação do motor elétrico, vão aumentando substancialmente podendo chegar à quebra do rolamento que, dependendo da aplicação, podem até queimar o motor;

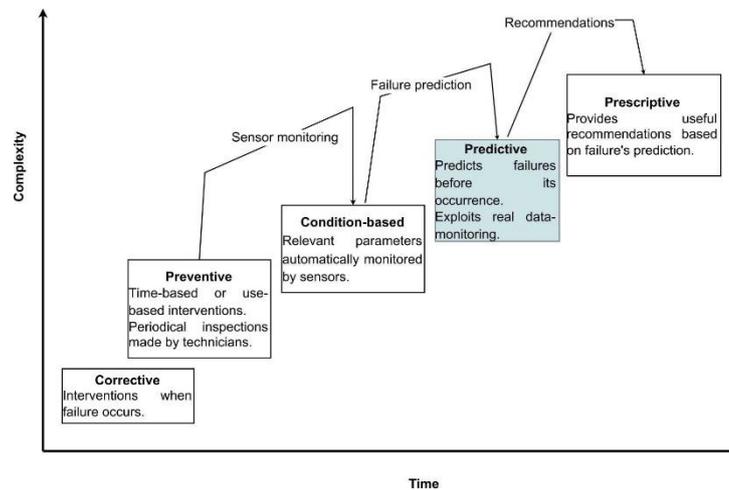
É importante destacar que uma falha pode ocorrer devido a múltiplos motivos e, da mesma forma, uma falha inicial pode desencadear outra (DIARRASSOUBA, 2017). Os rolamentos, especialmente aqueles empregados em motores elétricos, estão sujeitos a várias falhas, dependendo das condições operacionais, as quais podem afetar adversamente sua eficiência. Essas falhas têm um impacto significativo na vibração gerada, podendo até levar à quebra do rolamento, resultando na paralisação da máquina e, potencialmente, da linha de produção.

2.5 Gerenciamento da Manutenção

A manutenção desempenha um papel fundamental na indústria, uma vez que seus gastos podem compor uma parcela significativa dos custos totais de produção de uma empresa. Estratégias de manutenção eficazes têm a capacidade de evitar interrupções inesperadas na produção, reduzir despesas e até mesmo prolongar a vida útil de máquinas industriais. Por esses motivos, as abordagens de manutenção têm se desenvolvido ao longo do tempo, impulsionadas pelo interesse e esforços de pesquisadores, engenheiros, técnicos e especialistas. A Figura 21 retrata essa progressão ao longo dos anos. A abordagem mais rudimentar é a manutenção

corretiva (MC), também conhecida como “esperar o equipamento falhar”, que envolve a substituição ou reparo de peças somente quando estas estão danificadas e o equipamento não pode operar sem intervenção.

Figura 21 - Progressão da manutenção ao longo dos anos



Fonte: (NUNES; SANTOS; ROCHA, 2022).

Até os anos 1920, as abordagens de manutenção não eram direcionadas para a prevenção e previsão de falhas, nem incluíam a substituição de peças sobressalentes ou revisões abrangentes após um certo período de operação. Em outras palavras, as práticas de manutenção se limitavam a reparos pontuais realizados nos equipamentos somente quando apresentavam falhas e deixavam de funcionar. Entretanto, após passado o período da Segunda Guerra Mundial, a gestão da manutenção adquiriu uma modelagem sistemática sustentada pela adoção de procedimentos e técnicas de manutenção periódicas.

A partir dos anos 1970, ocorreu um avanço significativo com o advento dos sistemas computacionais e o desenvolvimento de técnicas de análise de dados. Isso permitiu a coleta e análise de dados em intervalos cada vez mais curtos, aprimorando os projetos de sistemas e equipamentos. Esse progresso impulsionou o surgimento e rápido desenvolvimento das técnicas de Manutenção Preventiva Preditiva (MPrePRE). Em um navio de guerra da MB, o ensaio de vibração de máquinas rotativas é uma das principais técnicas vinculadas a MPrePRE responsável por analisar, coletar dados, estabelecer limites operativos e possíveis causas e correções de deficiências nos sistemas os quais foram submetidos os testes (NUNES; SANTOS; ROCHA, 2022).

Segundo a Publicação da Marinha do Brasil EMA-420 (2002), a manutenção é definida como “Conjunto de atividades técnicas e administrativas que são executadas visando manter o material na melhor condição para emprego com confiabilidade, segurança e custo adequado, e quando houver avarias, reconduzi-lo àquela condição”. Para alcançar esse objetivo, são empregados vários métodos de manutenção, sendo que três deles se destacam: Manutenção Corretiva, Manutenção Preventiva Periódica e Manutenção Preventiva Preditiva.

2.5.1 Manutenção Corretiva

Conforme estipulado pela Norma NBR-5462(1994), a Manutenção Corretiva é executada quando um equipamento, item ou sistema sofre uma avaria e tem como objetivo restaurar o equipamento para que possa desempenhar sua função específica. Essa definição é significativa, pois estabelece que a manutenção é realizada apenas após a ocorrência de uma falha no equipamento.

Como resultado dessa abordagem, a Manutenção Corretiva tende a aumentar os custos de manutenção, uma vez que, quando um equipamento atinge um estágio crítico que leva a uma falha, a probabilidade de outros componentes serem afetados é considerável. Isso resulta em um aumento gradual nos custos de substituição de peças e realização de serviços corretivos, tornando-a a modalidade de manutenção mais dispendiosa. A manutenção corretiva ocorre após a falha do equipamento e seu objetivo é trazê-lo de volta ao estado operante no menor tempo possível (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009).

2.5.2 Manutenção Preventiva Periódica

Segundo Girdhar e Scheffer (2004), na manutenção corretiva, os equipamentos são utilizados até o momento de quebra ou falha, sendo substituídos apenas quando há parada total do processo. Como esta é uma interrupção não esperada pelo operador, faz-se necessária a existência de um estoque de partes sobressalentes, pois o momento de ocorrência da falha pode acontecer em um período crítico de funcionamento do equipamento.

Conforme estipulado pela Norma NBR-5462 (1994), a Manutenção Preventiva Periódica (MPrePer) é um tipo de manutenção que envolve a realização periódica de serviços, de acordo com critérios estabelecidos pelos fabricantes. Esses serviços têm como objetivo reduzir a probabilidade de falhas em equipamentos e sistemas, visando diminuir a sua indisponibilidade.

A Manutenção Preventiva Periódica ocorre antes da falha do equipamento, sendo constituídas de ações como lubrificação e reposição de parte e componentes, e pequenos ajustes; seu objetivo é aumentar a confiabilidade do equipamento durante o uso, retardando a ocorrência de falhas (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009). No entanto, como desvantagem, a MPrePer amplia os intervalos em que os equipamentos ficam inativos, uma vez que, de tempos em tempos, é necessário realizar os serviços de manutenção programados para cada equipamento.

2.5.3 Manutenção Preventiva Preditiva

A partir da década de 70, com o avanço da tecnologia impulsionado pela evolução dos computadores, houve um substancial progresso nas técnicas de análise de dados e inspeções de sistemas. Isso se deveu ao surgimento de tecnologias que permitiram o desenvolvimento de equipamentos e softwares capazes de coletar, processar e analisar dados durante a operação de sistemas.

Essa evolução criou condições para o desenvolvimento da Manutenção Preventiva Preditiva (MPrePRE) que tem como objetivo diminuir despesas a fim de melhorar a competitividade das empresas. Ela faz uso de informações de sensores em conjunto com métodos analíticos para aprimorar o planejamento das intervenções de manutenção. A adoção dessa abordagem de manutenção exige a colaboração de diversos intervenientes e requer conhecimentos e competências em várias áreas, uma vez que abarca desde a captura de dados relevantes no ambiente fabril até o seu processamento, transmissão, armazenamento e análise, com o intuito de extrair informações significativas.

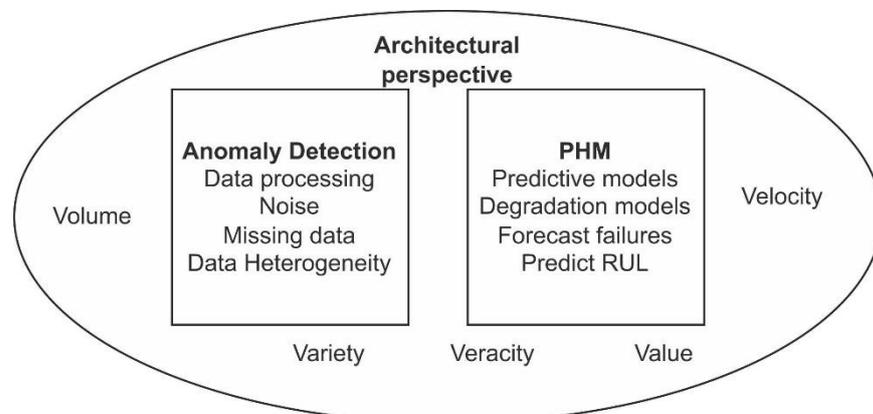
A MPrePRE envolve conhecimentos abrangentes de várias disciplinas, o que a torna um tópico de vasta complexidade. Em termos gerais, para desenvolver um sistema eficaz de Manutenção Preventiva Preditiva, é necessário um tratamento minucioso dos dados, a fim de lidar com problemas comuns em dados industriais, como informações ausentes, ruídos e valores discrepantes. Muitas técnicas de detecção de anomalias abordam esses desafios, enquanto identificam padrões incomuns relevantes. Por outro lado, a previsão do Tempo de Vida Remanescente (RUL) de um ativo é um componente central da MPrePRE e está vinculado à previsão e gestão da saúde do equipamento (NUNES; SANTOS; ROCHA, 2022). Embora esses temas, previsões e detecção de anomalias, frequentemente sejam tratados

⁵ <Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915006973/> Acesso em: 18 jul. 2023.>

separadamente, ambos são fundamentais para a Manutenção Preventiva Preditiva, uma vez que os resultados da detecção de anomalias podem enriquecer os modelos preditivos, aprimorando seu desempenho, ao mesmo tempo em que contribuem para uma abordagem de previsão mais abrangente. Como ilustrado na Figura 22, a MPrePRE muitas vezes está relacionada aos 5V's⁵ do Big Data: velocidade, veracidade, valor, volume e variedade. Para atender a esses requisitos em um ambiente industrial, a arquitetura utilizada desempenha um papel crucial, especialmente em relação ao volume, velocidade e variedade de dados. Isso ocorre porque sensores e dispositivos geram grandes volumes de dados (volume) de diversos tipos, como imagens, vídeos, textos e outros (variedade), como alta taxa de geração, que precisam ser analisados em tempo real ou quase real (velocidade). O volume desempenha um papel essencial no desenvolvimento dos modelos preditivos, uma vez que geralmente exigem grandes conjuntos de dados para treinamento e ajuste. A importância da velocidade está relacionada à necessidade de coletar e processar dados em tempo real, a fim de prever problemas de forma oportuna e planejar ações adequadas. A veracidade diz respeito à precisão e confiabilidade de dados o que é crucial na MPrePRE, uma vez que os sensores e dispositivos operam em condições adversas e estão sujeitos a dados incorretos (NUNES; SANTOS; ROCHA, 2022).

Nesse contexto, a detecção de anomalias desempenha um papel relevante ao identificar esses dados incorretos e melhorar o desempenho preditivo dos métodos de previsão. Assim, o valor da informação de um ensaio realizado em uma máquina representa um conhecimento valioso extraído dos dados e depende fortemente dos métodos usados para detectar anomalias, uma vez que esses métodos extraem informações valiosas dos dados.

Figura 22 - Perspective arquitetônica



Fonte: (NUNES; SANTOS; ROCHA, 2022)

2.6 Técnicas para Análise de Vibrações Mecânicas

Conforme elucidado por Sinha (2010), a vibração de um sistema mecânico envolve uma constante conversão de energia cinética para energia potencial, com a última sendo gradualmente dissipada por um elemento de amortecimento. Isso implica que um objeto acumula energia na forma de vibração até que sejam completamente dissipadas. Quando uma excitação constante está presente, o equilíbrio entre essa excitação e a energia dissipada resultará em um nível específico de vibração. “As fontes de vibração mais comuns em maquinários estão relacionadas com a inércia de parte móveis na máquina” (MURPHY; VANCE; ZEIDAN, 2010, pg. 1). Os mesmos autores também ressaltam que as leis de Newton estipulam que é necessária uma força para acelerar uma massa, e, como reação a essa aceleração, outra força deve surgir.

As vibrações são geradas pelas características operacionais de todas as máquinas rotativas, incluindo aspectos como o alinhamento e equilíbrio de suas peças giratórias. Quando medimos a magnitude dessas vibrações em frequências específicas, podemos obter informações valiosas sobre a precisão do alinhamento do eixo, o estado dos rolamentos e engrenagens, e o impacto da ressonância na carcaça da máquina, tubulações e outras estruturas de suporte (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004, p.18).

2.6.1 Características da análise de vibração

A análise de vibrações geralmente é conduzida por meio da análise de sinais capturados por sensores de aceleração. Embora seja possível processar esses sinais no domínio do tempo para detectar falhas, essa abordagem não é adequada para o diagnóstico, (BEZERRA, 2004). Portanto, a prática comum é realizar a análise no domínio da frequência. Dentre as ferramentas matemáticas disponíveis para essa transformação, destacam-se a Transformada de Fourier, geralmente implementada por algoritmos de Transformada Rápida de Fourier (FFT) discutidas em (CHAUDHARI; GAIKWAD; KULKARNI, 2014). Além da Transformada de Rápida de Fourier utilizada para análise de vibração também são conhecidas para tal finalidade, a Transformada Walvelet Discreta (BOLSHUNOVA; KOROLYOV, 2015) e a Transformada de Hilbert (BEZERRA, 2004). Embora outras transformadas possam oferecer vantagens específicas em relação à FFT, todos os estudos se baseiam em análises e conceitos do domínio da frequência.

Realizar medições periódicas dos parâmetros de operação pode ajudar na detecção de problemas em rolamentos, tais como desgaste ou defeitos, bem como identificar folgas mecânicas ou danos em engrenagens de máquinas rotativas. Segundo Murphy, Vance e Zeidan (2010), as partes rotativas desbalanceadas podem incorrer, de acordo com a segunda lei de Newton, uma reação nos suportes dos rolamentos, que será uma força rotativa. E esta força rotativa pode atuar sobre o centro de massa do rotor quando acelerado por uma força centrípeta, gerando um efeito de vibração na estrutura da máquina de indução.

Ao estudar as tendências de vibração após a manutenção, é possível identificar práticas inadequadas, como instalação incorreta de rolamentos, desequilíbrio dos rotores ou falta de precisão no enrolamento. Assim, diante da importância da análise de vibração no domínio do tempo e no domínio da frequência para identificar essas falhas capazes de inviabilizar o funcionamento de uma máquina de indução, neste trabalho serão apresentadas as equações matemáticas que norteiam a análise de vibração em rolamentos de motores de indução.

2.6.2 Análise de vibração no domínio do tempo

A vibração é um movimento periódico e harmônico, e a posição da massa em função do tempo possui características senoidais (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004, p.25).

$$x(t) = x_0 \cdot \sin \omega \cdot t \quad (4)$$

Onde X_0 é a posição máxima do corpo e ω é a velocidade angular da vibração. E a velocidade do corpo pode ser obtida ao derivar a Equação (4), obtendo a Equação (5).

$$v(t) = x_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega \cdot t \quad (5)$$

Se quisermos obter a aceleração podemos derivar a velocidade em relação ao tempo e obter o resultado da Equação (3).

$$a(t) = -x_0 \cdot \omega^2 \cdot \text{sen} \omega \cdot t \quad (6)$$

Amplitude é a altura do pico da onda em relação à referência e está diretamente relacionada com a quantidade de energia relativa transmitida pela onda. Já o Comprimento de Onda é a distância ocupada no espaço por um ciclo da onda e a Frequência é o número de vezes em que vibração se repete em um período de tempo de um segundo.

A análise no domínio do tempo se dá através de algumas figuras de mérito como, por exemplo, valor RMS (valor eficaz ou raiz do valor quadrático médio, do inglês, *Root Mean*

Square), valor de pico, valor médio, fator de crista e o fator k. Algumas das mais relevantes métricas aplicadas a sinais oriundos de sensores de vibração que possibilitam a identificação de uma falha da máquina a ser analisada:

a) Valor RMS

O valor eficaz, também chamada de valor RMS, de um sinal de vibração é uma medida que avalia a potência presente nesse sinal vibratório, ao passo que também é reconhecida como uma métrica para avaliar a intensidade da vibração. A fórmula para calcular o valor eficaz de um sinal de vibração é a seguinte:

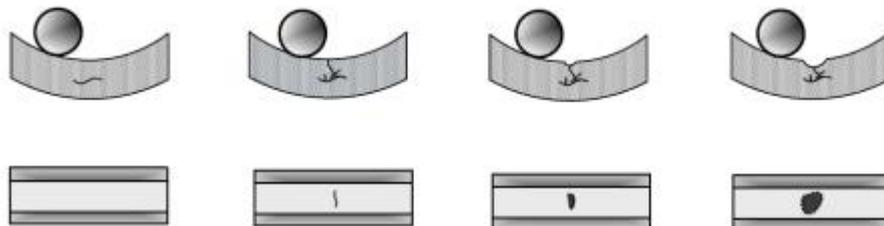
$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2} \quad (7)$$

b) Valor de pico

$$Pico = RMS \cdot \sqrt{2} \quad (8)$$

O valor de pico apresentado na Equação (5), é outra métrica importante para acompanhar alterações na quantidade de impulsos presentes no sinal de vibração, o que pode indicar um momento nos danos por pulsação, conforme ilustrado na Figura 23. Outrossim, é importante notar que essa abordagem não é totalmente infalível, uma vez que outros fatores, como movimentos abruptos do sensor ou interferências, podem também resultar em um aumento na amplitude do sinal.

Figura 23 - Dano causado pelo aumento de pulso



Fonte: (BEZERRA, 2004)

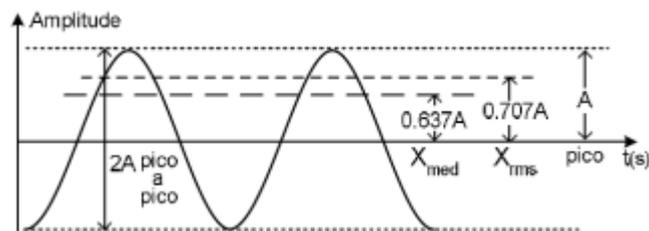
c) Valor médio

Já o valor médio de uma onda senoidal pode ser representado pela área sob a curva, em um intervalo T, dividido pelo período T.

$$\text{Valor Médio} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i \quad (9)$$

Na Figura 24 é apresentada a relação entre valor médio, valor RMS e valor de pico referente a um sinal senoidal.

Figura 24 – Expressão gráfica do valor Médio, RMS e de Pico

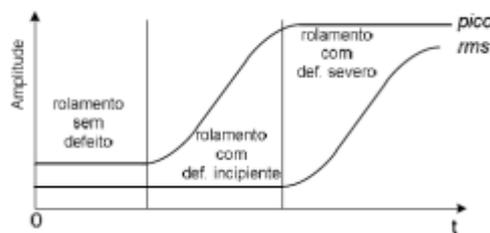


Fonte: (BEZERRA, 2004)

d) Fator de crista

O fator de crista (F_C), que se define como a proporção entre o valor de pico do sinal e o valor eficaz (ou RMS), pode ser uma métrica mais apropriada para este tipo de uso. Nas figuras abaixo são mostrados o valor de pico e o valor RMS para as diferentes condições de um rolamento.

Figura 25 (a) – Condição do rolamento



Fonte: (BEZERRA, 2004)

Figura 25 (b) – Variação do fator de crista



Fonte: (BEZERRA, 2004)

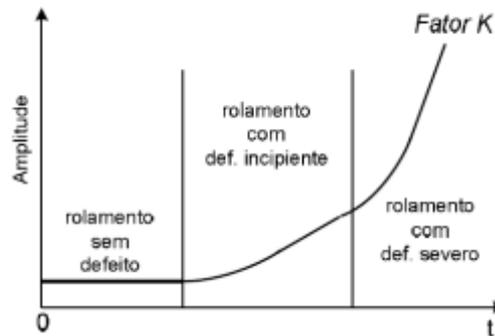
Na Figura 25 (b), é exibida a variação do fator de crista (F_C) sob as mesmas condições. Nota-se que, quando o defeito está em estágio inicial, tanto o valor de pico quanto o F_C conseguem claramente sinalizar o surgimento de uma falha na pista ou nas esferas do rolamento. No entanto, à medida que a falha se propaga pela superfície do rolamento, o nível de ruído aumenta, fazendo com que o valor eficaz (RMS) cresça mais rapidamente do que o valor de pico. Como resultado, o F_C diminui, indicando o F_C não é um indicador confiável de falhas em estágios avançado, como definido por:

$$F_C = \frac{\text{Valor de Pico}}{\text{Valor RMS}} \quad (10)$$

e) Fator K

O Fator K foi proposto como uma solução para uma limitação encontrada no Fator de Crista (F_c) quando se trata de falhas graves. Esse parâmetro leva em consideração o fato de que, à medida que uma falha (como uma fissura) se desenvolve e piora, o valor eficaz (RMS) do sinal de vibração aumenta, o que também leva a um aumento no valor de F_k .

Figura 26 – Variação do Fator K



Fonte: (BEZERRA, 2004)

Assim, em contraste com F_c , o Fator K mostra uma diminuição, podendo tanto o valor RMS quanto o valor de pico resultarem em um aumento no Fator K. Abaixo é apresentado como calcular o Fator K por meio da Equação (11):

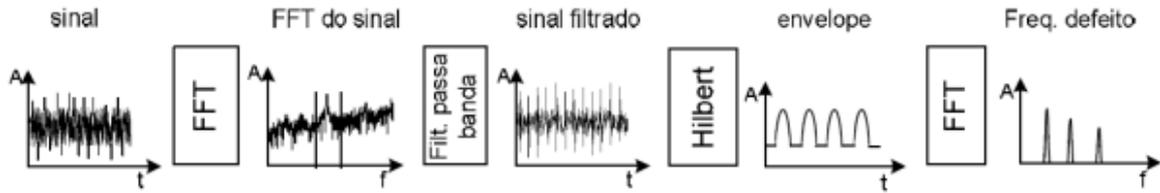
$$F_K = (\text{Valor de Pico}) * (\text{Valor RMS}) \quad (11)$$

2.6.3 Análise de vibração no domínio da frequência

Os métodos discutidos na seção anterior possibilitam detectar problemas, mas não determinar com precisão a natureza das falhas (BEZERRA, 2004). A análise no domínio da frequência revela informações cruciais sobre as falhas em rolamentos, permitindo associar frequências específicos a cada tipo de defeito ou componente de um rolamento. Por isso, a análise de frequência tem se destacado como a abordagem preferida na avaliação das vibrações em rolamentos (SANTANDER, 2014).

No tratamento do sinal de aceleração proveniente de um sensor de vibração costumam-se seguir quatro fases distintas, conforme representado na Figura 27: a primeira fase envolve a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) ao sinal; em seguida, aplica-se um filtro de passa-banda ao resultado da FFT; depois, utiliza-se um método de envelope no sinal filtrado; por último, realiza-se uma segunda FFT no sinal de envelope.

Figura 27 - Técnica de Envelope



Fonte: (BEZERRA, 2004)

Segundo Bezerra (2004), há uma variedade de métodos teóricos que são empregados para identificar e prever problemas em rolamentos por meio da análise de vibração. Com base nas investigações conduzidas em estudos anteriores, como (DIARRASSOUBA, 2017), (BEZERRA, 2004) e (CHAUDHARI; GAIKWAD; KULKARNI, 2014), é viável destacar seis características fundamentais que descrevem a dinâmica de movimento de um rolamento. Essas características incluem o diâmetro primitivo (D_p), os diâmetros da pista externa (D_{pe}) e interna (D_{pi}), o ângulo de incidência (α), a quantidade (N_e) e o diâmetro das esferas (D_e), conforme ilustrado na Figura 28.

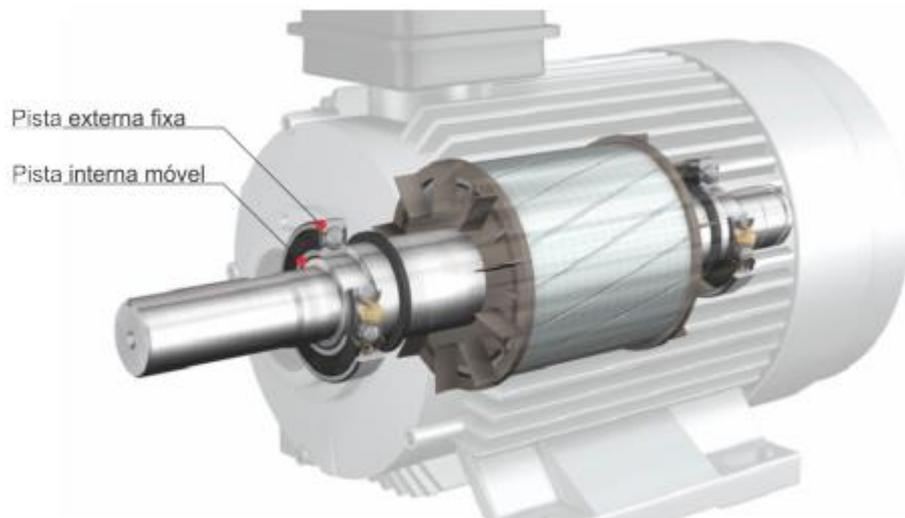
Figura 28 - Diâmetro de um rolamento de esferas



Fonte: Página da SKF ⁶

Cada uma das características mencionadas resulta em uma frequência específica associada. Para simplificar, a partir deste ponto em diante, adotaremos um modelo de motor no qual apenas a pista interna do rolamento é móvel, como exemplificado na Figura 29.

Figura 29 - Eixo de sustentação de um motor



Fonte: Página da SKF ⁷

As características de vibração nos rolamentos podem ser modeladas matematicamente da seguinte forma:

- a) Frequência rotacional do eixo (f_{RE}) – é definida pela razão entre a frequência de rotação do eixo, r , em *rotações por minuto* (RPM), e a frequência da tensão de alimentação:

$$f_{RE} = \frac{r}{60} \quad (12)$$

A frequência do eixo do motor é responsável por caracterizar a frequência fundamental de vibração do motor.

⁶ <Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/>. Acesso em: 19 de out. 2023>

⁷ <Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/>. Acesso em: 19 de out. 2023>

b) Frequência fundamental da gaiola (f_{FG}) – consiste na frequência de vibração a ser analisada no espectro de frequência e representada por:

$$f_{FG} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{d_E}{d_P} \right) \cos(\alpha) \right] f_{RE} \quad (13)$$

c) Frequência de vibração na pista interna (f_{VPI}) – é caracterizada pela Equação (14):

$$f_{FG} = \frac{N_E}{2} \left[1 + \left(\frac{D_E}{D_P} \right) \cos(\alpha) \right] f_{RE} \quad (14)$$

d) Frequência de vibração na pista externa (f_{VPE}) – pode assumir valores múltiplos de três em três vezes o valor da frequência fundamental e se caracteriza pela Equação (15):

$$f_{FG} = \frac{n_e}{2} \left[1 + \left(\frac{d_e}{d_P} \right) \cos(\alpha) \right] f_{RE} \quad (15)$$

e) Frequência de vibração na esfera (f_{VE}) – pode assumir valores múltiplos de quatro em quatro vezes o valor da frequência fundamental e se caracteriza por:

$$f_{VE} = \frac{d_P}{2d_E} \left[1 - \left(\frac{d_E}{d_P} \right)^2 \cos^2(\alpha) \right] f_{RE} \quad (16)$$

De acordo com Scheffer e Girdhar (2004), a vibração de uma máquina é um evento físico, e sensores conhecidos como acelerômetros são responsáveis por transformar essa vibração em um sinal elétrico. Esse sinal é então captado por dispositivos coletores e analisadores de dados, que o processam para gerar a Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform - FFT) e outras informações.

Quando esse sinal de vibração é identificado pelo sensor acoplado ao motor ele sofre uma redução da influência dos ruídos, de forma a permitir que somente a frequência de interesse

para análise se sobressaíam e conforme proposto por (SANTANDER, 2014) esse processo ocorre em quatro etapas distintas:

a) Análise da Transformada de Fourier do sinal de vibração: A Transformada de Fourier do sinal de aceleração (registrado pelo sensor conectado ao motor) constitui a primeira etapa desse processo. Nesta fase, torna-se mais fácil identificar uma gama de frequências que apresentam um aumento notável na energia em comparação com medições anteriores (amostras prévias). Esse aumento se deve à excitação das frequências naturais próprias do rolamento ou da estrutura, resultante de uma falha no rolamento. Quando não há dados prévios disponíveis ou quando a quantidade de energia no sinal da falha é relativamente baixa, localizar essa faixa pode ser desafiador. Uma alternativa é aplicar um filtro com uma banda de filtragem mais ampla, conforme indicado por (BEZERRA, 2004).

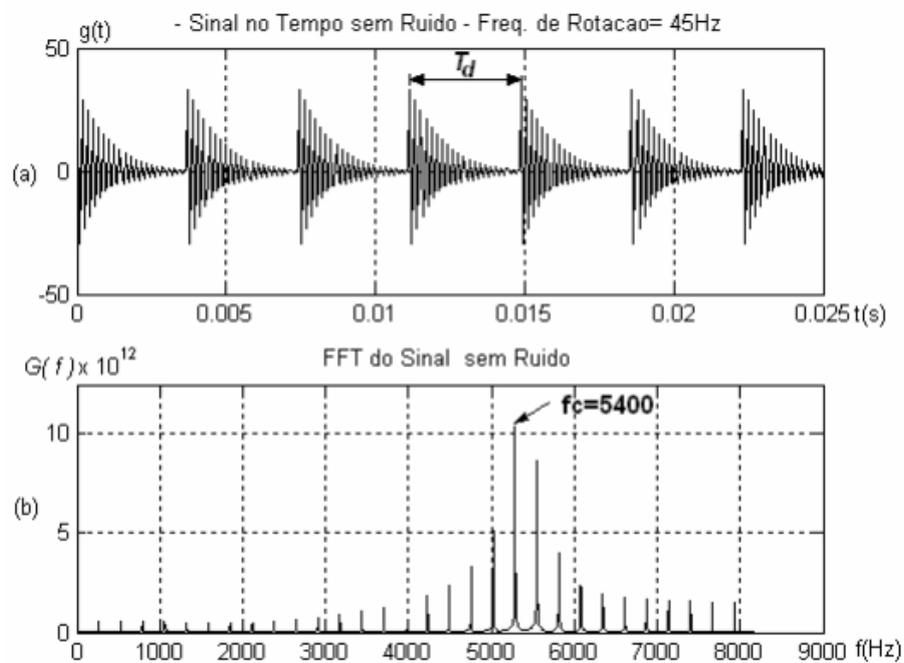
(b) Filtro passa-banda: Neste estágio, introduz-se um filtro passa-banda no sinal, visando eliminar as interferências de alta frequência e as baixas frequências de grande magnitude no espectro. Essas interferências costumam estar associadas ao desalinhamento e ao desequilíbrio. Ao aplicar o filtro, surge um desafio relacionado à determinação da largura da banda do filtro, uma vez que estudos anteriores sugerem que a banda de corte deve abranger a faixa em que as frequências naturais características foram excitadas devido à falha (BEZERRA, 2004).

(c) Transformada de Hilbert ou método de envelope: O propósito aqui é extrair o envelope do sinal que indicar a presença de uma falha, sendo esse sinal de natureza predominantemente de baixa frequência. Consequentemente, o envelope contém informações específicas do tipo de defeito para cada caso (BEZERRA, 2004).

(d) Transformada de Fourier do sinal de envelope: Através da aplicação da FFT ao envelope do sinal, tornam-se visíveis as frequências associadas a diferentes tipos de defeitos. Para ilustrar o resultado deste processo, considere um motor de indução com um arranjo de eixo radial, em que a pista externa permanece fixa e a pista interna é a parte móvel. Se a frequência resultante apresentar múltiplas bandas laterais, deduz-se que a falha ocorreu na pista externa, conforme mostra a Figura 30 (b). Se as bandas laterais estiverem igualmente espaçadas, com valores correspondentes à frequência de

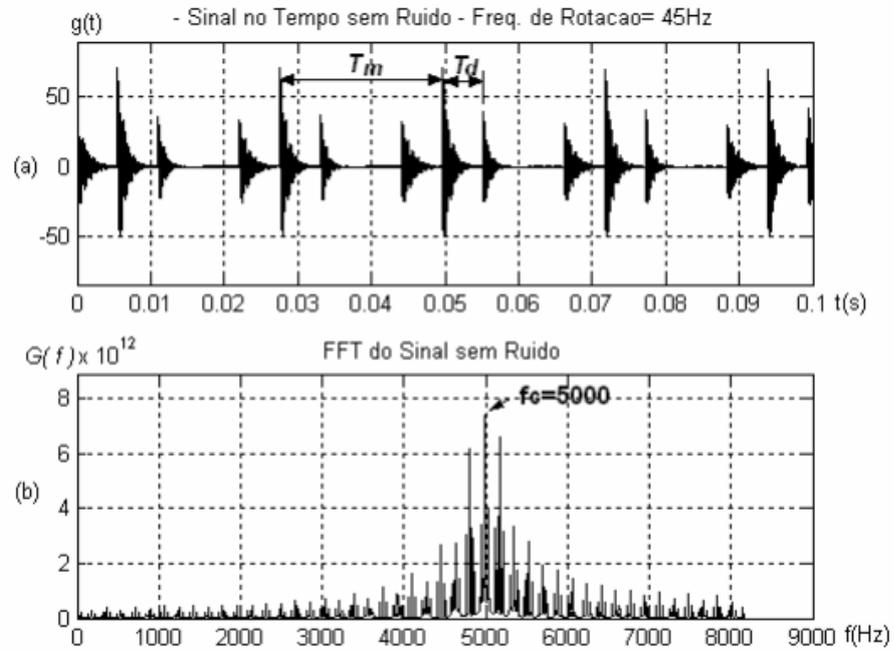
rotação do eixo (f_{RE}), pode-se inferir que a falha está na pista interna, como apresentado na Figura 30 (a). Em contrapartida, de acordo com a Figura 30 (c), se a frequência principal apresentar bandas laterais cujos valores coincidem com a frequência da gaiola (f_{FG}), conclui-se que o defeito se encontra nas esferas (BEZERRA, 2004).

Figura 30 (a) - Sinal de defeito na pista interna de um rolamento



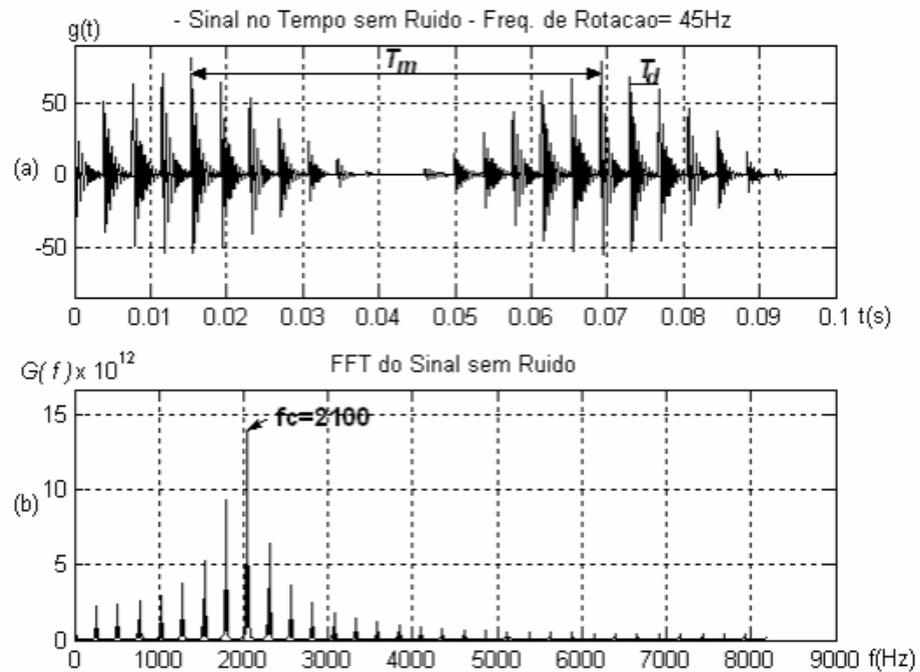
Fonte: (BEZERRA, 2004).

Figura 30 (b) - Sinal de defeito na pista externa de um rolamento



Fonte: (BEZERRA, 2004).

Figura 30 (c) - Sinal de defeito na esfera de um rolamento



Fonte: (BEZERRA, 2004)

3 DESCRIÇÃO DO PROJETO

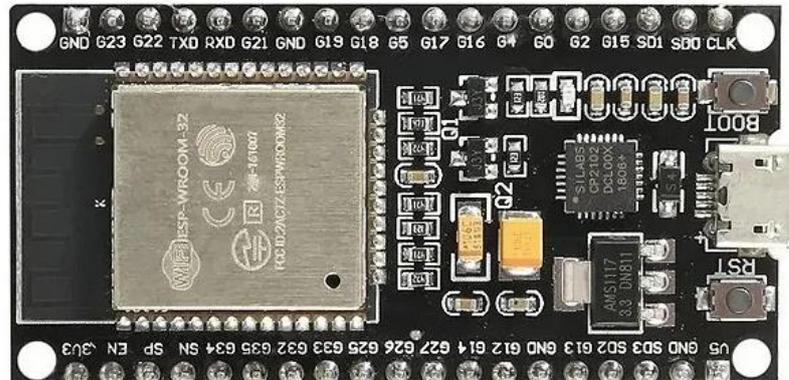
3.1 Hardware

3.1.1 Microcontrolador

Foi delineado um sistema de aquisição de informações para este projeto, com a utilização da tecnologia de Internet das Coisas (IoT), aplicado especificamente a motores de indução trifásicos. O propósito é monitorar diversas variáveis, como corrente elétrica, vibração e temperatura, a fim de obter dados em tempo real, visando a detecção de falhas tanto elétricas quanto mecânicas. Para o desenvolvimento de um protótipo, empregamos um microcontrolador *NodeMCU ESP32*.

A seleção do ESP32 como base para a elaboração desse projeto levou em consideração diversos fatores. Isso inclui a capacidade de adaptação a uma variedade de situações, sua capacidade de processamento, eficiência energética, custo-benefício favorável, número adequado de pinos GPIO (*General-Purpose Input/Output*) e a capacidade da memória RAM disponível. O ESP32, produzido pela *Espressif Systems*, se destaca por sua conectividade integrada via *bluetooth* e Wi-Fi, ambos incorporados na mesma placa, o que possibilita a criação de uma ampla gama de projetos de IoT. Além disso, o microcontrolador possui um sensor de temperatura embutido que auxilia no controle de sua temperatura de operação, podendo ser encontrado por valores em torno de R\$ 125,00. As principais especificações do ESP32 podem ser encontradas na Tabela 4, enquanto suas características físicas estão representadas na Figura 31, conforme descrito no documento (Series Datasheet v3.7 – 2021).

Figura 31 - Microcontrolador ESP32



Fonte: (Series Datasheet v3.7 - 2021)

Tabela 4 – Especificações ESP32

Especificações ESP32	
MCU	Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6 600 DMIPS
Wireless	802.11 b/g/n, HT40
Conexão Wifi	2.4Ghz (máximo de 150 Mbps)
Bluetooth	BLE 4.2
Memória ROM	448 KBytes
Clock Máximo	240MHz
Memória RAM	520 Kbytes
Memória Flash	4 MB
Flash	SPI Flash, até 16 Mbytes
GPIO	36
Hardware / Software PWM	1 / 16 Canais
Conversor Analógico Digital (ADC)	12-bit
CAN	1
Interface Ethernet MAC	1
Sensor Touch	Sim
Sensor de Temperatura	Sim
Tensão de operação	4,5-9V
Temperatura de Trabalho	-40°C-125°C
Modos de Operação	STA/AP/STA+AP

Fonte: (Series Datasheet v3.7 - 2021)

3.1.2 Acelerômetro

Dentro de um sistema de medição, o componente que entra em contato com o objeto a ser avaliado, no caso um motor elétrico, é conhecido como transdutor, especificamente um acelerômetro. Nessa situação, o transdutor pode ser visto como o sensor primário que responde diretamente às influências físicas do objeto, transformando-as em efeitos compatíveis com um sistema de medição. No âmbito deste projeto, faremos uso de um sensor MPU6050 que terá a responsabilidade de medir a aceleração das vibrações do motor de indução trifásico em análise.

O MPU6050, além de integrar um acelerômetro em seu chip, inclui também um giroscópio MEMS (*Microeletromechanical Systems*)⁸ e um conversor analógico-digital de 16 bits. Esse sensor disponibiliza os dados em formato digital, em uma das faixas de medição programáveis, conforme detalhado na Tabela 5 a seguir. A comunicação com o MPU6050 pode ser estabelecida por meio dos protocolos I2C ou SPI, contudo, nesse projeto será implementado o protocolo I2C devido a sua compatibilidade com os microcontroladores Arduino e ESP32, além de sua facilidade de promover uma maior organização do conjunto de dispositivos que interagem entre si neste tipo de aplicação.

. Além disso, é relevante mencionar que a placa também inclui um sensor de temperatura, permitindo medições em uma ampla faixa, desde -40 °C até 85 °C (*Datasheet RM-MPU-6000A-00-2013*). A Figura 32 apresenta uma imagem do acelerômetro que será utilizado no projeto.

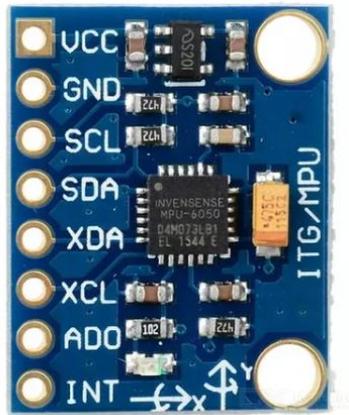
Tabela 5 – Especificações do acelerômetro MPU6050

Especificação	Valor	Unidade
Frequência de aquisição máxima	1000	Hz
Frequência de aquisição utilizada	400	Hz
Faixas de medições	±2, ±4, ±8, ±16	g
Faixa de medição utilizada	±4	g
Fator de conversão utilizado	8192	LSB/g
Resolução	16	g

Fonte: (Datasheet RM-MPU-6000-00-2013)

⁸ <MEMS são dispositivos compostos de elementos mecânicos e elétricos de tamanho reduzido, destinados a propósitos específicos>

Figura 32 – Acelerômetro MPU6050



Fonte: (O autor, 2023)

3.1.3 Sensor de Temperatura

O sensor de temperatura infravermelha IR MLX90614 é um termômetro altamente preciso que utiliza a interface de comunicação I2C. A distinção principal deste módulo em relação a outros termômetros reside no fato de que ele consegue medir a temperatura de um objeto sem necessidade de contato físico. Essa particularidade se revela extremamente vantajosa, já que possibilita monitorar a temperatura de objetos, independentemente de estarem em movimento ou fixos. Em um projeto que busca também realizar a medição da temperatura de um MIT localizado em um navio de guerra, sujeito às constantes influências das ondas e impactos causados na estrutura da embarcação devido às fainas de abicagem e retração, estes sensores se tornam uma opção bastante apropriada. Para obter uma visão detalhada das principais características deste sensor, consulte a Tabela 6 apresentada a seguir, conforme o *Datasheet* do sensor MLX90614 mostra.

Além dessa característica já mencionada sobre o IR MLX90614, destaca-se também sua capacidade de efetuar duas medições a mesmo tempo: a temperatura de um objeto e a temperatura do ambiente. Na Figura 33 é possível observar as características físicas do sensor que pode ser encontrado no mercado em torno de R\$ 90,00.

Tabela 6 – Especificações do Sensor de IR MLX90614

Características Principais
Medida de Temperatura sem contato
Faixa de leitura: -40 a 125°C para temperatura ambiente
Faixa de leitura: -70 a 380°C para temperatura de objetos
Precisão: 0,5°C
Interface I2C/SMBus
Saídas PWM e interrupt opcionais
Tensão Operacional de 3,3V

Fonte: (Datasheet for MLX90614 - 2020)

Figura 33 – Sensor de Temperatura IR MPU6050



Fonte: (Datasheet for MLX90614 - 2020)

3.1.4 Sensor de Corrente

O sensor de corrente SCT-013 é uma opção de sensor de corrente alternada altamente precisa e não invasiva. Para este projeto, será empregado o modelo SCT-013-000, que é capaz de realizar medições de corrente na faixa de 0 a 100A. O termo "não invasivo" se aplica porque não é necessário interromper o circuito para efetuar as medições. Sua utilização é bastante conveniente, uma vez que basta abrir o conector e posicionar o sensor ao redor do fio a ser monitorado.

O sensor SCT-013 consome pouca energia, é capaz lidar com tensões de até 660VCA e pode ser adquirido por valores em torno de R\$ 75,00. Esse tipo de sensor é comumente empregado em projetos nos quais o sistema deve permanecer em funcionamento contínuo.

Exemplos de aplicações incluem compressores de ar, testes de sistemas, medição de consumo de energia elétrica e monitoramento de motores de corrente alternada, sendo este último o foco específico deste projeto.

A saída deste sensor fornece leituras na faixa de 0 a 50 mA, correspondentes à corrente que flui pelo condutor principal. No entanto, uma vez que o ESP32 opera com valores de tensão, torna-se necessário estudar a implementação de um circuito adicional para converter essas leituras de corrente elétrica em valores de tensão. A seguir é mostrado na Tabela 7 as principais especificações do Sensor de Temperatura e na Figura 34 uma representação física do dispositivo.

Tabela 7 – Especificações do Sensor de Corrente SCT-013

Especificações SCT-013	
Faixa de medição	0 a 100A em CA
Margem de erro	0.01
Corrente de saída	0 a 50mA
Temperatura de trabalho	-25 a 70°C
Dielétrico	1KV CA/min
Taxa anti-chama	UL94-V0
Plug de saída	Macho 3,5mm

Fonte: (Datasheet SCT- 013 YHDC - 2015)

Figura 34 – Sensor de Corrente SCT-013



Fonte: (Datasheet SCT- 013 YHDC - 2015)

3.1.5 Modelagem do Hardware

Segundo Onílio et al (2021), a etapa prática da implementação de um projeto com o microcontrolador escolhido deve ter início com a configuração das entradas e saídas do ESP32, juntamente com a definição dos padrões de comunicação. A escolha recaiu sobre o protocolo I2C, uma vez que ele é compatível com o microcontrolador e permite a utilização tanto com o sensor de temperatura IR MLX90614 quanto com o acelerômetro MPU6050. Adicionalmente, optou-se pelo protocolo MQTT para a comunicação com a plataforma na nuvem *Ubidots*⁹.

A seguir é apresentada na Tabela 8 a comunicação do microcontrolador ESP32 com os dispositivos, onde estão indicados os pinos do controlador que são especificados para o envio e recebimento dos sinais de comunicação.

Tabela 8 – Diagrama de I/O do ESP32

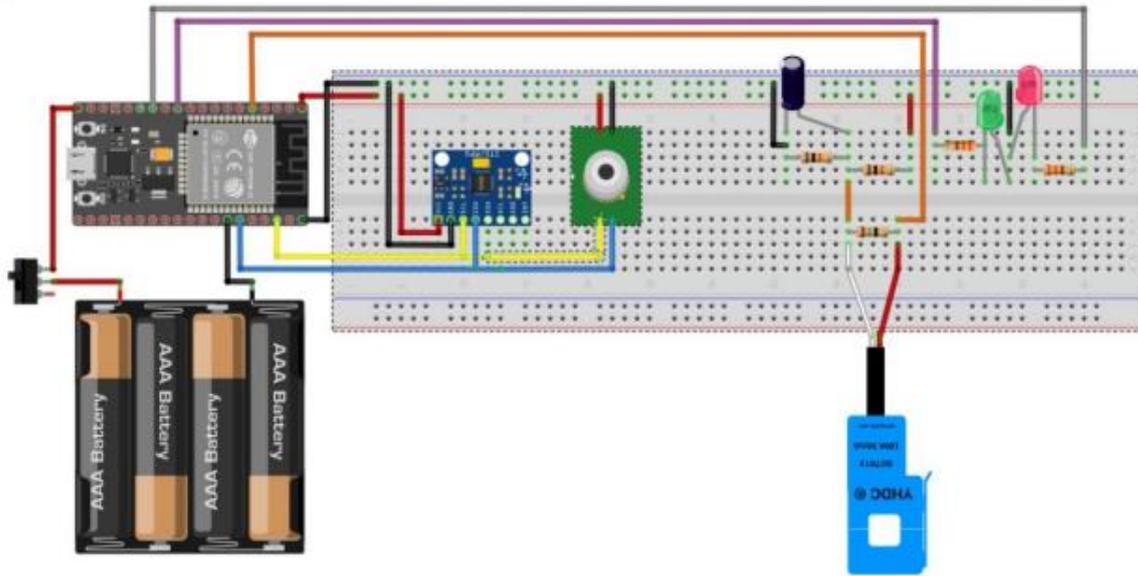
ESP32	Pino do componente externo	Componente
VIN	+	Pilhas
GND	-	Pilhas
GPIO 21	SDA	Acelerômetro MPU-6050
GPIO 22	SCL	Acelerômetro MPU-6050
GPIO 21	SDA	Sensor IR MLX90640
GPIO 22	SCL	Sensor IR MLX90640
GPIO34	+	Sensor SCT-013
GPIO12	+	Led Verde
GPIO27	+	Led Vermelho

Fonte: (ONÍLIO et al, 2021)

Após determinados todos os componentes a serem utilizados, temos as seguintes configurações do hardware conforme apresentado na Figura 35. Uma modelagem do hardware similar à da Figura 35 pode ser feita com o auxílio dos softwares *Tinkercad* ou *Fritzing*.

⁹ <Ubidots é uma plataforma desenvolvida para criação de aplicações envolvendo internet das Coisas (IoT).>

Figura 35 – Modelagem do circuito integrado do projeto



Fonte: (ONÍLIO et al, 2021)

3.2 Rede de Comunicação

As redes industriais são formas de comunicação automatizadas para o gerenciamento de processos industriais, podendo estabelecer a transmissão de dados entre diversos equipamentos, tais como atuadores, computadores, máquinas, sensores e aparelhos de interfaces gráficas.

Na construção de uma arquitetura de Internet das Coisas (IoT), é essencial que ela seja organizada em três camadas distintas: a camada física, a camada de transporte e a camada de aplicação. Neste projeto, seguiremos a seguinte estrutura estabelecida (ONÍLIO, 2021):

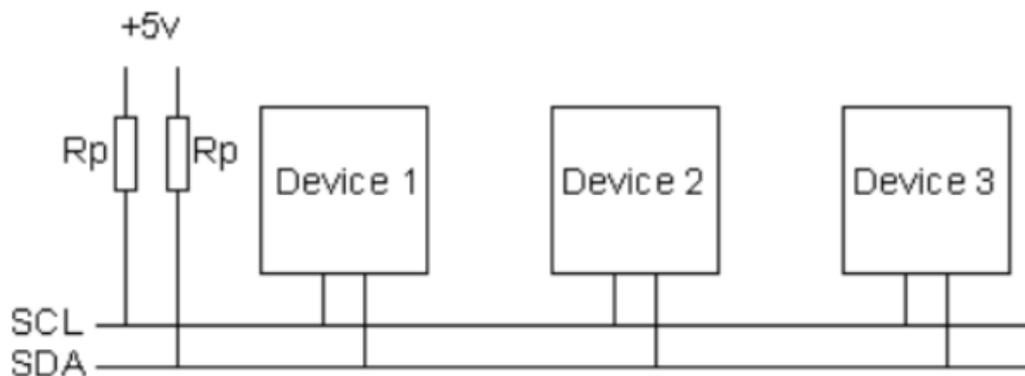
- a) Camada física: Utilização da conexão WiFi;
- b) Camada de transporte: Implementação do protocolo TCP e
- c) Camada de aplicação: Emprego dos protocolos MQTT e I2C.

Nos próximos tópicos, exploraremos em detalhes os tipos de protocolos utilizados para viabilizar a comunicação entre os dispositivos e a plataforma na nuvem.

3.2.1 Hardware

O barramento I2C é composto de dois fios, SDA e SCL, e alimentação (VDD), tipicamente de 3,3 V ou 5 V. O número de “nós” em um único barramento é limitado tanto pelo tamanho do endereço, que pode ser de 7 bits, 10 bits e até 16 bits, como por restrição de espaço, já que não se pode ultrapassar poucos metros de fios, pois a capacitância total máxima, algo em torno de 400 pf, impede o funcionamento correto do barramento (ONÍLIO, 2021).

Figura 36 – Barramento I2C



Fonte: (ONÍLIO et al, 2021)

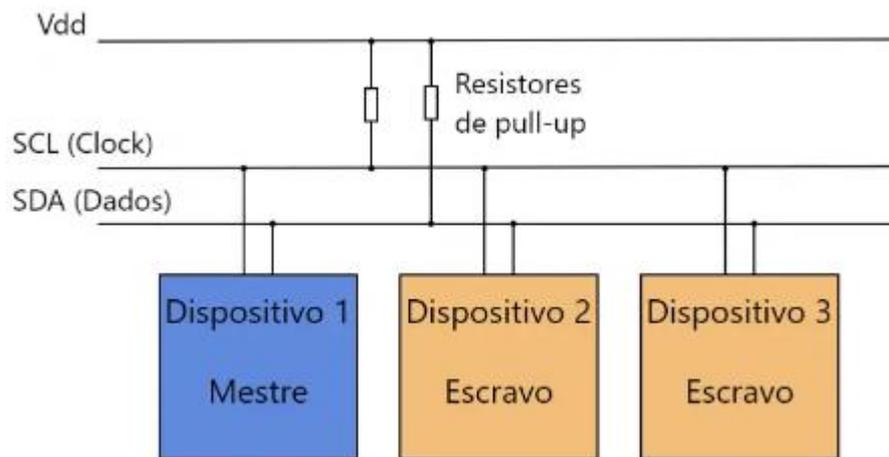
3.2.2 Software

Essa abordagem se baseia na interação entre elementos, seguindo a hierarquia mestre e escravo. Em outras palavras, quando diversos dispositivos se comunicam sob essa premissa, pelo menos um deles atua como mestre, enquanto os demais assumem papéis de escravos. O papel do mestre envolve coordenar toda a comunicação, dado que ele tem a capacidade de iniciar a transmissão de informações e fazer solicitações aos escravos que fazem parte da rede de comunicação. Esses escravos, por sua vez, devem prontamente responder às solicitações que recebem.

A estrutura na qual o protocolo I2C opera é conhecida como uma estrutura de barramento, na qual todos os elementos estão conectados a um canal principal compartilhado. A utilização desse tipo de estrutura oferece vantagens evidentes quando consideramos o número de pinos utilizados pelos dispositivos e, por consequência, a quantidade de fios necessários.

Além disso, ela contribui para uma organização mais eficaz do conjunto, especialmente quando temos vários dispositivos interagindo entre si (ONÍLIO et al, 2021).

Figura 37 – Representação do barramento I2C com Master/ Slave

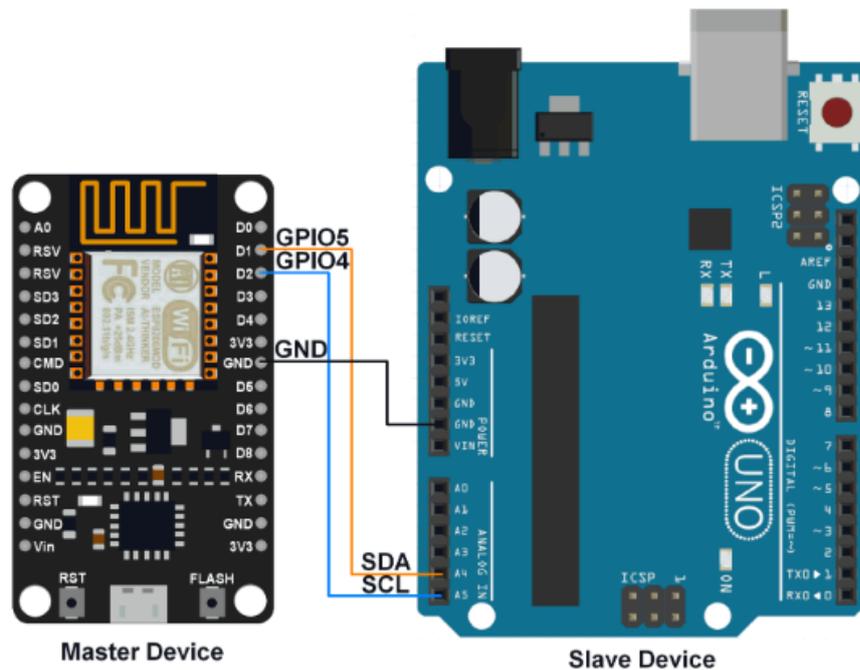


Fonte: Página Mundo Projetado

3.2.3 Protocolo I2C com Arduino e NodeMCU

Estas duas plataformas de desenvolvimento embarcado possuem pinos relacionados ao protocolo I2C. Deve-se definir qual dispositivo será o mestre ou escravo. Neste contexto, o Arduino será o escravo e o *NodeMCU* o mestre, onde cada um receberá um código diferente, sendo o receptor e o transmissor (ONÍLIO, 2021).

Figura 38 – Representação do barramento I2C com NodeMCU e Arduino UNO



Fonte: Página Electronic Wings ¹⁰

3.2.4 Protocolo MQTT

O MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) é um protocolo de comunicação máquina para máquina (*M2M - Machine to Machine*) com foco em *Internet of Things (IoT)* que funciona em cima do protocolo TCP. Um sistema MQTT se baseia na comunicação entre cliente e servidor, em que o primeiro pode realizar tanto “postagens” quanto “captação” de informação e o segundo administra os dados a serem recebidos e enviados. Para isso, é utilizado um Paradigma chamado *Publish-Subscribe* (ONÍLIO et al, 2021).

¹⁰ <Disponível em: <https://www.electronicwings.com/nodemcu/nodemcu-i2c-with-arduino-ide/> Acesso em: 19 de out. 2023>

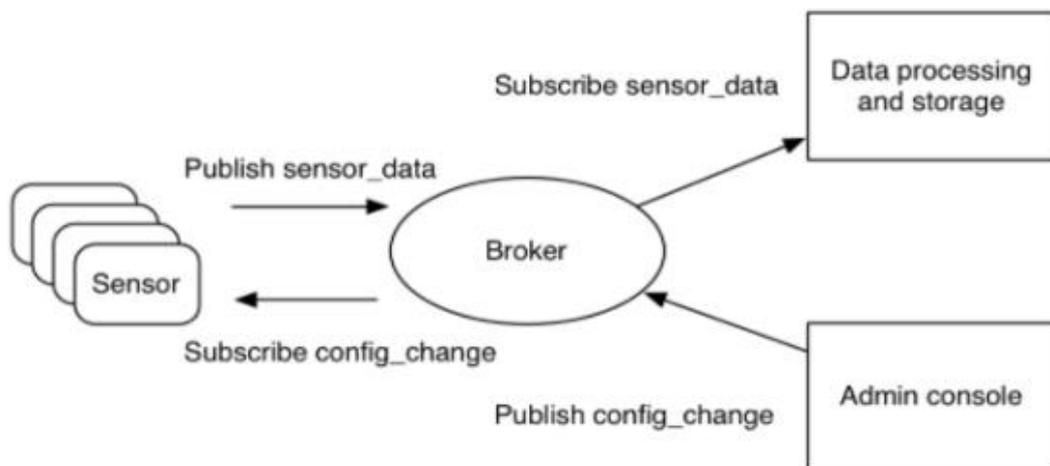
3.2.5 Publish x Subscribe

Um dispositivo pode desempenhar o papel de "inscrito = *subscribed*" ou "publicador = *publish*". Quando atua como *Publish*, o dispositivo compartilha informações predefinidas, enquanto um dispositivo inscrito recebe todas as informações que estão sendo publicadas.

Há a capacidade de publicar diversas informações, bem como múltiplos dispositivos podem receber e/ou publicar dados. Essas informações podem variar, podendo ser simples dados ou até mesmo comandos.

Caso um dispositivo gere informações que não estejam previamente registradas, essas informações não serão publicadas. Essa é a principal vantagem desse protocolo, uma vez que ele economiza largura de banda na internet, evitando o tráfego de informações irrelevantes (ONÍLIO et al, 2021).

Figura 39 – Topologia do protocolo MQTT



Fonte: Página da IBM

3.2.6 Broker

O Broker é um servidor que gere as informações aos inscritos e vice-versa, funcionando, então, como um intermediário entre *Subscribers* e *Publishers*. Além de armazenar, o *Broker* também filtra as informações. Os dados dentro deste servidor estão armazenados em tópicos e, desta forma, os *Subscribers* escolhem quais os tópicos querem se inscrever e receber apenas os que os convém. Em outras palavras, o Broker recebe todas as mensagens, filtra e decide

quem está interessado e inscrito nela ou não. O *Broker* pode ser tanto um servidor local, como uma estrutura em nuvem (ONÍLIO et al, 2021).

3.2.7 Segurança do MQTT

O protocolo MQTT tem um maior nível de segurança se comparado a outros protocolos de comunicação entre máquinas. Para proteger os conteúdos das mensagens no protocolo MQTT, é possível fazer a criptografia ponta a ponta com a segurança SSL. Também existem algumas configurações de qualidade do serviço, conhecido como *Quality of Service (QoS)*. O QoS vai de uma escala de 0 a 2, onde 0 não possui confirmação de entrega da mensagem entre *Publish* e *Subscribe* e não armazena mensagem para retransmissão, 1 já possui a confirmação de entrega e o 2 garante a entrega da mensagem com confirmação de recebimento (ONÍLIO et al, 2021).

3.2.8 MQTT na Plataforma *Ubidots*

Na plataforma *Ubidots* é possível encontrar uma biblioteca IDE e brokers próprios, o que facilita a programação dos microcontroladores e a comunicação entre Plataforma e Interfaces. Para o envio de dados, deve-se cadastrar um novo dispositivo à plataforma, preenchendo as informações mencionadas nas lacunas, conforme é ilustrado na Figura 40. Nesse trabalho, não serão abordados aspectos da programação implementada na plataforma *Ubidots*. No entanto, são apresentadas ilustrações de como seria o funcionamento do projeto em seu estágio final.

Figura 40 – Configuração de novo dispositivo no *Ubidots*

Fonte: Ubidots

3.3. Plataforma *Ubidots Steam*

A plataforma *Ubidots Steams* é uma ferramenta que fornece serviços relacionados à Internet das Coisas (IoT) e à representação em tempo real de informações. Ela possibilita aos utilizadores a coleta, o armazenamento, a exibição e a análise de dados originados por dispositivos IoT. A *Ubidots Steam* simplifica a tarefa de conectar dispositivos físicos à nuvem, uma vez que a plataforma oferece um amplo conjunto de mais de 200 bibliotecas para a integração de entradas e saídas de dados de fontes externas.

O dispositivo na plataforma *Ubidots* é uma representação virtual de uma fonte de dados, ou seja, um ativo que coleta informações dos sensores e as envia usando o protocolo de conexão *Ubidots Cloud*. Embora os dispositivos possam variar, a configuração padrão em qualquer um deles inclui: uma biblioteca IDE, que é um pedaço de software com funcionalidades específicas para um tipo de programa; parâmetros de autenticação e conexão, como um token privado exclusivo e requisições de API (chamadas de dispositivos para o servidor web), que são realizadas por meio dos protocolos de conectividade MQTT ou HTTP, pois esses são padrões OASIS para comunicação na Internet das Coisas. E também permitem a transferência de dados entre os dispositivos e a nuvem, simplificando a troca de informações entre grupos de dispositivos, possibilitando a expansão para a conexão de vários dispositivos IoT (ONÍLIO et al, 2021).

Após a criação do dispositivo que recebe os dados através de hardware, os dados obtidos serão apresentados como variável. É recomendado utilizar a variável padrão para obter os dados

brutos provenientes dos sensores, atribuindo um rótulo como uma variável no código do hardware.

O dispositivo *Ubidots* é a representação virtual de uma fonte de dados ou simplesmente, um ativo pegando dados do sensor e transmitindo esses dados por meio de um protocolo de conexão para a nuvem *Ubidots*. Com adaptações em função da demanda apresentada, os painéis são as interfaces homem-máquina, onde os dados são facilmente visualizados, contendo *widgets* para compreender os dados monitorados em tempo real (ONÍLIO et al, 2021).

O Painel personalizado, desenvolvido para apresentar dados em tempo real, proporciona uma interface que combina informações de diversas fontes. Essa interface, que é uma interação entre humanos e máquinas, torna a visualização dos dados mais acessível por meio de widgets. Isso simplifica a coleta de informações provenientes de múltiplas fontes simultaneamente.

Figura 41 – Representação de um Dashboard na Plataforma *Ubidots*



Fonte: Ubidots

Figura 42 – Painel elétrico integrado com interface homem-máquina



Fonte: Página KDM Steel

3.4. Software

Através da programação utilizando a linguagem C ++ disponível na plataforma Arduino IDE, também é possível programar o microcontrolador ESP32. Com esse conhecimento o programador pode inserir recursos de alerta capaz de interagir com a Plataforma *Ubidots Steam* e, assim, notificar o usuário em tempo real sobre possíveis elevações de temperatura, excesso de vibração ou sobrecorrente.

3.4.1. Critérios de Alarmes

De acordo com Onílio (2021), o protótipo desenvolvido tem a capacidade de monitorar em tempo real a corrente elétrica, a vibração e a temperatura de um motor de indução trifásico. Os sensores instalados no estator do motor coletam essas grandezas, que são posteriormente processadas, transmitidas e armazenadas na nuvem da plataforma *Ubidots*. Os dados ficam disponíveis para visualização em um painel de controle. Além das leituras regulares dos dados, o sistema desenvolvido possui a capacidade de gerar eventos na plataforma *Ubidots* que, por sua vez, enviam notificações por e-mail para os usuários cadastrados. Essas notificações alertam sobre situações como sobrecorrentes, temperaturas elevadas e vibrações anormais.

Os eventos de notificação são configurados para serem ativados de forma contínua, a fim de monitorar o motor em tempo real e informar sobre qualquer anomalia que esteja fora dos valores predefinidos. As notificações de alerta têm o propósito de informar aos usuários que o motor está apresentando sinais de irregularidade em uma das variáveis monitoradas, indicando a necessidade de uma inspeção na máquina. Por outro lado, as notificações de alarme são projetadas para chamar a atenção quando uma variável ultrapassa significativamente os valores predefinidos. Nesse caso, é recomendada uma intervenção imediata, pois a operação contínua nessas condições pode danificar o motor ou reduzir sua vida útil (ONÍLIO et al, 2021).

Para evitar sobrecarregar a caixa de entrada dos usuários, as notificações devem ser configuradas para alertar o operador quando uma sobrecorrente, temperatura elevada ou vibração anormal persiste por um período de 1 minuto, com intervalos de repetição de 60 minutos (ONÍLIO et al, 2021).

Segundo Onílio et al (2021), os *widgets do dashboard* devem possuir uma lógica de cores que também seguem os critérios de notificação, proporcionando um alerta visual, em caso de alguma anomalia nos dados monitorados do MIT. Na Figura 43

Figura 43 – Condições dos *widgets*



Fonte: (ONÍLIO et al, 2021)

3.4.2. Temperatura

Para definir os alertas de temperatura alta do estator e do ambiente, utiliza-se como base, a classe de isolamento do motor e os respectivos limites de temperatura, conforme estabelece a NBR 17094-2:2016 e a IEC 60034-1:2017. Os objetivos destas normas é estabelecer limites de temperaturas de operação dos motores de forma de evitar tanto a ocorrência de falhas, como o envelhecimento térmico prematuro da isolação dos enrolamentos (ONÍLIO et al, 2021).

Quadro 1 – Composição da temperatura em função da classe de isolamento

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

Fonte: WEG – Motores elétricos, Guia de especificação, 2014.

Figura 44 – Placa de identificação do motor original da EDCG

Características principais do motor:

- Fabricante/modelo Eberle/BL60MA2
- Tipo Síncrono trifásico 440V/28,2A/60Hz
- Potência 20 HP
- RPM 3500
- Fator de serviço 1.0
- Relação corrente curto circuito/corrente normal 6,7
- Temperatura máxima ambiente. . 40° C.

Fonte: (O autor, 2023).

Com este dado e de acordo com a tabela de classe de isolamento apresentado na Tabela 9, caso o MIT possua classe de isolamento F (155 C°), serão definidos como critérios de temperaturas altas do motor e do ambiente, para o envio das notificações:

- a) Alerta: Temperatura ambiente > 40°C ou Temperatura estator > 80°C;
- b) Alarme: Temperatura ambiente > 50°C ou Temperatura estator > 95°C.

Figura 45 – Alerta de temperatura alta



Fonte: (ONÍLIO et al, 2021)

Figura 46 – Alarme de temperatura alta



Fonte: (ONÍLIO et al, 2021)

3.4.3 Sobrecorrente

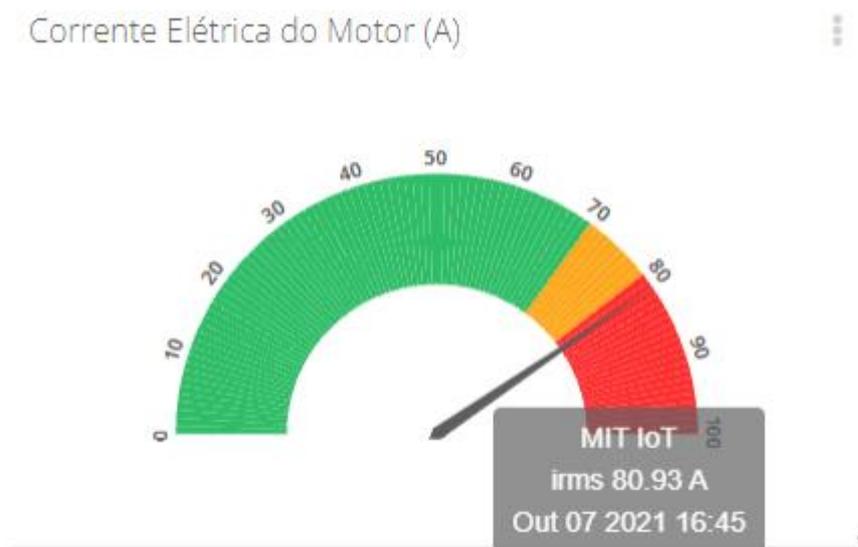
Ao estabelecer os parâmetros para as notificações de sobrecorrente, baseamos nossas decisões no Fator de Serviço (FS). Esse fator, quando aplicado à potência nominal do motor, indica a carga admissível que o motor pode suportar continuamente. Em essência, o FS representa uma margem de potência adicional que capacita o motor a operar de maneira mais eficaz em condições desfavoráveis.

De acordo com os dados da Tabela 9, caso o motor utilizado nos testes possua um FS de 1.15 e uma corrente elétrica nominal de 70 A. Serão estabelecidos os seguintes critérios para as notificações de sobrecorrente do motor:

a) Alerta: $1.1 \times I_{nom} \rightarrow (1.1 \times 70 = 77A)$

b) Alarme: $1.15 \times I_{nom} \rightarrow (1.15 \times 70 = 80,5A)$

Figura 47 – Indicação de sobrecorrente no motor



Fonte: (ONÍLIO et al, 2021)

3.4.4 Vibração Elevada

Para definir o critério das notificações de vibrações elevadas, neste projeto será usado como base o modelo proposto por Budik et al (2016), que consiste em definir os limites de alarme estatisticamente para cada equipamento. O método consiste em realizar medições de RMS suficientes para uma análise estatística dessa variável.

As medições das vibrações no motor durante um período de funcionamento permitem calcular uma média e o desvio padrão (D) das medições. Com isso, é possível definir o limite de alertas e alarmes, através da equação (ONÍLIO et al, 2021):

$$L = RMS + 2,66D \quad (17)$$

Quadro 2 – Critérios de vibrações elevadas

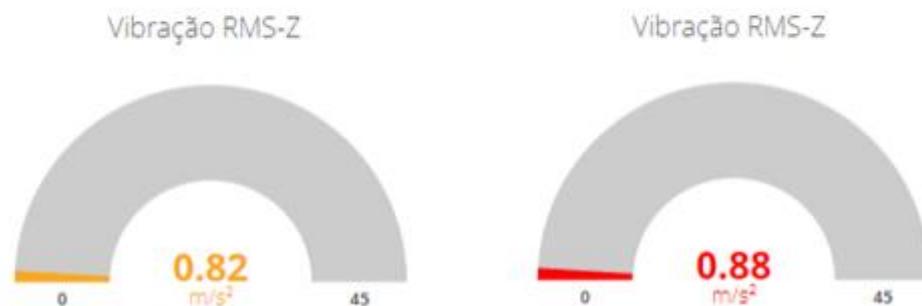
	RMS X (m/s ²)	RMS Y (m/s ²)	RMS Z (m/s ²)
Alertas	0,15	0,17	0,82
Alarme	0,25	0,27	0,88

Fonte: (ONÍLIO et al, 2021)

A norma ISO 10816-2:2017 estabelece diretrizes para a avaliação do estado de máquinas rotativas, incluindo uma tabela com limites de vibração para diferentes faixas de potência, conforme apresentado na Tabela 10. No entanto, é preferível realizar uma análise estatística específica do sinal para cada máquina a fim de definir os limites de alarme.

Além disso, as variáveis de referência utilizadas no protótipo correspondem às médias RMS das velocidades (ONÍLIO et al, 2021). Isso implica um maior esforço computacional para o microcontrolador, uma vez que é necessário converter os dados digitais de aceleração em velocidade.

Figura 48 – Indicação de vibração elevada



Fonte: (ONÍLIO et al, 2021)

3.5. Sistema supervisorio de prevenção de falhas

3.5.1 Construção do supervisorio de prevenção de falhas

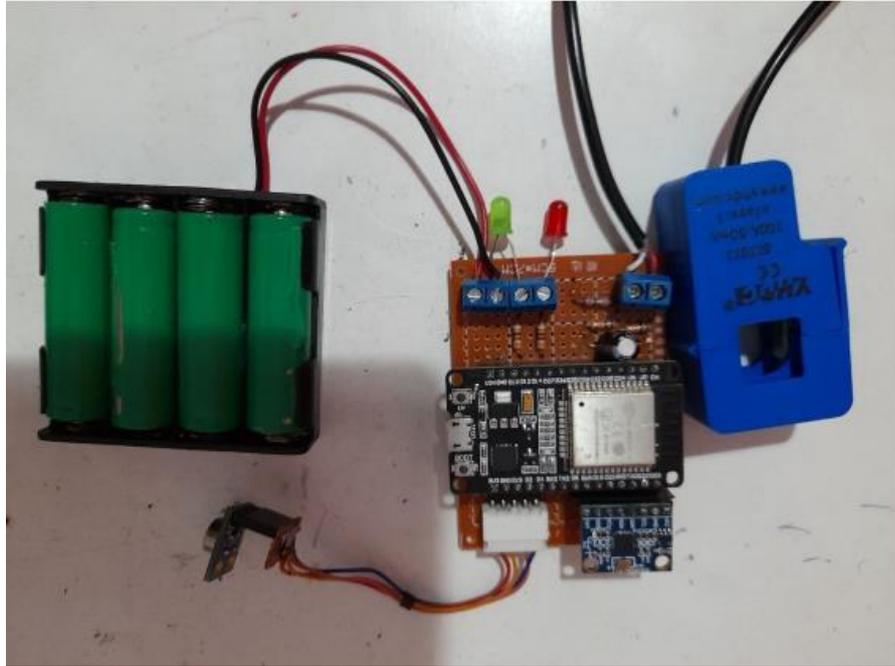
3.5.1.1 Circuito Elétrico

De acordo com Onílio et al (2021), para a viabilidade do projeto, é preciso empregar uma variedade dispositivos, além dos sensores que atuam como fonte de dados a serem coletados. Um circuito integrado de baixo custo é elaborado com o propósito de integrar todos os componentes e interfaces, conforme discutido no tópico anterior.

A composição do circuito elétrico pode ser feita da seguinte forma:

- a) Fase 1: Teste de todos os componentes para garantir o funcionamento adequado do circuito;
- b) Fase 2: Desenvolvimento de uma placa com o layout de instalação, seguindo o esquema elétrico do hardware produzido;
- c) Fase 3: Interligação do sistema, soldando todos os componentes na placa de circuito impresso, conforme o esquema elaborado.
- d) Fase 4: Após as conclusões da montagem, foram realizados novos testes para garantir a leitura correta dos dados obtidos através dos sensores e a operação do sistema;
- e) Fase 5: Desenvolvimento da caixa patola sob medida, para armazenar o circuito microcontrolado e viabilizar a fixação ao motor.

Figura 49 - Montagem do sistema elétrico IDE: Fase 1



Fonte: (ONÍLIO et al, 2021)

Figura 50 – Caixa Patola Frontal e base de fixação. Fase 2



Fonte: (ONÍLIO et al, 2021)

3.5.1.2 Motor de Indução Trifásico da EDCG Classe “Guarapari”

A Figura 47 mostra o conjunto bomba e motor elétrico da BIL, onde o dispositivo proposto em Onílio et al (2021) deve ser instalado. O MIT que será analisado possui potência de 20 HP, com rotação de 3500 RPM.

Figura 51 – Conjunto bomba e motor elétrico da BI de uma EDCG



Fonte: (O autor, 2023)

3.5.2. Instalação do dispositivo no MIT

Segundo Onílio et al (2021), a instalação do dispositivo no MIT pode ser realizada conforme as atividades a seguir:

- a) Fixação do protótipo: Efetuada a perfuração de uma paleta do estator do motor, com uma broca de aço rápido de 5mm com uma furadeira, para fixação da caixa patola;
- b) Instalação do sensor de corrente: Interligado o sensor de corrente SCT-013 a uma das fases do motor;
- c) Instalação do MPU6050: O acelerômetro está interligado ao circuito integrado, dentro da caixa patola. Além da medição de vibração, é também medida a temperatura através deste único hardware;

d) Instalação do sensor IR MLX90614: O sensor de temperatura está interligado ao circuito integrado, dentro da caixa patola. Porém, o termômetro infravermelho está direcionado para lado de fora da caixa, possibilitando alcançar as leituras desejáveis.

Nas Figuras 48 e 49 estão representadas as fases da instalação do dispositivo em um MIT com características similares ao MIT da Bomba de Incêndio e Lastro da EDCG.

Figura 52 – Instalação do protótipo. IDE: Fase 01



Fonte: (ONÍLIO et al, 2021)

Figura 53: Protótipo instalado, pronto para uso. IDE: Fasso 02

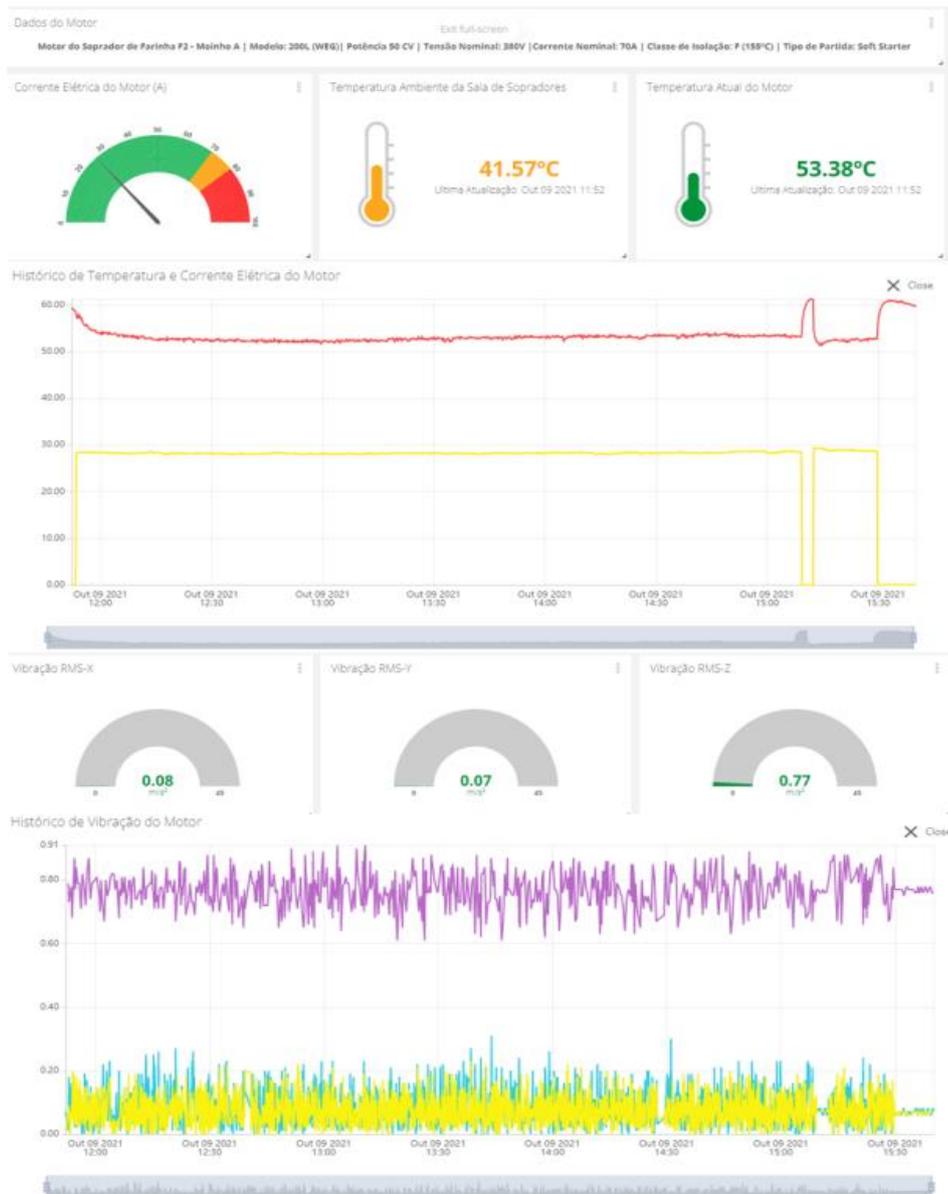


Fonte: (ONÍLIO et al, 2021)

3.5.3. Apresentação do *Dashboard* de Monitoramento

Na Figura 50 é representado o *dashboard* mostrado pela interface homem-máquina durante o período de análise dos parâmetros de temperatura, corrente e vibração.

Figura 54 - Dashboard do MIT IoT



Fonte: (ONÍLIO et al, 2021)

CONCLUSÃO

4.1 Considerações Finais

Observando o contexto de crescimento das Operações e Adestramentos Anfíbios na Marinha do Brasil, torna-se necessário um aprestamento cada vez maior dos meios envolvidos nessas operações. Navios possuidores de tarefas ligadas diretamente ao desembarque anfíbio devem dispor de recursos capazes de prever falhas em seus equipamentos e assim contribuir para a disponibilidade do meio.

Nesse trabalho foi apresentada uma importante vulnerabilidade de um meio relevante para os acontecimentos das Operações Anfíbias na Marinha do Brasil, onde foram indicados problemas com alta taxa de ocorrência em máquinas rotativas e uma proposta de desenvolvimento de um dispositivo de baixo custo capaz prever as falhas desses equipamentos. As Embarcações de Desembarque de Carga Geral (EDCG) são embarcações de pequeno porto com uma tripulação que varia de 21 a 30 militares, porém capazes de transportar tropas de fuzileiros navais com 450 militares e carregar materiais com peso equivalente a 140 toneladas. Diante dessas características, investir em tecnologias de monitoramento que reduzam a possibilidade de a embarcação ter alguma avaria em uma Bomba de Incêndio e Lastro (BIL) evita que o meio se torne inoperante devido à quebra do equipamento.

Portanto, seria altamente benéfico fortalecer este estudo por meio da melhoria da técnica abordadas nesse trabalho, aumentando a quantidade de amostras, explorando novas tecnologias ligadas a Internet das Coisas (IoT) e conduzindo análises para avaliar diversos outros parâmetros.

4.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

- a) Pesquisa sobre a utilização de Controladores Lógicos Programáveis (CLP) de baixo custo;
- b) Estudo sobre a segurança cibernética aplicada as redes de comunicação responsáveis pela transferência de dados entre os dispositivos;
- c) Pesquisa sobre a implementação do monitoramento da corrente elétrica nas três fases do motor para um controle mais eficaz;

d) Implementação de Inteligência Artificial para a predição de avarias com base nos dados de corrente, temperatura e vibração do Motor de Indução Trifásico.

REFERÊNCIAS

AL KAZZAZ, Sa'ad Ahmed; SINGH, G.K. “**Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques**”. Electric Power Systems Research, n. 65. 2003, pp. 197-221.

ARAÚJO, Rui. **Desenvolvimento de um Sistema de Diagnóstico de Falhas em Motores Elétricos de Indução**. 2015. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. **NBR- 5462, Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994. 37pg.

BEZERRA, Roberto de A. **Detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração**. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2004. BOLSHUNOVA, Olga M.;

BRASIL. Marinha do Brasil. Estado-Maior da Armada. **Normas para logística de material (EMA-420)**, Brasília, 2002.

BRITO, Jorge Nei. **Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos**. 2012. 214 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BRITO, Jorge Nei; BACCARINI, Lane; SILVA, Vinicius. **Detecção de Curto-Circuito entre Espiras do Enrolamento do Estator do Motor Elétrico Utilizando a Termografia**. VII Congresso Boliviano de Engenharia Mecânica, Cusco, outubro de 2012.

CHAPMAN, S. J. **Electric machinery fundamentals**. Maidenhead: Mcgraw-Hill Education, 2005.

CAVALCANTI, Luiz P. S. **Análise de Vibração em Motores Elétricos: Desenvolvimento de um dispositivo inteligente de baixo custo para análise de vibração**. 2021. 90 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Sistema de Controle e Eletricidade de Navios), Aperfeiçoamento, CIAW, Rio de Janeiro.

FOGLIATTO, Flávio &, RIBEIRO, José. **Confiabilidade e Manutenção Industrial** – São Paulo: GEN LTC, 2009. Minha Biblioteca.

GIRDHAR, Paresh; SCHEFFER, Cornelius. **Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance**. Burlington, Reino Unido: Newnes, 2004.

MOUBRAY, J. **Reliability-centered maintenance**. New York: Industrial Press, 2001.

MURPHY, B., VANCE, J. & ZEIDAN, F. **Machinery Vibration and Rotordynamics**. Hoboken, 2010.

GAIKWAD, Jitendra A.; KULKARNI, Jayant V. **Vibration analysis for bearing fault detection in electrical motors**. International Conference on Networks and Soft Computing, IEEE, p. 146–150, 2014.

ISHWARAPPA. ANURADHA, J. **A Brief Introduction on Big Data 5Vs Characteristics and Hadoop Technology**. International Conference on Intelligent Computing, Communication & Convergence (ICCC-2015), ELSEVIER, 2015. Bhubaneswar, Odisha, India.

KOROLYOV, Igor A. **Diagnostics of the technical state of electric motors using wavelet analysis**. 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), IEEE, 2015. CHAUDHARI, Yogita K.;

LIVRO DA EDCG, Marinha do Brasil: Rio de Janeiro, 1981. 120 f.

MACINTYRE, A. J. **Bomba e Instalações de Bombeamento**. 2 ed. Rio de Janeiro, LTC, 1997.

NEPOMUCENO, Lauro X. **Técnicas de manutenção preditiva**. [S.l.]: Blucher, 1989. v. 1

NOMAR - Notícias da Marinha, Rio de Janeiro, SRPM, n.º 451, jan. 1981; n.º 500, fev. 1985; n.º 503, jul. 1985; n.º 534, fev. 1988.

NUNES, P. SANTOS, J. ROCHA, E. **Challenges in predictive maintenance** – A review. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, ELSEVIER, p. 54-56, 2022.

O ANFÍBIO - Assessoria de Relações Públicas do CGCFN - Fortaleza de São José, Ilha das Cobras, Rio de Janeiro - RJ, n.º Especial, Ano VI, 1985, N.º 16, Ano XVII - 1996-7.

ONÍLIO A. S. et al. **IoT em Motores de Indução Trifásico**. 2021. 144p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade São Judas Tadeo. São Paulo.

PENROSE, Howard. **“Large Electric Motor Reliability: What Did the Studies Really Say?”**. MotorDoc LLC, 2012, pp. 1-8.

PICAZO-RÓDENAS R. ROYO, J. Antonino-Daviu J. Roger-Folch M.J. **Use of infrared thermography for computation of heating curves and preliminary failure detection in induction motors**. IEEE, 2012.

SELEME, Robson. **Manutenção Industrial - Mantendo a Fábrica em Funcionamento** – Curitiba: InterSaberes, 2015. Biblioteca Virtual.

SINHA, A. **Vibration of Mechanical Systems**. Nova York: Cambridge University Press, 2010.

Umans, Stephen D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley / Stephen D. Umans ; tradução: Anatólio Laschuk**. – 7. ed. – Porto Alegre: AMGH, 2014.

WEG. WEG Motor Scan – Monitoramento Completo / WEG. [2021]. Disponível em: <<https://www.weg.net/wegmotorscan/pt/monitoring>>. Acesso em out. 2021

ZAWADZKI, P.; ŻYWICKI, K. **Smart product design and production control for effective mass customization in the Industry 4.0 concept**. Management and Production Engineering Review, 2016.

