

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

BRENO MICHALSKI COLOMBO

Projeto de baixo custo para aquisição, análise e monitoramento
de dados na manutenção dos motores de indução.

São Carlos
2024

BRENO MICHALSKI COLOMBO

Projeto de baixo custo para aquisição, análise e monitoramento de dados na manutenção dos motores de indução.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Engenheiro(a) Eletricista.

Orientador(a): Prof(a). Dr(a).
Maíra Martins da Silva.

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos
2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

CC718p p	Colombo, Breno Projeto de baixo custo para aquisição, análise e monitoramento de dados na manutenção dos motores de indução. / Breno Colombo; orientadora Maíra Martins da Silva. São Carlos, 2024. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2024. 1. Motores Elétricos de Indução. 2. Monitoramento de Motores Elétricos. 3. Detecção de Falhas. 4. Manutenção Preditiva. I. Título.
-------------	--

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Breno Michalski Colombo

Título: "Projeto de baixo custo para aquisição, análise e monitoramento de dados na manutenção dos motores de indução."

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 11 / 12 / 2024,

com NOTA 9,5 (NOVE, MEIO), pela Comissão
Julgadora:

Profa. Associada Maíra Martins da Silva - Orientadora
SEM/EESC/USP

Prof. Dr. Marcos Rogério Fernandes - SEL/EESC/USP

Prof. Assistente Edson Gesualdo - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Professor Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior

Dedico este trabalho a todos os que me ajudaram ao longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar este trabalho de conclusão de curso, sinto-me profundamente grato e emocionado por poder expressar minha gratidão a cada um de vocês. Este momento não teria sido possível sem o apoio, incentivo e amor que recebi ao longo desta jornada acadêmica.

Minha família, vocês foram a base sólida que sustentou meu sonho desde o início. Obrigado por sempre acreditarem em mim, por me encorajarem quando eu estava cansado e por estarem ao meu lado em todos os momentos, sejam eles de alegria ou desafio. Vocês são minha inspiração e meu porto seguro.

Minha namorada, seu amor e apoio foram uma fonte inesgotável de força e motivação. Sua compreensão e incentivo foram essenciais para que eu pudesse me dedicar a este projeto. Obrigado por ser meu maior apoio e por compartilhar comigo todas as alegrias e dificuldades ao longo desta jornada.

Aos meus professores, vocês não apenas transmitiram conhecimento, mas também inspiraram meu crescimento intelectual e pessoal. Suas orientações, conselhos e críticas construtivas foram fundamentais para moldar este trabalho e meu percurso acadêmico. Sou grato por ter tido a oportunidade de aprender com vocês.

Aos meus amigos, obrigado por estarem ao meu lado, mesmo quando eu estava ausente devido aos estudos. Sua amizade e apoio inabaláveis me lembraram constantemente do valor da amizade e da importância de um círculo de apoio durante os desafios acadêmicos.

Este trabalho é um reflexo de todas as contribuições e influências positivas que cada um de vocês teve em minha vida. Compartilho este sucesso com todos vocês e levo comigo a lembrança de que, juntos, somos capazes de conquistar grandes feitos.

Com profunda gratidão,

Breno M. Colombo

RESUMO

COLOMBO, B. M. **Título:** Projeto de baixo custo para aquisição, análise e monitoramento de dados na manutenção dos Motores de Indução. 2024. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

As máquinas rotativas, como motores elétricos de indução, desempenham um papel fundamental na indústria e na agricultura, sendo responsáveis por uma parcela significativa dos gastos operacionais das empresas. Diante desse contexto, este projeto tem como principal objetivo a concepção de um sistema de monitoramento de baixo custo voltado para a aquisição, análise e detecção de falhas em motores elétricos de indução. Esta iniciativa visa oferecer uma solução acessível para a prática de manutenção preditiva, especialmente destinada a pequenas empresas e agricultores, que muitas vezes se deparam com barreiras financeiras ao adotar sistemas convencionais de monitoramento. Este sistema se configura como uma alternativa viável e economicamente atrativa, pois preenche uma lacuna no mercado, fornecendo uma solução de alta qualidade a um custo acessível. Em contraste com as opções tradicionais de monitoramento de motores elétricos, que podem ser financeiramente desafiadoras para implementações em menor escala, o sistema proposto oferece uma abordagem mais econômica, sem comprometer a eficácia na detecção de falhas. Além disso, a flexibilidade e adaptabilidade deste sistema tornam-no altamente atraente para diversos cenários de aplicação, abrangendo desde pequenas empresas industriais até fazendas agrícolas. A capacidade de monitorar o estado de motores elétricos de indução de forma contínua e precisa proporciona vantagens significativas em termos de redução de custos de manutenção, minimização de paradas não programadas e otimização do desempenho operacional. Em suma, o desenvolvimento deste sistema de baixo custo representa um avanço importante na democratização do acesso à manutenção preditiva de motores elétricos de indução, contribuindo para a eficiência e a sustentabilidade das operações em diversos setores da indústria e da agricultura. Ao tornar essa tecnologia acessível a um público mais amplo, estamos promovendo a eficiência econômica e energética, ao mesmo tempo em que fortalecemos a competitividade das pequenas empresas e produtores que dependem desses motores em suas atividades diárias.

Palavras-chave: Motores Elétricos de Indução. Monitoramento de Motores Elétricos. Detecção de Falhas. Manutenção Preditiva.

ABSTRACT

COLOMBO, B. M. **Title:** Low-cost project for the acquisition, analysis, and monitoring of data in the maintenance of Induction Motors. 2024. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Rotating machines, such as induction electric motors, play a fundamental role in both the industry and agriculture sectors, accounting for a significant portion of operational expenses for companies. In light of this context, this project's primary objective is the development of a low-cost monitoring system designed for the acquisition, analysis, and detection of faults in induction electric motors. This initiative aims to provide an affordable solution for predictive maintenance, particularly tailored to small businesses and farmers who often face financial barriers when considering conventional monitoring systems. This system represents a viable and economically attractive alternative, filling a gap in the market by delivering a high-quality solution at an accessible cost. In contrast to traditional options for monitoring electric motors, which can be financially challenging for smaller-scale implementations, the proposed system offers a more cost-effective approach without compromising fault detection effectiveness. Furthermore, the flexibility and adaptability of this system make it highly appealing for a wide range of applications, spanning from small industrial enterprises to agricultural farms. The ability to continuously and accurately monitor the state of induction electric motors provides significant advantages in terms of reducing maintenance costs, minimizing unscheduled downtime, and optimizing operational performance. In summary, the development of this low-cost system represents a significant advancement in democratizing access to predictive maintenance for induction electric motors, contributing to the efficiency and sustainability of operations across various sectors in both industry and agriculture. By making this technology accessible to a broader audience, we are promoting economic and energy efficiency while enhancing the competitiveness of small businesses and farmers who rely on these motors in their daily activities.

Keywords: Induction Electric Motors. Electric Motor Monitoring. Fault Detection. Predictive Maintenance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Motores elétricos em uma planta industrial.	12
Figura 2 – Vista explodida de um MIT.	16
Figura 3 – Curva de taxa de falha.	17
Figura 4 – ESP32.	24
Figura 5 – Sensor MPU-6050 BY - 521.	25
Figura 6 – Bateria BL 5C.	25
Figura 7 – Vista esquemática do circuito.	26
Figura 8 – Vista layout da PCB.	27
Figura 9 – Vista superior 3D da PCB.	28
Figura 10 – Vista inferior 3D da PCB.	28
Figura 11 – Placa teste do projeto.	29
Figura 12 – Frequência e Análise de falhas - Eixo X - Motor Normal.	35
Figura 13 – Frequência e Análise de falhas - Eixo Y - Motor Normal.	35
Figura 14 – Frequência e Análise de falhas - Eixo Z - Motor Normal.	36
Figura 15 – Frequência e Análise de falhas - Eixo X - Motor com Problemas.	37
Figura 16 – Frequência e Análise de falhas - Eixo Y - Motor com Problemas.	37
Figura 17 – Frequência e Análise de falhas - Eixo Z - Motor com Problemas.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados Técnicos ESP32.	24
Tabela 2 – Especificações Técnicas MPU-6050.	24
Tabela 3 – Especificações Técnicas Bateria BL-5C.	25

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Os tipos de manutenção	13
1.1.1	Manutenção Corretiva	13
1.1.2	Manutenção Preventiva	13
1.1.3	Manutenção Preditiva	13
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivos Gerais	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	Detalhamento das técnicas e ferramentas utilizadas	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - MANUTENÇÃO PREDITIVA EM MOTO- RES ELÉTRICOS	16
2.1	Conceitos Básicos	16
2.1.1	Motores de Indução Trifásico	16
2.1.2	Manutenção Preditiva	17
2.1.3	Tipos de Análises em Motores Elétricos	19
2.1.3.1	Termografia	20
2.1.3.2	Ultrassom	20
2.1.3.3	Análises de Lubrificantes	21
2.1.3.4	Análise de Partículas de Desgaste	21
2.1.3.5	Análise de Vibração	22
3	PROJETO E DESENVOLVIMENTO	23
3.1	ESP32	23
3.2	MPU6050 GY - 521	24
3.3	Bateria BL 5C	25
3.4	Implementação	26
3.5	Confecção da placa	29
4	COLETA, ANÁLISE E DEMONSTRAÇÃO DOS DADOS	30
4.1	Coleta de Dados	30
4.2	Análise de Dados	30
4.2.1	Desbalanceamento de Tensão	31
4.2.2	Problemas no Rotor (Gaiola de Esquilo)	31
4.2.3	Desbalanceamento ou Falhas nos Rolamentos	31
4.2.4	Eixo Desalinhado	32
4.2.5	Excêntricidade	32

4.2.6	Harmônicos na Rede Elétrica	32
4.3	Demonstração dos Dados	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1	Apresentação dos Resultados	34
5.1.1	Motor Normal	34
5.1.2	Motor com Problemas	36
5.2	Discussão	38
6	CONCLUSÕES	39
7	TRABALHOS FUTUROS	40
	REFERÊNCIAS	41
	APÊNDICE A - CÓDIGO ESP32	43
	APÊNDICE B - CÓDIGO GOOGLE SHEETS	45
	APÊNDICE C - CÓDIGO GOOGLE COLAB	46

1 INTRODUÇÃO

No cenário industrial contemporâneo, os motores elétricos desempenham um papel fundamental em uma variedade de aplicações, sendo essenciais para o funcionamento de plantas industriais e desempenhando funções vitais no cotidiano. A manutenção eficaz desses motores torna-se crucial para evitar a redução da vida útil, falhas prematuras e paradas não planejadas do sistema, decorrentes de fatores como vibrações mecânicas, temperaturas elevadas e ausência de manutenção programada.

Figura 1 – Motores elétricos em uma planta industrial.



Fonte: site da WEG, foto oferecida por Retema (Revista Técnica Ambiental - Espanha).

O monitoramento do desempenho dos motores elétricos pode ser realizado por meio de sistemas supervisórios de monitoramento, desenvolvidos com funções específicas para gerar informações relevantes e facilitar uma análise rápida e eficiente. Nesse contexto, a Associação Brasileira de Manutenção (ABRAMAN, 2009) alertou, que o custo total de manutenção nas empresas brasileiras representou 4,14% em relação ao faturamento bruto, indicando uma parcela significativa dos custos operacionais. Tais dispêndios de recursos e tempo ressaltam a importância estratégica da manutenção para o gerenciamento de custos na indústria.

Dentro desse panorama, a redução das ocorrências de falhas ao longo do tempo torna-se imperativa para garantir a continuidade da produção e otimizar recursos. Este trabalho aborda, portanto, a relevância da implementação de estratégias eficazes de monitoramento e manutenção de motores elétricos, visando não apenas a preservação dos equipamentos, mas também a maximização da eficiência operacional e a minimização dos custos associados à manutenção industrial.

1.1 Os tipos de manutenção

A execução do processo de manutenção pode adotar diversas abordagens, resultando na formulação de diversas filosofias de manutenção. Diante das divergências em relação à classificação dos tipos de manutenção, algumas categorias destacam-se como principais. Essas incluem:

1.1.1 Manutenção Corretiva

A abordagem mais amplamente empregada na gestão de equipamentos industriais é a Manutenção Corretiva, aplicável em qualquer setor que envolva maquinaria, independentemente do nível ou programa de manutenção adotado. Segundo a definição estabelecida na norma (NBR5462, 1994), a Manutenção Corretiva consiste na intervenção realizada após a manifestação de uma falha, com o propósito de restaurar um item às condições necessárias para desempenhar sua função designada. Em resumo, trata-se de qualquer ação de manutenção direcionada à correção de falhas em equipamentos, componentes, módulos ou sistemas, buscando restabelecer sua funcionalidade. Por sua natureza reativa, essa abordagem frequentemente está associada a custos elevados.

1.1.2 Manutenção Preventiva

A Manutenção Preventiva tem como principal objetivo assegurar o desempenho ao longo do ciclo de vida de um sistema. Para implementar essa abordagem, o entendimento estatístico da taxa de falha dos componentes é crucial, pois as intervenções programadas ao longo do tempo são baseadas nesse conhecimento para otimizar a vida útil do item. Outro termo associado à Manutenção Preventiva é "manutenção baseada em intervalos/tempo".

Conforme a definição estabelecida na norma (NBR5462, 1994), a Manutenção Preventiva consiste em intervenções realizadas em intervalos previamente determinados ou de acordo com critérios prescritivos. O propósito é reduzir a probabilidade de falha ou degradação no funcionamento de um item, contribuindo para a preservação do seu desempenho ao longo do tempo.

1.1.3 Manutenção Preditiva

Com os avanços contínuos nas técnicas de processamento de sinais, observa-se a viabilidade do acompanhamento da vida útil dos equipamentos e a determinação precisa dos momentos de intervenção, baseando-se na medição dos parâmetros dos processos produtivos. A Manutenção Preditiva, focada na disponibilidade operacional, direciona suas medições e avaliações para o período em que os equipamentos estão em plena operação.

Conforme definido pela norma (NBR5462, 1994), a Manutenção Preditiva é aquela que busca garantir uma qualidade de serviço desejada por meio da aplicação sistemática

de técnicas de análise, utilizando supervisão centralizada ou amostragem. Seu propósito é minimizar a Manutenção Preventiva e reduzir a Manutenção Corretiva. A execução eficaz da Manutenção Preditiva demanda profissionais qualificados em diversas análises, assegurando que as ações de intervenção estejam alinhadas com a qualidade dos dados registrados (ISO 18436-2, 2003).

O desenvolvimento e a integração de novas tecnologias abrem espaço para a pesquisa e avaliação de equipamentos de análise de sinais. A vibração gerada por máquinas rotativas torna-se essencial ao considerar a filosofia da Manutenção Preditiva, que se baseia no comportamento desses sinais mensuráveis. Contudo, as tecnologias modernas muitas vezes demandam investimentos substanciais em equipamentos, recursos humanos e tempo, o que nem sempre está disponível de maneira adequada para atingir resultados satisfatórios na equação custo-benefício. Este trabalho propõe-se a ampliar as vantagens da Manutenção Preditiva, desenvolvendo ferramentas de baixo custo e aplicação simplificada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

Foi proposta a concepção de um dispositivo acessível economicamente, destinado ao monitoramento de máquinas, alinhado às vantagens da Manutenção Preditiva. Este equipamento visou realizar uma análise contínua de vibração, fundamental para antecipar possíveis falhas e otimizar intervenções de manutenção.

A inovação buscou atender às demandas da Manutenção Preditiva, oferecendo uma solução de baixo custo para a coleta de dados essenciais. A monitorização contínua da temperatura e vibração permitiu identificar padrões anômalos, antecipando-se a potenciais problemas operacionais e contribuindo para a redução dos custos associados à Manutenção Corretiva.

Ao desenvolver essa ferramenta acessível, buscou-se facilitar o acesso a práticas mais científicas de manutenção, ampliando o escopo de aplicação da Manutenção Preditiva para um espectro mais amplo de indústrias, alinhado a um enfoque eficiente de gestão de ativos e custos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Foi elaborada uma proposta de modelo padronizado para a análise de vibração, incluindo a especificação detalhada e as características técnicas do equipamento de aquisição de sinais vibratórios. Também foi fornecido um algoritmo de processamento digital de sinais como base para o desenvolvimento do software. Para validar o modelo, foram realizadas medições em uma máquina representativa, utilizando o protótipo do equipamento e o software recém-criados.

O modelo englobou a concepção de um sistema integral, com ênfase na precisão e eficiência da coleta de dados de vibração. As especificações técnicas do equipamento de aquisição de sinais vibratórios foram minuciosamente delineadas, considerando parâmetros como sensibilidade, faixa de frequência e resolução. O algoritmo de processamento digital de sinais foi disponibilizado como uma base robusta para a programação do software, destacando-se pela sua capacidade analítica e adaptabilidade a diferentes contextos de monitoramento.

A validação prática do modelo foi realizada por meio de medições em uma máquina típica, utilizando o protótipo do equipamento e o software recém-desenvolvidos. Esta etapa teve como objetivo atestar a eficácia do modelo em ambientes operacionais reais, proporcionando dados relevantes para aprimoramentos subsequentes e garantindo a confiabilidade do sistema proposto para análise preditiva de maquinário.

1.3 Detalhamento das técnicas e ferramentas utilizadas

1. Aquisição de Sinais Vibratórios:

- Utilização do sensor de vibração.
- Frequência de amostragem otimizada para captura eficaz de eventos vibratórios.
- Especificações técnicas detalhadas para o equipamento de aquisição.

2. Processamento Digital de Sinais:

- Algoritmo de processamento digital de sinais adaptado às características vibratórias (Fast Fourier Transform - FFT).
- Utilização da ferramenta Colab em código Python para implementação e análise.

3. Desenvolvimento do Software:

- Utilização da linguagem de programação Python.
- Interface gráfica amigável para facilitar a interpretação dos resultados.
- Implementação do algoritmo de processamento de sinais no software.

4. Validação Experimental:

- Realização de testes em máquinas industriais representativas.
- Comparação dos resultados obtidos com medições convencionais para validação.

A combinação dessas técnicas e ferramentas garantiu a confiabilidade e a praticidade do modelo proposto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - MANUTENÇÃO PREDITIVA EM MOTORES ELÉTRICOS

2.1 Conceitos Básicos

2.1.1 Motores de Indução Trifásico

O motor de indução trifásico, também conhecido por sua sigla MIT, destaca-se como a escolha predominante em plantas industriais devido à sua robustez e benefícios como custo acessível, eficiência energética e facilidade de manutenção, fatores cruciais que influenciam diretamente em sua vida útil (CAPELLI, 2013).

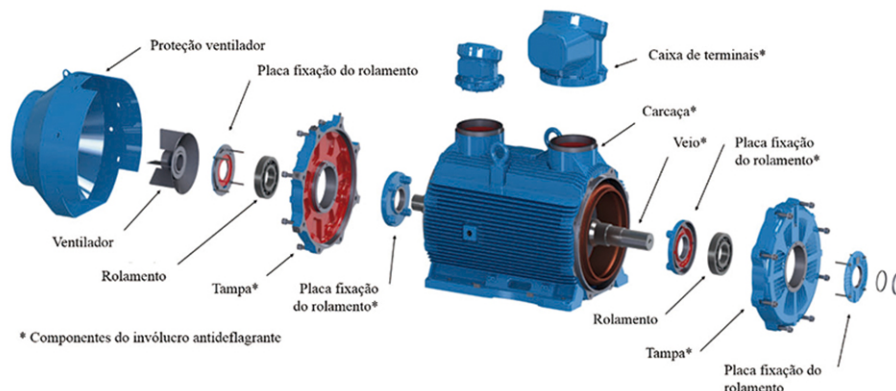
No mercado, há uma variedade de motores específicos para diferentes aplicações, incluindo motores de corrente contínua e corrente alternada. Informações como potência nominal, tensão de ligação, número de polos e tipo de carcaça são fundamentais para o correto dimensionamento do motor.

Os motores de corrente contínua, embora apresentem um custo mais elevado, oferecem flexibilidade e precisão significativas em termos de controle de velocidade ajustável. No entanto, sua aplicação é restrita a casos especiais nos quais tais requisitos justificam o investimento mais elevado em instalação e manutenção (WEG MOTORES, 2017).

Em contrapartida, os motores de corrente alternada são os mais utilizados nas plantas industriais devido à sua robustez, simplicidade e custo mais acessível, dividindo-se em motores síncronos e de indução. O motor síncrono opera com uma velocidade fixa, sem escorregamento, sendo preferencialmente escolhido para grandes potências, enquanto o motor de indução funciona normalmente com uma velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada (WEG MOTORES, 2017).

A Figura 2 apresenta uma visão explodida de um MIT, destacando seus principais componentes individuais, como estator, rotor, rolamentos, tampa defletora, carcaça, eixo, ventilador e enrolamento (CAPELLI, 2013).

Figura 2 – Vista explodida de um MIT.



Fonte: Catálogo WEG.

Em relação aos rotores, existem dois tipos distintos: o rotor de gaiola de esquilo e o rotor bobinado. O rotor de gaiola de esquilo é composto por barras condutoras encaixadas em ranhuras no rotor e curtocircuitadas em suas extremidades por anéis. Já o rotor bobinado possui enrolamentos semelhantes aos do estator e é conectado em curto-circuito por meio de escovas (CHAPMAN, 2013).

Ao alimentar o enrolamento do estator, uma tensão é induzida no enrolamento do rotor, gerando um campo eletromagnético entre estator e rotor que resulta no movimento do motor (CHAPMAN, 2013).

2.1.2 Manutenção Preditiva

A Manutenção Preditiva, também denominada manutenção sob condição ou manutenção baseada no estado do equipamento (Condition-Based Maintenance), fundamenta-se na premissa de que o monitoramento regular das condições mecânicas reais das máquinas e do desempenho operacional dos sistemas de processo permite prolongar ao máximo os intervalos entre os reparos (MOBLEY, 2002). O objetivo primordial da Manutenção Preditiva é antecipar ou prevenir falhas nos equipamentos por meio do acompanhamento de diversos parâmetros, viabilizando a operação ininterrupta por períodos estendidos.

A representação gráfica da taxa de falha de um equipamento $h(t)$ ao longo do tempo t é ilustrada pela curva da banheira, como apresentado na Figura 3. Essa curva descreve as fases típicas do ciclo de vida de um sistema: mortalidade infantil, maturidade e mortalidade senil (WUTTKE, 2008).

Figura 3 – Curva de taxa de falha.



Fonte: adaptado de Wuttke, 2008.

No período inicial denominado mortalidade infantil, observa-se uma taxa decrescente, caracterizada por falhas prematuras resultantes de especificações de projeto inadequadas, defeitos na fabricação, componentes defeituosos, processos de fabricação inapropriados, entre outros. Na fase de maturidade, as falhas prematuras foram corrigidas, e a taxa de falha torna-se constante, ocorrendo falhas aleatórias devido a incidentes imprevisíveis.

Finalmente, no período de mortalidade senil, a taxa de falhas cresce devido ao desgaste dos materiais, resultando em falhas inevitáveis por corrosão, fadiga, trincas e outros fatores (SELLITTO, 2005).

A Manutenção Preditiva, ao antecipar falhas, contribui para aumentar a disponibilidade global das plantas industriais, minimizando paradas não programadas e reduzindo custos associados a manutenções. Sua inclusão em programas de gerenciamento total de plantas oferece a capacidade de otimizar a disponibilidade dos equipamentos do processo, resultando em economia nos custos de manutenção.

Essa abordagem impacta diretamente a curva da banheira de confiabilidade. Durante o período de mortalidade infantil, a Manutenção Preditiva ajuda a identificar falhas prematuras, como defeitos de fabricação ou problemas de projeto, que poderiam resultar em falhas inesperadas, reduzindo a taxa de falhas nessa fase.

Na fase de maturidade, a Manutenção Preditiva pode identificar padrões anômalos em falhas aleatórias, permitindo que intervenções sejam feitas antes que as falhas ocorram, o que diminui a quantidade de falhas imprevistas e contribui para uma operação mais estável.

Finalmente, no período de mortalidade senil, onde o desgaste dos materiais leva a falhas inevitáveis, a Manutenção Preditiva também é valiosa, pois permite o monitoramento contínuo e a previsão de falhas, permitindo que os reparos sejam programados com antecedência, minimizando o impacto das falhas e prolongando a vida útil dos ativos.

Assim, ao reduzir falhas imprevistas e proporcionar um ciclo de manutenção mais controlado, a Manutenção Preditiva suaviza a parte da curva da banheira relacionada às falhas aleatórias, promovendo maior disponibilidade e eficiência operacional ao longo de todo o ciclo de vida dos equipamentos.

Embora a Manutenção Preditiva seja um processo comprovado, sua implementação bem-sucedida requer um planejamento detalhado. O desenvolvimento de um conceito eficaz de manutenção exige uma abordagem holística, considerando fatores técnicos, inter-relações entre sistemas e a estrutura geral da organização (WAEYENBERGH; PINTELON, 2004). O sistema de Manutenção Preditiva, assim concebido, deve ser adaptado às necessidades específicas de cada organização, envolvendo o treinamento de pessoal em todos os níveis, incluindo a alta gerência, dada a complexidade técnica envolvida na aquisição e análise de dados.

As organizações optam pela incorporação de programas de Manutenção Preditiva visando a proteção de ativos financeiros, o reconhecimento das oportunidades de melhorias pela alta direção, a redução das taxas de seguros e a obtenção da certificação ISO 9001 (MOBLEY, 2002). As vantagens alcançadas com a Manutenção Preditiva incluem a redução dos custos de manutenção, a diminuição de falhas nas máquinas, a redução do tempo de parada para reparos, a diminuição do estoque de peças sobressalentes, o aumento da vida útil das peças, o incremento na produção, a melhoria na segurança do operador, a verificação das condições de equipamentos novos e reparados, e o lucro global.

Estudos indicam que a implementação de um plano de manutenção adequado resulta em uma economia média de 20% a 25% nos custos diretos de manutenção, com um aumento na produção equivalente ao dobro desse valor. No entanto, é importante destacar que as técnicas de Manutenção Preditiva demandam instrumentação sofisticada e mão de obra qualificada para a detecção e diagnóstico de máquinas, o que frequentemente implica em custos significativos, questionando a viabilidade de sua adoção (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004).

2.1.3 Tipos de Análises em Motores Elétricos

O monitoramento preditivo é essencialmente fundamentado em diversas técnicas, conforme mencionado em Manutenção Industrial (2012):

1. Análise de vibração;
2. Termografia;
3. Análise de lubrificantes;
4. Propriedades físico-químicas;
5. Cromatografia gasosa;
6. Espectrometria;
7. Ferrografia;
8. Radiografia;
9. Energia acústica (ultrassom);
10. Energia eletromagnética (partículas magnéticas, correntes parasíticas);
11. Fenômenos de viscosidade (líquidos penetrantes);
12. Radiações ionizantes (Raio X ou Gamagrafia);
13. Tribologia;
14. Monitoria de processos;
15. Inspeção visual;
16. Outras técnicas de análise não-destrutivas.

A seguir, serão enfatizados alguns desses métodos frequentemente utilizados em manutenção preditiva.

2.1.3.1 Termografia

Técnica aplicável não apenas em componentes elétricos, mas também em máquinas, estruturas e diversas aplicações. Utilizando instrumentos capazes de detectar emissões de energia infravermelha, a termografia torna possível diagnosticar problemas incipientes ao identificar variações de temperatura.

Essa técnica baseia-se no princípio de que todos os objetos com temperatura acima do zero absoluto emitem energia ou radiação, sendo a radiação infravermelha invisível aos olhos humanos. Ao aumentar a temperatura de um objeto, há um aumento correspondente na quantidade de energia emitida. Os sistemas de infravermelho, desde os mais simples até os mais complexos, são sensíveis apenas à energia infravermelha irradiada, não medindo a temperatura diretamente, mas detectando variações na energia irradiada.

A termografia é uma técnica de Manutenção Preditiva quando utilizada nas seguintes condições: não faz contato com a superfície, não envolve ações perigosas, pode ser aplicada em zonas de risco, não é afetada por ondas eletromagnéticas e pode ser utilizada enquanto os sistemas estão operando. Além disso, fornece informações instantâneas, permite a coleta e armazenamento de dados em formato digital.

A radiação térmica, que é a energia continuamente emitida por um corpo com temperatura não nula, é transmitida no espaço na forma de ondas eletromagnéticas. Os resultados obtidos com os termógrafos são apresentados durante a inspeção na forma de imagens térmicas ou termogramas, proporcionando uma representação visual das temperaturas dos corpos em cores. Essas imagens, com uma escala correlacionando cor e temperatura, facilitam a identificação de problemas relacionados à temperatura, permitindo também a medição da temperatura em pontos específicos do objeto analisado (SOUSA, 2010).

2.1.3.2 Ultrassom

O uso do ultrassom na Manutenção Preditiva emprega conceitos visando monitorar o ruído gerado por máquinas ou sistemas para avaliar sua condição operacional. Focando nas frequências mais elevadas produzidas pelos processos mecânicos, geralmente na faixa de 20 kHz a 100 kHz.

Os instrumentos de ultrassom têm três principais aplicações em um programa de Manutenção Preditiva: análise de ruído, detecção de vazamentos e testes de materiais. A detecção de vazamentos é a aplicação principal, pois o fluxo turbulento de líquidos e gases através de um orifício produz uma assinatura de alta frequência identificável por técnicas ultrassônicas. Essa técnica é particularmente útil na detecção de vazamentos em válvulas, purgadores, tubulações, entre outros (MOBLEY, 2002).

O monitoramento ultrassônico pode ser combinado com atividades de lubrificação para verificar se a graxa atingiu o rolamento dentro de um mancal, avaliando a melhoria no nível de ruído detectado pelo equipamento. Essa abordagem contribui para a identificação

precoce de potenciais problemas e aprimora a eficácia das práticas de manutenção (SDT, 2002).

2.1.3.3 Análises de Lubrificantes

A análise desempenha um papel crucial na Manutenção Preditiva, proporcionando informações valiosas sobre a condição da película de lubrificante em máquinas. Amostras de lubrificante são recomendadas em intervalos programados para avaliar a presença de sintomas iniciais de desgaste em componentes sem a necessidade de desmontagem.

A análise de óleo abrange diversos testes, incluindo:

1. Viscosidade: Avalia a capacidade do óleo de evitar o contato metal-metal e sua habilidade de lubrificação.
2. Contaminação: Identifica a presença de água ou refrigerante, potenciais causadores de problemas no lubrificante.
3. Conteúdo de sólidos: Verifica a presença de partículas sólidas que podem aumentar o desgaste de peças lubrificadas.
4. Fuligem de combustível: Indica a presença de fuligem resultante da queima de combustíveis, especialmente relevante em motores diesel.
5. Oxidação: Avalia a oxidação do óleo, que pode resultar em depósitos de laca, corrosão ou espessamento do óleo.
6. Índice de Acidez Total: Mede a quantidade de material ácido na amostra de óleo.
7. Número Total Base: Indica a capacidade do óleo para neutralizar a acidez.
8. Contagem de Partículas: Revela a quantidade de partículas presentes, fornecendo insights sobre o funcionamento anormal das máquinas ou possíveis falhas devido a orifícios bloqueados.

Esses testes fornecem informações precisas sobre as condições das superfícies em movimento relativo, contribuindo para a detecção precoce de problemas e otimizando as práticas de manutenção (LAGO, 2007).

2.1.3.4 Análise de Partículas de Desgaste

O desgaste nas peças da máquina, como eixos, rolamentos e engrenagens, é uma inevitabilidade mesmo em sistemas devidamente lubrificados. A análise das partículas presentes no lubrificante oferece informações cruciais sobre o estado da máquina, considerando a forma, composição, tamanho e quantidade das partículas na amostra.

Existem principalmente dois métodos para analisar partículas de desgaste. O primeiro método, conhecido como espectroscopia ou análise espectrográfica, utiliza filtros graduados para separar sólidos por tamanho. No entanto, essa abordagem é limitada a partículas com dimensões de 10 micrômetros ou menos, excluindo contaminantes maiores e restringindo os benefícios da técnica.

O segundo método, chamado ferrografia, utiliza um campo magnético para separar partículas de desgaste. Uma limitação desse método é que apenas partículas magnéticas são removidas para análise, excluindo materiais não magnéticos, como cobre ou alumínio, que fazem parte do desgaste em máquinas típicas. A análise ferrográfica consegue identificar partículas de até 100 micrômetros, proporcionando uma representação mais abrangente da contaminação total da amostra.

2.1.3.5 Análise de Vibração

Este trabalho concentra-se na análise de vibração, uma técnica que fornece uma quantidade significativa de informações em comparação com outras abordagens (ILEARNVIBRATION, 2009). Todas as máquinas em operação geram vibrações, as quais indicam seu processo de deterioração. Ao monitorar o progresso do nível de vibração, obtém-se informações sobre a condição da máquina. Essas vibrações resultam em um espectro de frequências específico, denominado "assinatura", que, quando analisado, permite verificar se o equipamento está em condições normais ou apresenta defeitos incipientes (MARAN, 2012).

Com o avanço dos instrumentos de medição, equipamentos de monitoramento e softwares especializados, diversas falhas, como desbalanceamento, desalinhamento, empenamento de eixos, entre outras, podem ser identificadas precocemente (MOSHAGE et al., 1993). Embora a análise de vibração seja uma ferramenta valiosa, ela deve ser complementada por outras técnicas, como a ferrografia, para uma avaliação mais abrangente da condição das máquinas (MATHEW; STECKI, 1986).

No diagnóstico de falhas, é crucial conhecer as frequências de vibração associadas a possíveis defeitos. A análise das características geométricas e dinâmicas do equipamento, juntamente com a realização de um plano esquemático, é fundamental para identificar anomalias nas frequências do espectro de vibração (HAMMOND; SHIN, 2008).

Entre as fontes comuns de vibração indesejável, estão o desbalanceamento, desalinhamento, e mancais de rolamento defeituosos, cada um com características distintas no espectro de vibração (MANTENIMIENTO MUNDIAL, 2012). A folga mecânica, originada por peças soltas, também pode ser identificada pela análise das vibrações, apresentando um espectro com picos harmônicos e ruído de fundo elevado (MANTENIMIENTO MUNDIAL, 2012).

A Manutenção Preditiva, baseada no acompanhamento contínuo das condições da máquina, permite determinar o momento oportuno para a realização de ações de manutenção, otimizando a vida útil dos equipamentos. No entanto, é uma técnica que requer equipamentos avançados e treinamento específico. Este trabalho propõe o desenvolvimento e avaliação de um analisador de vibração de baixo custo, integrando sensores, visando tornar a Manutenção Preditiva mais acessível a profissionais da área.

3 PROJETO E DESENVOLVIMENTO

Tendo como base os tipos de análises em motores descritos anteriormente, esta sessão visa desenvolver um sistema de monitoramento viável economicamente com o objetivo de detectar, através da análise de vibração, anomalias que possam indicar falhas iminentes no motor, proporcionando manutenção preditiva eficiente e prevenindo paradas inesperadas. A implementação deste sistema pode resultar em maior confiabilidade e vida útil dos motores.

Assim, faz-se necessário o uso de um sensor capaz de captar as vibrações do motor, como o MPU6050, que registrará as acelerações nos eixos x, y e z. Esses dados serão enviados para uma base de dados a ser posteriormente processada e analisada. Um microprocessador, como o ESP32, atuará como intermediário, sendo responsável pela coleta e transmissão dos dados de vibração do sensor para o banco de dados em tempo real.

A implementação do ESP32, além de viabilizar a conectividade sem fio, permite a realização de pré-processamentos simples nos dados, como filtragem e compressão, reduzindo o volume de informações transmitidas e otimizando a eficiência do sistema. Essa arquitetura de monitoramento será uma solução econômica e escalável, garantindo que os motores sejam monitorados, prolongando sua vida útil e minimizando custos com manutenções emergenciais.

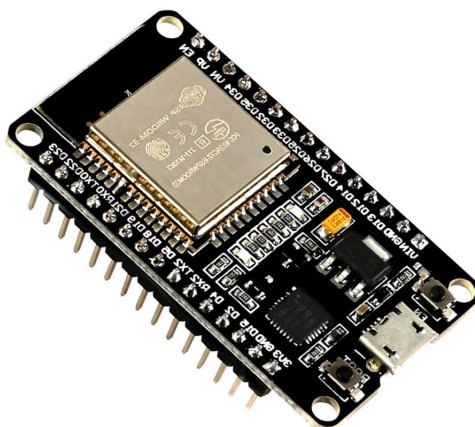
Para garantir a operação autônoma do sistema sem a necessidade de cabos de energia, é fundamental integrar uma bateria adequada. Uma bateria recarregável de lítio, como uma bateria BL-5C, seria uma opção viável devido à sua durabilidade, densidade de energia e capacidade de sustentar o funcionamento do ESP32 e do sensor MPU6050 por longos períodos.

3.1 ESP32

O ESP32, um microprocessador popularmente presente em projetos IoT, tornou-se uma escolha proeminente no projeto devido à sua combinação única de características, como baixo custo, pouco consumo de energia, capacidade de processamento, facilidade de manuseio, módulo Wifi e Bluetooth integrado e a vasta disponibilidade de periféricos e shields.

Assim, a escolha desse microprocessador se fez necessário por atender os requisitos para o devido projeto.

Figura 4 – ESP32.



Fonte: Catálogo Alldatasheet.

Tabela 1 – Dados Técnicos ESP32.

Módulo:	ESP-WROOM-32
Processador:	Xtensa 32-Bit LX6 Dual Core
Memória SRAM:	520Kb
Tensão de Alimentação:	2,7 à 3,6 VDC
Tensão de nível lógico:	3,3VDC (não tolera 5V)
Corrente de consumo:	80mA (típica)
Corrente de consumo:	500mA (máxima)
WiFi: 802.11 b/g/n:	2.4 à 2.5 GHz
Bluetooth:	4.2 BR / EDR e BLE (Bluetooth Low Energy)
Suporte:	Arduino IDE, Lua e MicroPython, Código C básico
Temperatura de trabalho:	-40° à +85° C
Dimensões:	25,5x18x3,1mm
Peso:	2g

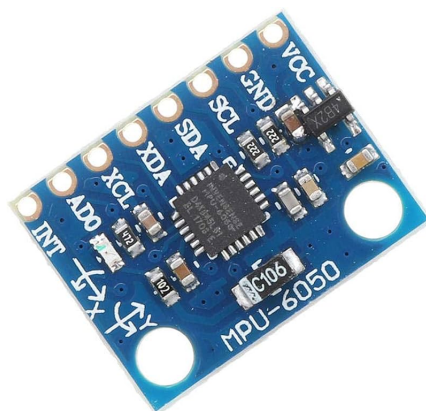
3.2 MPU6050 GY - 521

O sensor contém em um único chip um acelerômetro e um giroscópio tipo MEMS. São 3 eixos para o acelerômetro e 3 eixos para o giroscópio, sendo ao todo 6 graus de liberdade (6DOF). Será útil em nosso sistema, onde teremos que aferir a vibração do nosso motor através desse sensor, capturando os canais X, Y e Z ao mesmo tempo.

Tabela 2 – Especificações Técnicas MPU-6050.

Chip:	MPU-6050
Tensão de Operação:	3-5V
Conversor:	AD 16 bits
Comunicação:	Protocolo Padrão I2C
Faixa do Giroscópio:	+/-250, 500, 1000, 2000 ^º /s
Faixa do Acelerômetro:	+/-2, +/-4, +/-8, +/-16g
Dimensões:	2,1 x 1,6 x 0,3cm

Figura 5 – Sensor MPU-6050 BY - 521.



Fonte: Site Alldatasheet.

3.3 Bateria BL 5C

A bateria é recarregável de íon de lítio (Li-ion) comumente utilizada em dispositivos eletrônicos, especialmente em telefones celulares. Ela é caracterizada por suas dimensões específicas e capacidade de energia. Adotada especificamente para o projeto por oferecer dimensões pequenas, suprir o fornecimento de tensão para o sistema e ser recarregável, permitindo seu uso prolongado.

Figura 6 – Bateria BL 5C.



Fonte: Site google imagens.

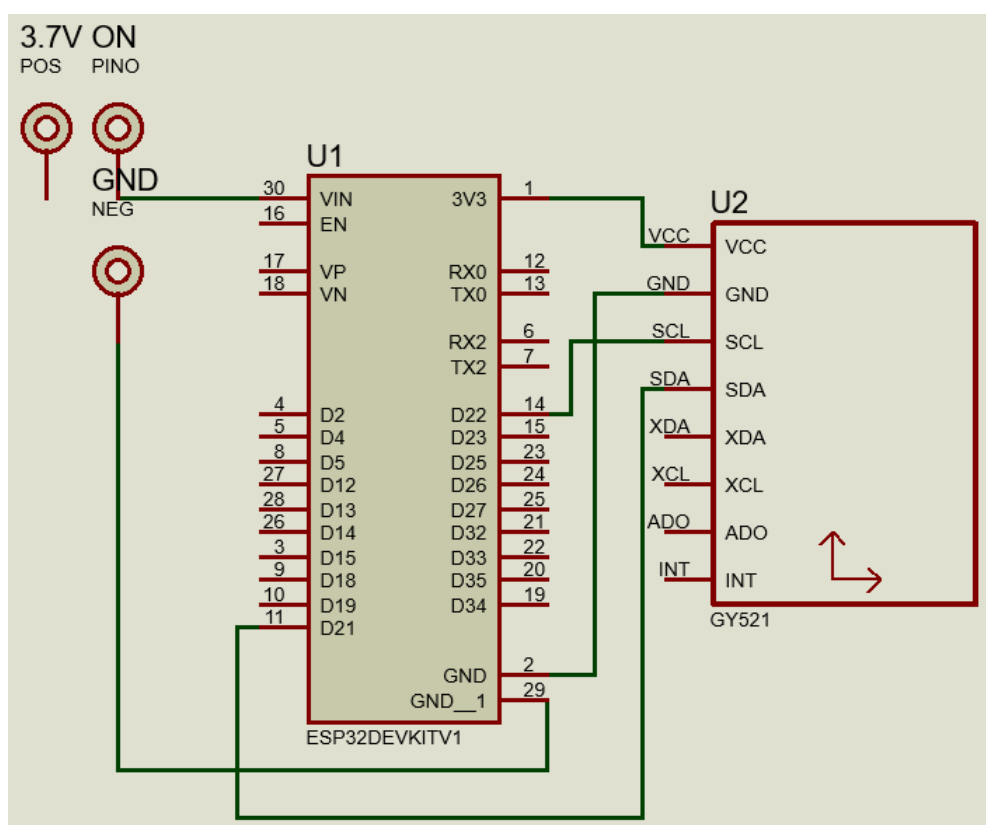
Tabela 3 – Especificações Técnicas Bateria BL-5C.

Modelo:	BL-5C
Dimensões:	33,79 x 53,18(mm)
Voltagem Nominal:	3,7V
Peso:	100g

3.4 Implementação

Após a cuidadosa seleção dos componentes para o sistema, optou-se por utilizar o software Protheus para realizar simulações detalhadas das conexões, resultando na geração de um esquemático abrangente. Este processo foi essencial para validar a eficácia e a eficiência das ligações propostas, contribuindo de maneira significativa para o desenvolvimento e a compreensão do projeto em questão.

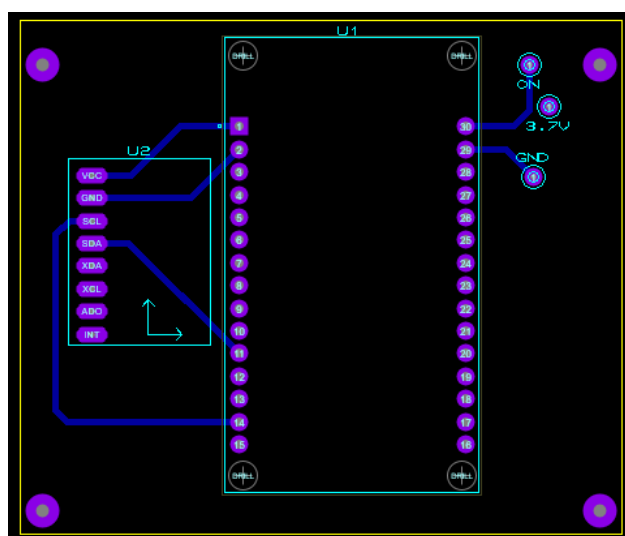
Figura 7 – Vista esquemática do circuito.



Fonte: Autor.

Empregando a mesma plataforma de software, Protheus, foi viabilizada a concepção detalhada das trilhas destinadas à confecção da Placa de Circuito Impresso (PCB). Este passo crucial no processo de desenvolvimento permitiu uma meticulosa elaboração das trilhas, garantindo uma implementação precisa e eficiente no layout da placa. Tal abordagem não apenas facilitou a fabricação da PCB, mas também contribuiu de maneira substancial para a integridade e desempenho do sistema em questão, ressaltando a importância do software Protheus em todas as fases do projeto.

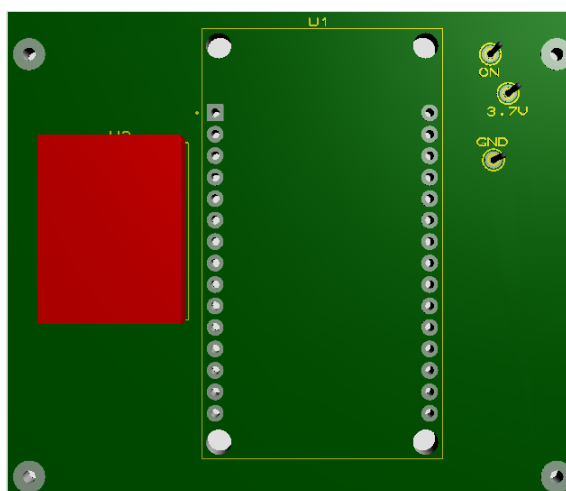
Figura 8 – Vista layout da PCB.



Fonte: Autor.

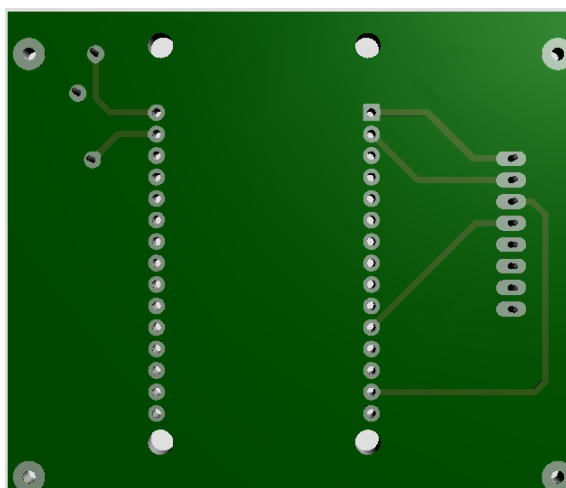
A visualização tridimensional do circuito, obtida também por meio do software, proporcionou uma representação gráfica que ofereceu uma perspectiva aprimorada sobre o aspecto final do sistema. Essa capacidade de gerar uma visualização 3D foi fundamental para fornecer uma compreensão mais abrangente da disposição física dos componentes, contribuindo significativamente para a análise estética e funcional do projeto. A utilização desta funcionalidade desempenhou um papel crucial na validação visual do circuito antes da implementação prática.

Figura 9 – Vista superior 3D da PCB.



Fonte: Autor.

Figura 10 – Vista inferior 3D da PCB.



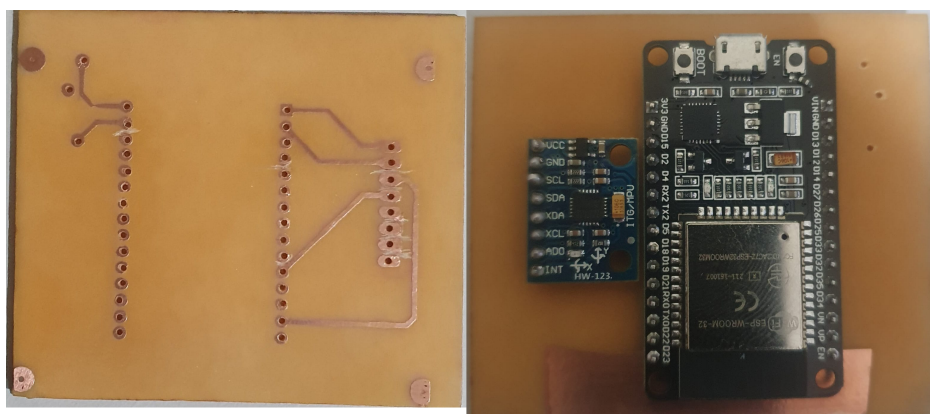
Fonte: Autor.

3.5 Confeção da placa

A confecção de placas de circuito impresso (PCBs) é uma etapa fundamental na fabricação de dispositivos eletrônicos. Este processo envolve a criação de circuitos elétricos em substratos não condutores, como fenolite, utilizando técnicas que garantem a precisão e a eficiência. Entre as várias abordagens, a transferência térmica de imagens utilizando papel fotográfico, seguida da corrosão química com percloroeto de ferro, é um método popular, especialmente em ambientes de aprendizado e prototipagem.

O primeiro passo é imprimir o layout da PCB em uma folha de papel fotográfico. A imagem impressa é posicionada sobre o fenolite e usando uma prensa térmica ou um ferro de passar, calor e pressão são aplicados. Essa ação faz com que a tinta do papel fotográfico se transfira para a superfície do fenolite, formando uma máscara que protegerá as áreas do cobre que não devem ser removidas durante o processo de corrosão. Após a transferência da imagem, a placa é submersa em uma solução de percloroeto de ferro. Este composto químico atua como um agente corrosivo, removendo o cobre exposto e deixando apenas as trilhas de circuito desejadas, que estão protegidas pela tinta. Após a corrosão, a placa é retirada da solução e lavada para remover qualquer resíduo. A máscara de tinta é então removida, revelando o circuito final. A placa pode ser perfurada para montagem de componentes e, em seguida, soldada conforme necessário.

Figura 11 – Placa teste do projeto.



Fonte: Autor.

4 COLETA, ANÁLISE E DEMONSTRAÇÃO DOS DADOS

A demonstração dos dados coletados e analisados será fundamental para ilustrar as correlações entre os níveis de vibração e o desempenho dos motores. A apresentação visual, por meio de gráficos e relatórios, permitirá uma compreensão mais clara das condições operacionais e das possíveis intervenções necessárias. Além disso, a discussão dos resultados contribuirá para a identificação de melhores práticas de manutenção e otimização dos processos industriais.

4.1 Coleta de Dados

O Google Sheets foi escolhido como ferramenta para o armazenamento dos dados da placa devido à sua acessibilidade em um ambiente online, proporcionando uma interface intuitiva que facilita a organização e a análise das informações, sem a necessidade de complexidade adicional. Além disso, existem APIs que possibilitam a integração do ESP32 com o Google Sheets, permitindo a transferência automatizada de dados, o que torna o processo ainda mais eficiente.

4.2 Análise de Dados

A análise de falhas em motores elétricos trifásicos por meio do espectro de frequências é uma técnica comum, especialmente utilizando a Análise de Frequência de Corrente de Motores (MCSA, Motor Current Signature Analysis) e Análise de Vibração. Essas análises serão programadas em Python, permitindo a automação e a eficiência no processamento dos dados coletados.

Foi utilizada a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para realizar a análise dos dados coletados no domínio do tempo e convertê-los para o domínio da frequência. A FFT é uma técnica amplamente empregada para a decomposição de sinais temporais em suas componentes de frequência, permitindo a identificação de padrões e características importantes que não seriam visíveis no domínio do tempo.

Ao aplicar a FFT, os dados de vibração das máquinas foram transformados, facilitando a identificação de frequências dominantes, ressonâncias e outros comportamentos relevantes, como picos de frequência associados a falhas específicas. Essa abordagem oferece uma visão mais detalhada e precisa do comportamento do sistema, possibilitando a detecção de anomalias que podem indicar o início de falhas ou problemas operacionais. A conversão para o domínio da frequência foi essencial para realizar uma análise mais eficiente e fornecer informações que contribuíram para a manutenção preditiva e otimização do desempenho dos equipamentos.

A seguir, são apresentadas algumas falhas comuns em motores trifásicos, juntamente com as respectivas frequências características que podem ser detectadas no espectro de frequência.

4.2.1 Desbalanceamento de Tensão

O desbalanceamento de tensão gera componentes harmônicas de baixa frequência, que podem ser detectadas em frequências múltiplas da frequência fundamental.

- Frequência característica: Frequência de linha (50 Hz ou 60 Hz) e seus múltiplos.

4.2.2 Problemas no Rotor (Gaiola de Esquilo)

Defeitos no rotor, como barras quebradas ou desbalanceamento, produzem componentes de baixa frequência no espectro de corrente ou vibração.

- Frequência característica: As frequências laterais ao redor da frequência fundamental podem ser expressas pela fórmula:

$$f_b = f_s \left(1 \pm \frac{2s}{p} \right) \quad (4.1)$$

onde:

- f_b é a frequência das falhas do rotor,
- f_s é a frequência da linha (ex: 50 Hz ou 60 Hz),
- s é o escorregamento do motor (diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade real),
- p é o número de pares de polos do motor.

Por exemplo, em um motor com um escorregamento típico de 1% ($s = 0.01$), as frequências de falha no rotor aparecerão ligeiramente acima e abaixo da frequência fundamental.

4.2.3 Desbalanceamento ou Falhas nos Rolamentos

Problemas em rolamentos, como desgaste ou falta de lubrificação, podem ser detectados em frequências específicas associadas à geometria do rolamento. As principais frequências de falha de rolamentos incluem:

- Frequências características:
 - Frequência do Passo da Esfera (BPFO - Ball Pass Frequency Outer):

$$f_{bpfo} = \frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{d}{D} \cdot \cos(\beta) \right) \quad (4.2)$$

– Frequência do Passo da Esfera Interno (BPFI - Ball Pass Frequency Inner):

$$f_{bpfi} = \frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{d}{D} \cdot \cos(\beta) \right) \quad (4.3)$$

Onde:

- * f_r é a frequência de rotação do eixo,
- * n é o número de esferas,
- * d é o diâmetro da esfera,
- * D é o diâmetro do caminho de rolagem,
- * β é o ângulo de contato.

4.2.4 Eixo Desalinhado

O desalinhamento do eixo pode gerar componentes harmônicas de alta frequência.

- Frequência característica: Múltiplos da frequência de rotação do motor, como $2f_r, 3f_r, 4f_r$, etc.

4.2.5 Excêntricidade

A excêntricidade, que se refere ao desalinhamento entre o rotor e o estator, pode resultar em componentes laterais ao redor da frequência fundamental e suas harmônicas.

- Frequência característica: Frequências laterais f_c em torno da frequência da linha f_s :

$$f_c = \left(1 \pm \frac{n}{p} \right) f_s \quad (4.4)$$

onde n é o número de harmônicas e p é o número de pares de polos.

4.2.6 Harmônicos na Rede Elétrica

Problemas de qualidade de energia, como harmônicos causados por cargas não lineares, também podem ser observados no espectro de frequência.

- Frequência característica: Múltiplos da frequência fundamental (3ª, 5ª, 7ª harmônicas, etc.).

4.3 Demonstração dos Dados

A demonstração dos dados coletados e analisados será realizada utilizando o Google Colab, uma plataforma colaborativa para execução de código Python em notebooks. O Colab é conhecido por sua praticidade e acessibilidade, permitindo que os desenvolvedores

executem análises e compartilhem seus resultados de forma rápida, sem a necessidade de configurar um ambiente local.

Neste projeto, todas as análises realizadas em Python serão integradas no Colab, possibilitando a criação de uma interface interativa dentro do notebook. Nela, os usuários poderão visualizar os resultados das análises em tempo real, com gráficos, tabelas e relatórios dinâmicos gerados a partir das análises de vibração dos motores elétricos trifásicos.

O Google Colab também proporciona um ambiente robusto para a visualização e interpretação dos dados, facilitando a identificação e o diagnóstico de falhas nos motores elétricos, sem a necessidade de configuração de servidores, como ocorre com frameworks web tradicionais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de vibração dos motores elétricos trifásicos resultou na identificação de dados relevantes que podem comprometer o desempenho e a eficiência dos equipamentos. Utilizando técnicas de monitoramento e processamento em um ambiente Python, foram coletadas e analisadas as vibrações, possibilitando uma visualização dinâmica e interativa das informações.

A discussão enfoca a importância desses dados para o diagnóstico e a manutenção preditiva dos motores, evidenciando como as vibrações podem indicar problemas como desalinhamento, desbalanceamento e falhas em rolamentos.

A avaliação crítica dos resultados oferece uma compreensão mais aprofundada das condições operacionais dos motores elétricos, permitindo a identificação de tendências e padrões que podem contribuir para a otimização das práticas de manutenção.

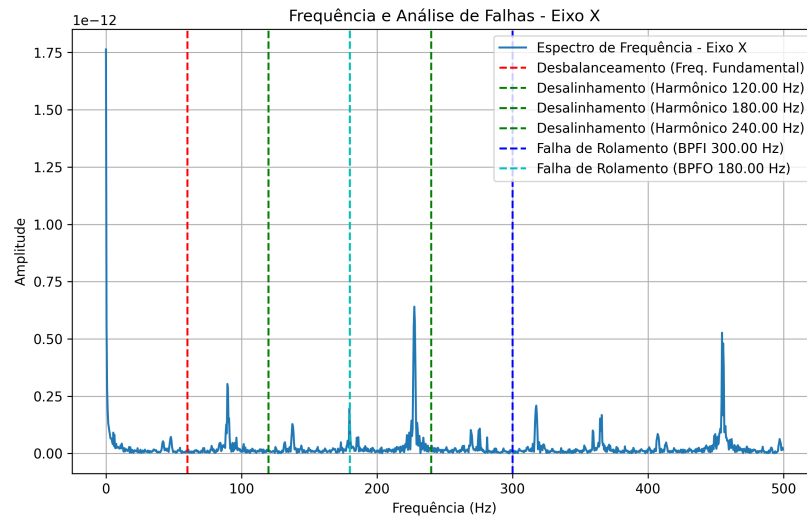
5.1 Apresentação dos Resultados

A análise de vibração realizada foi realizada em dois motores elétricos, normal e um que apresentava problemas, revelando informações significativas sobre o desempenho e a condição operacional de cada um. As medições foram coletadas nos eixos x, y e z, as análises feitas em python no colab e a comparação dos resultados foi gerada em gráficos, permitindo identificar diferenças notáveis entre os dois grupos de motores.

5.1.1 Motor Normal

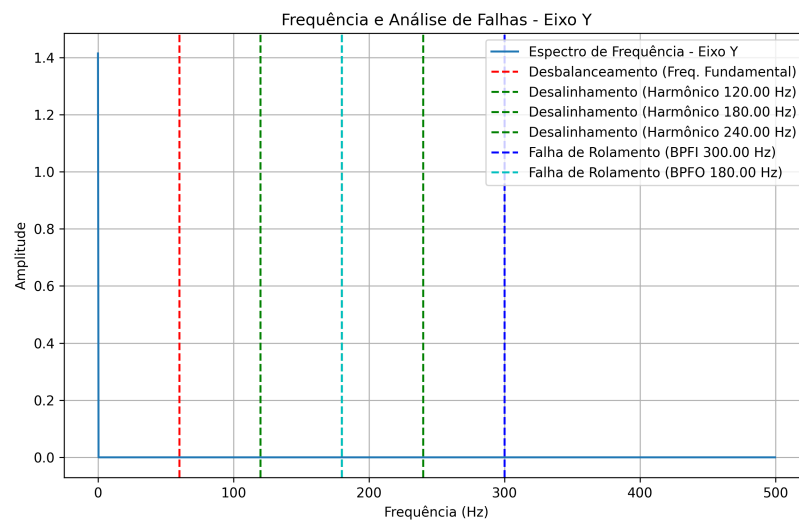
As vibrações registradas no motor normal mostraram um padrão consistente e dentro dos limites aceitáveis. Os dados coletados indicam um equilíbrio adequado entre os eixos x, y e z, com amplitudes de vibração que permanecem em níveis baixos. Esses resultados sugerem que o motor está operando eficientemente, sem apresentar desgaste excessivo ou desalinhamento.

Figura 12 – Frequência e Análise de falhas - Eixo X - Motor Normal.



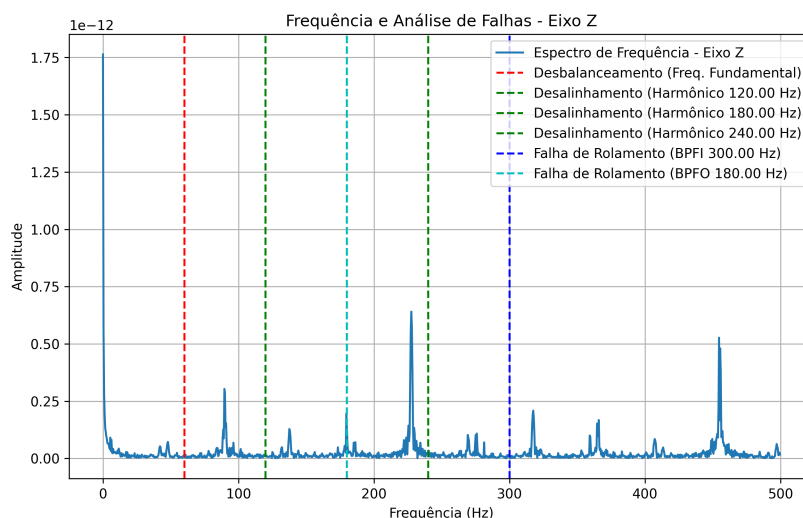
Fonte: Gerado pelo Autor no Google Colab.

Figura 13 – Frequência e Análise de falhas - Eixo Y - Motor Normal.



Fonte: Gerado pelo Autor no Google Colab.

Figura 14 – Frequência e Análise de falhas - Eixo Z - Motor Normal.

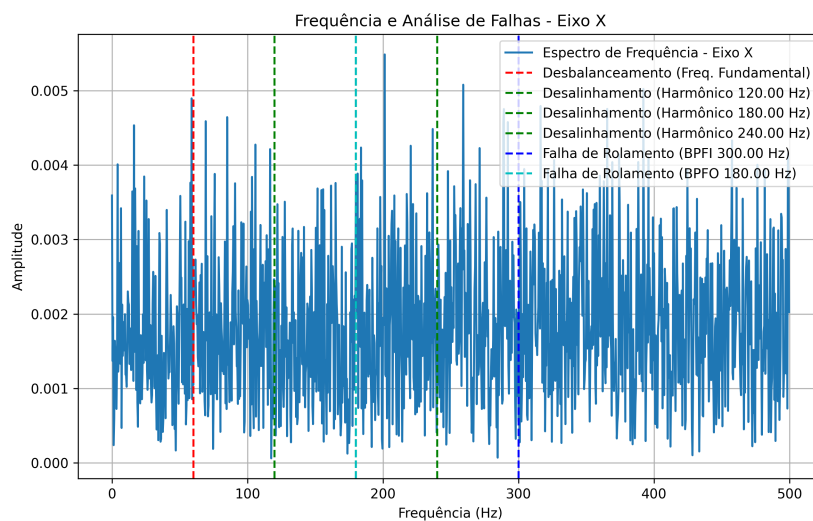


Fonte: Gerado pelo Autor no Google Colab.

5.1.2 Motor com Problemas

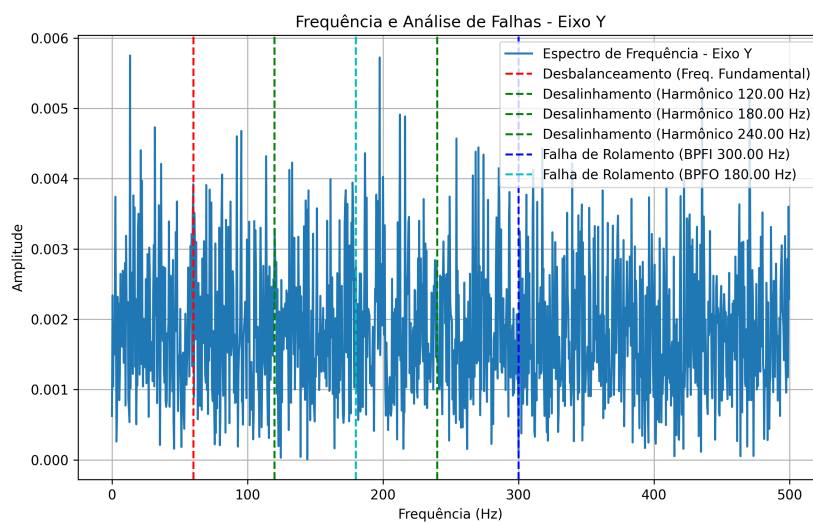
Em contraste, a análise do motor com problemas revelou um comportamento distinto e preocupante. Observamos um aumento significativo nas amplitudes de vibração, especialmente em um ou mais eixos. Essa disparidade sugere que o motor está desbalanceado, o que pode ser resultado de vários fatores, como desgaste de componentes internos, acumulação de sujeira ou falhas de alinhamento. O desbalanceamento contribui para a ineficiência do motor, podendo resultar em danos a longo prazo e redução da vida útil do equipamento.

Figura 15 – Frequência e Análise de falhas - Eixo X - Motor com Problemas.



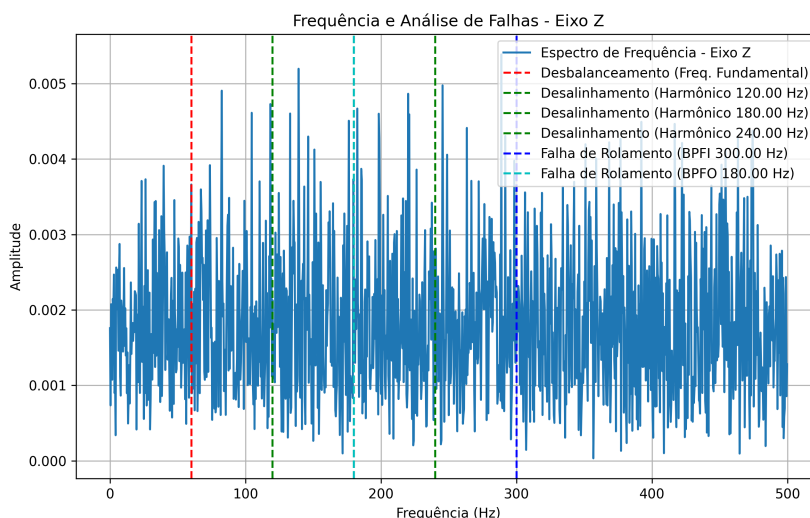
Fonte: Gerado pelo Autor no Google Colab.

Figura 16 – Frequência e Análise de falhas - Eixo Y - Motor com Problemas.



Fonte: Gerado pelo Autor no Google Colab.

Figura 17 – Frequência e Análise de falhas - Eixo Z - Motor com Problemas.



Fonte: Gerado pelo Autor no Google Colab.

5.2 Discussão

A análise comparativa entre motores elétricos em funcionamento normal e com falhas apresenta insights cruciais para o diagnóstico, manutenção e melhoria da eficiência operacional. Ao estudar ambos os cenários, podemos entender melhor os padrões de comportamento dos motores e as características que indicam potenciais problemas.

Os motores em bom estado operam com um padrão de vibração relativamente estável e dentro dos limites aceitáveis. As medições nos eixos x, y e z mostram amplitudes baixas e uniformes, refletindo um balanceamento adequado e um funcionamento harmonioso. Em contraste, motores com falhas frequentemente exibem padrões de vibração anômalos, com picos em determinadas frequências que podem indicar desbalanceamento, desalinhamento ou desgaste excessivo de componentes.

A análise de dados de vibração de motores com falhas revela padrões que podem ser críticos para a manutenção preditiva. Por exemplo, o aumento progressivo nas amplitudes de vibração pode ser um sinal de que uma falha iminente está se aproximando. Identificar esses padrões em tempo hábil permite intervenções antes que os problemas se agravem, reduzindo custos de reparo e aumentando a confiabilidade do sistema.

A distinção entre motores com e sem falha também tem implicações significativas para as estratégias de manutenção. Os dados obtidos a partir da análise de motores sem falha podem ser utilizados como referência para estabelecer limites de alerta e parâmetros operacionais ideais. Ao definir esses padrões, as equipes de manutenção podem implementar planos de ação mais eficazes, baseados em dados reais e não apenas em suposições.

6 CONCLUSÕES

O desenvolvimento de um sistema de baixo custo para aquisição, análise e monitoramento de vibrações em motores de indução trifásicos apresentou resultados significativos, validando a eficácia do sistema proposto. Este projeto possibilitou a criação de uma ferramenta acessível e eficiente para manutenção preditiva, contribuindo para a detecção precoce de falhas e, conseqüentemente, para a preservação e otimização de recursos em pequenos negócios industriais e agrícolas, onde os custos elevados de manutenção geralmente são uma barreira.

Durante o estudo, foi possível observar a eficácia do sistema em identificar padrões de vibração característicos tanto em motores em condições normais quanto em motores com problemas operacionais. As análises em Python, realizadas no Google Colab, permitiram uma visualização dinâmica dos dados, revelando que o motor com problemas apresentava amplitudes de vibração elevadas e frequências características de falhas, como desbalanceamento, desalinhamento e desgaste de rolamentos. Esses resultados confirmam a sensibilidade e a precisão do sistema em detectar anomalias no espectro de frequência, alinhando-se aos padrões de manutenção preditiva modernos.

A adoção de componentes como o ESP32 e o sensor MPU6050 foi determinante para alcançar um equilíbrio entre desempenho e custo, garantindo que o dispositivo pudesse ser replicado e aplicado em diferentes cenários de monitoramento sem comprometer a qualidade das análises. O uso do Google Sheets como armazenamento de dados e a integração com o Google Colab para processamento também provaram ser uma abordagem prática e eficiente, ao mesmo tempo que possibilitam uma implementação escalável e de fácil manutenção.

Os resultados evidenciam que o sistema desenvolvido pode atuar como uma alternativa viável aos métodos tradicionais de monitoramento de motores elétricos, representando um avanço na democratização do acesso à tecnologia de manutenção preditiva. Ao fornecer uma solução que permite a antecipação de falhas com precisão, o sistema não só auxilia na redução de custos com manutenção corretiva, mas também minimiza paradas inesperadas, otimizando o desempenho operacional e aumentando a vida útil dos equipamentos.

Esses avanços contribuem para a sustentabilidade e competitividade de empresas de pequeno e médio porte, que, com o uso dessa tecnologia, podem se beneficiar de práticas de manutenção científica e eficiente, sem a necessidade de grandes investimentos. Este projeto abre, portanto, caminho para a expansão das práticas de manutenção preditiva em diferentes setores, fomentando uma cultura de inovação e eficiência energética no uso de motores de indução em operações cotidianas.

7 TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados alcançados neste projeto de análise de vibração de motores elétricos, há várias oportunidades para expandir e aprimorar o trabalho. Um dos primeiros passos seria aplicar os conceitos e técnicas de coleta e análise de dados de vibração a outros tipos de motores, como motores a combustão, que possuem características de operação e padrões de falha distintos. Isso possibilitaria uma análise mais ampla e diversificada dos sistemas mecânicos em geral.

Uma possibilidade interessante seria a implementação de análises de falhas adicionais em motores elétricos, podendo revelar informações sobre a condição do motor e possíveis falhas elétricas. Integrar diferentes métodos de análise fornecendo uma visão mais abrangente e precisa do estado dos motores, facilitando a identificação de problemas e a tomada de decisões para a manutenção.

Outro aspecto importante seria o desenvolvimento de uma interface gráfica mais aprimorada e intuitiva para os usuários. Embora o Google Colab ofereça uma plataforma robusta, criar uma interface dedicada e mais amigável pode otimizar a experiência do usuário final, facilitando a navegação pelos gráficos, tabelas e relatórios, além de oferecer uma visualização mais clara e detalhada dos dados.

A coleta e análise de dados em tempo real (just in time) seria outro avanço crucial. Com isso, as falhas dos motores poderiam ser observadas e indicadas no exato momento em que ocorrem, permitindo uma resposta imediata a problemas e reduzindo o tempo de inatividade ou possíveis danos maiores ao equipamento.

Além disso, a aplicação de técnicas de machine learning poderia transformar significativamente o processo de diagnóstico. Modelos preditivos poderiam ser desenvolvidos para identificar padrões de falhas antes mesmo de se manifestarem de forma crítica, proporcionando uma manutenção preditiva mais eficiente e inteligente, com base em dados históricos e em tempo real.

REFERÊNCIAS

- ABRAMAN. *Associação Brasileira de Manutenção*. [S.l.: s.n.], 2009. 10 p. Disponível em: <http://www.abraman.org.br>. Acesso em: 21 Mai. 2024.
- CAPELLI, A. *Automação Industrial: controle do movimento e processos contínuos*. 3. ed. São Paulo: Érica, 2013.
- CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de Máquinas elétricas*. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- HAMMOND, J.; SHIN, K. *Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers*. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- ILEARNVIBRATION. *Vibration Analyst Educational Software*. [S.l.]: Mobius Institute, Australia, 2009.
- ISO 18436-2. *ISO 18436-2:2003 Condition monitoring and diagnostics of machines – Requirements for training and certification of personnel – Part 2: Vibration condition monitoring and diagnostics*. [S.l.: s.n.], 2003.
- LAGO, D. *Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante*. UNESP, Campus de Ilha Solteira: [s.n.], 2007. Disponível em: http://coruja.feis.unesp.br/dem/ppgem/teses_dissertacoes/2007/dissertacao_dflago.pdf. Acesso em: 21 Mai. 2024.
- MANTENIMIENTO MUNDIAL. *Manutenção Preditiva – Análise de vibração*. [S.l.: s.n.], 2012. Disponível em: <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/Apostila.pdf>. Acesso em: 21 Mai. 2024.
- MARAN, M. *Manutenção baseada em condição aplicada a um sistema de ar condicionado como requisito para sustentabilidade de edifício de escritórios*. São Paulo: EPUSP, 2012. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/576). Disponível em: http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00576.pdf. Acesso em: 21 Mai. 2024.
- MATHEW, J.; STECKI, J. S. *Comparison of vibration and direct reading ferrographic techniques in application to high-speed gears operating under steady and varying load conditions*. [S.l.]: Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers, 1986. v. 43. 646–653 p.
- MOBLEY, R. *An introduction to predictive maintenance*. Second edition. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2002. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978075067531450004X>. Acesso em: 21 Mai. 2024.
- MOSHAGE, R. et al. *Vibration monitoring for predictive maintenance in central energy plants. US Army Corp of Engineers. Technical Report FE-93/25*, 1993.
- NBR5462. *NBR 5462: Confiabilidade e Manutenção - Procedimentos*. Rio de Janeiro, Brasil, 1994. Norma Técnica Brasileira.
- SCHEFFER, C.; GIRDHAR, P. *Practical Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance*. [S.l.]: Elsevier, 2004.

SDT. *Predictive Maintenance...for the masses*. [S.l.: s.n.], 2002. Disponível em: <http://www.sdthearmore.com/products/sdt270>. Acesso em: 21 Mai. 2024.

SELLITTO, M. *Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos*. [S.l.]: Revista Produção, 2005. v. 15. 44–59 p. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2006_TR450305_6975.pdf. Acesso em: 21 Mai. 2024.

WAEYENBERGH, G.; PINTELON, L. *Maintenance concept development: A case study*. [S.l.]: International Journal of Production Economics, 2004. v. 89. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527303003013>. Acesso em: 21 Mai. 2024.

WEG MOTORES. *Motores Síncronos*. [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h13/h7e/WEGmotoressincronos50005369catalogoportuguesbr.pdf>. Acesso em: 21 Mai. 2024.

WUTTKE, R. *Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico*. [S.l.]: Revista Produção Online, 2008. VIII. Disponível em: <http://producaoonline.org.br/rpo/article/viewFile/134/266>. Acesso em: 21 Mai. 2024. ISSN 1676-1901.

APÊNDICE A - CÓDIGO ESP32

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MPU6050.h>
#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>

// Configurações de Wi-Fi
const char* ssid = "INSERIR_REDE";
const char* password = "INSERIR_SENHA";

// URL do script web app do Google Sheets
const char* googleScriptURL =
"https://script.google.com/macros/s/AKfycbz10koBNJvyxjDB0n5lXwtTqDntBY3ONP4Q1qKOn9hJAVIgoxx_EQ_k6l-emw38PspJGA/exec";

Adafruit_MPU6050 mpu;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Wire.begin(21, 22); // Inicializa I2C nas portas D21 (SDA) e D22 (SCL)

  // Configura o Wi-Fi
  WiFi.begin(ssid, password);
  Serial.print("Conectando ao Wi-Fi...");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(1000);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("\nConectado ao Wi-Fi!");

  // Inicializa o MPU6050
  if (!mpu.begin()) {
    Serial.println("Falha ao inicializar o MPU6050!");
    while (1);
  }
  Serial.println("MPU6050 inicializado com sucesso!");
}

void loop() {
  // Lê os dados de aceleração do MPU6050
  sensors_event_t a, g, temp;
  mpu.getEvent(&a, &g, &temp);

  // Envia os dados de aceleração para o Google Sheets
  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    HTTPClient http;
    String url = googleScriptURL;
    url += "?accX=" + String(a.acceleration.x);
    url += "&accY=" + String(a.acceleration.y);
    url += "&accZ=" + String(a.acceleration.z);

    http.begin(url);
    int httpResponseCode = http.GET();
    if (httpResponseCode > 0) {
      Serial.print("Dados enviados com sucesso. Código de resposta: ");
      Serial.println(httpResponseCode);
    } else {
      Serial.print("Erro ao enviar dados. Código de resposta: ");
    }
  }
}
```

```
        Serial.println(httpResponseCode);
    }
    http.end();
} else {
    Serial.println("Erro na conexão Wi-Fi.");
}
}
```

APÊNDICE B - CÓDIGO GOOGLE SHEETS

```
function doGet(e) {  
  var sheet =  
    SpreadsheetApp.openById('14RzLLhVV6SdD1A-6LAKxGZgy98-qbjn7wQ_gsJd8xEI').getSheetByName('dados');  
  
  // Recupera a data e hora atuais como uma string formatada  
  var currentDate = Utilities.formatDate(new Date(), Session.getScriptTimeZone(), "yyyy-MM-dd HH:mm:ss");  
  
  // Recupera os valores das acelerações dos parâmetros da URL  
  var accX = e.parameter.accX;  
  var accY = e.parameter.accY;  
  var accZ = e.parameter.accZ;  
  
  // Adiciona uma nova linha com data/hora e acelerações nas colunas correspondentes  
  var newRow = [currentDate, accX, accY, accZ];  
  sheet.appendRow(newRow);  
  
  return ContentService.createTextOutput('Dados armazenados com sucesso.');
```

APÊNDICE C - CÓDIGO GOOGLE COLAB

```

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.fft import fft

# Carregar o arquivo CSV localizado em /content/Banco-de-Dados - Dados.csv
file_path = '/content/#2Banco-de-Dados - Dados.csv'
df = pd.read_csv(file_path)

# Supondo que as colunas sejam: Data (1ª), Aceleração x (2ª), Aceleração y (3ª), Aceleração z (4ª)
accel_x = df.iloc[:, 1].values # Coluna 2: Aceleração no eixo X
accel_y = df.iloc[:, 2].values # Coluna 3: Aceleração no eixo Y
accel_z = df.iloc[:, 3].values # Coluna 4: Aceleração no eixo Z

# Função para aplicar FFT e gerar gráficos de frequência com análise de falhas
def plot_fft_with_fault_analysis(signal, eixo, freq_fundamental, sampling_rate=1000):
    N = len(signal)
    T = 1.0 / sampling_rate # Intervalo de tempo entre as amostras (3 s)
    yf = fft(signal)
    xf = np.fft.fftfreq(N, T)[:N//2] # Frequências positivas
    spectrum = 2.0/N * np.abs(yf[:N//2])

    # Plot do espectro de frequências
    plt.figure(figsize=(10, 6))
    plt.plot(xf, spectrum, label=f"Espectro de Frequência - Eixo {eixo}")

    # Análise de falhas com base na frequência fundamental
    # 1. Desbalanceamento: Pico na frequência fundamental
    plt.axvline(x=freq_fundamental, color='r', linestyle='--', label="Desbalanceamento (Freq. Fundamental)")

    # 2. Desalinhamento: Picos em harmônicos (2x, 3x a frequência fundamental)
    harmonics = [2 * freq_fundamental, 3 * freq_fundamental, 4 * freq_fundamental]
    for harmonic in harmonics:
        plt.axvline(x=harmonic, color='g', linestyle='--', label=f"Desalinhamento (Harmônico {harmonic:.2f} Hz)")

    # 3. Falhas em rolamentos: Frequências de falhas típicas de rolamento (aproximadas)
    # Exemplo de cálculo de frequências de falha de rolamentos (valores aproximados)
    bpfi = 5 * freq_fundamental # Ball Pass Frequency Inner race (aprox.)
    bpfo = 3 * freq_fundamental # Ball Pass Frequency Outer race (aprox.)
    plt.axvline(x=bpfi, color='b', linestyle='--', label=f"Falha de Rolamento (BPFI {bpfi:.2f} Hz)")
    plt.axvline(x=bpfo, color='c', linestyle='--', label=f"Falha de Rolamento (BPFO {bpfo:.2f} Hz)")

    # Configurações do gráfico
    plt.title(f"Frequência e Análise de Falhas - Eixo {eixo}")
    plt.xlabel("Frequência (Hz)")
    plt.ylabel("Amplitude")
    plt.grid()
    plt.legend()
    plt.show()

# Taxa de amostragem em Hz
sampling_rate = 1000 # ou aproximadamente 1000 Hz

# Frequência de rotação do motor (ajuste de acordo com seu motor, exemplo: 60 Hz)
freq_fundamental = 60 # Frequência de rotação (em Hz), ajuste conforme necessário

# Aplicar FFT e análise de falhas para os eixos X, Y e Z

```

```
plot_fft_with_fault_analysis(accel_x, "X", freq_fundamental, sampling_rate)
plot_fft_with_fault_analysis(accel_y, "Y", freq_fundamental, sampling_rate)
plot_fft_with_fault_analysis(accel_z, "Z", freq_fundamental, sampling_rate)
```