

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RAFAEL GUSTAVO GRASSANI

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA A MANUTENÇÃO PREDITIVA
DE MOTORES ELÉTRICOS NA INDÚSTRIA HORSE DO BRASIL**

CURITIBA

2025

RAFAEL GUSTAVO GRASSANI

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA A MANUTENÇÃO PREDITIVA
DE MOTORES ELÉTRICOS NA INDÚSTRIA HORSE DO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis da Universidade Federal do Paraná como requisito à obtenção do grau de especialização em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Thiago José da Luz

CURITIBA

2025

Dedico este trabalho à minha família, aos meus amigos, e a todos os seres que me auxiliaram durante minha jornada de evolução até o presente momento

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao universo por possibilitar a experiência extraordinária de viver como um ser humano no planeta Terra. Agradeço aos meus pais, por terem me dado o dom da vida, e nunca terem medido esforços para proporcionar uma educação com princípios éticos e humanos, colaborando e orientando sempre da melhor forma possível quanto a minha formação acadêmica e profissional. Agradeço a todos os professores e mestres que contribuíram na minha jornada de conhecimento possibilitando o aprendizado necessário para a formação de uma base acadêmica sólida e concreta. Agradeço especialmente ao meu professor orientador, que me acolheu de braços abertos e contribuiu de forma crucial no desenvolvimento deste trabalho, possibilitando sempre novas perspectivas de aprendizado. Agradeço aos meus amigos, familiares, e todas pessoas que passaram pela minha vida, possibilitando uma constante evolução como ser humano.

RESUMO

A crescente demanda por sustentabilidade e pela racionalização do uso de recursos energéticos nas indústrias automotivas torna imprescindível a adoção de medidas de eficiência energética e gestão energética. No contexto da HORSE do Brasil, a fábrica de motores apresenta elevado consumo de energia, especialmente nas ilhas de fabricação e nos processos de testes, impactando diretamente os custos operacionais e a pegada ambiental da empresa. Este trabalho tem como objetivo analisar a eficiência energética aplicada à manutenção preditiva em motores elétricos, promovendo o uso eficiente dos recursos disponíveis e propondo soluções de monitoramento e controle utilizando tecnologias IoT (Internet das Coisas), de baixo custo e fácil implementação, que contribuam para a redução de desperdícios. Para isso, foi desenvolvido um dispositivo de monitoramento de consumo de energia elétrica e de condições operacionais de motores, utilizando sensores de corrente, vibração e temperatura integrados a microcontroladores com conectividade IoT, possibilitando o acompanhamento em tempo real dos parâmetros elétricos e mecânicos dos motores. Entre os resultados, destacam-se o baixo custo de implementação (R\$ 450,00, cerca de 90% inferior a soluções comerciais), erros de calibração dentro de limites aceitáveis (variação $<5\%$ para corrente e $<2^{\circ}\text{C}$ para temperatura), a identificação de padrões de vibração, temperatura e consumo, e a identificação de anomalias indicativas de desgaste. A validação em ambiente industrial demonstrou a viabilidade técnica e econômica do dispositivo, contribuindo para práticas de manutenção preditiva, otimização do uso de energia e alinhamento às diretrizes de eficiência energética.

Palavras-chaves: Eficiência Energética; Motores Elétricos; Manutenção Preditiva; IoT; Gestão Energética.

ABSTRACT

The increasing demand for sustainability and the rationalization of energy resource use in the automotive industries makes the adoption of energy efficiency and energy management measures essential. In the context of HORSE DO BRASIL, the motor manufacturing plant exhibits high energy consumption, especially in the manufacturing cells and testing processes, directly impacting operational costs and the company's environmental footprint. This work aims to analyze energy efficiency applied to predictive maintenance of electric motors, promoting the efficient use of available resources and proposing monitoring and control solutions using low-cost and easily implementable IoT (Internet of Things) technologies that contribute to waste reduction. To this end, a device for monitoring electrical energy consumption and operational conditions of motors was developed, utilizing current, vibration, and temperature sensors integrated with microcontrollers featuring IoT connectivity, enabling real-time monitoring of the motors' electrical and mechanical parameters. Among the results, the low implementation cost (R\$ 450.00, about 90% lower than commercial solutions), calibration errors within acceptable limits ($<5\%$ for current and $<2^{\circ}\text{C}$ for temperature), the identification of vibration, temperature, and consumption patterns, and the detection of anomalies indicative of wear stand out. The validation in an industrial environment demonstrated the technical and economic viability of the device, contributing to predictive maintenance practices, energy use optimization, and alignment with energy efficiency guidelines.

Key-words: Energy Efficiency; Electric Motors; Predictive Maintenance; IoT; Energy Management

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Motor Elétrico WEG	13
FIGURA 2 – Estrutura do Projeto	21
FIGURA 3 – Plataforma ESP32	22
FIGURA 4 – Módulo MPU6050	23
FIGURA 5 – Sensor de Corrente SCT-013	23
FIGURA 6 – Placa de Circuito Impresso	24
FIGURA 7 – Design Físico do Dispositivo	24
FIGURA 8 – Visão Global da Estrutura do Projeto	26
FIGURA 9 – Powertag Energy	38
FIGURA 10 – Weg Motor Scan	38
FIGURA 11 – Sensor IFM TS2229	38
FIGURA 12 – Sensor IFM VVB301	39
FIGURA 13 – Alicates amperímetro Fluke302+	39
FIGURA 14 – Vista Lateral do Dispositivo	40
FIGURA 15 – Vista Indicador de Carga	40
FIGURA 16 – Montagem do Sensor de Vibração e Temperatura	40
FIGURA 17 – Vista Sensor de Corrente Dispositivo	41
FIGURA 18 – Vista Sensor de Vibração e Temperatura	41
FIGURA 19 – Vista Dispositivo Completo	42
FIGURA 20 – Dispositivo Instalado em Campo	42
FIGURA 21 – Sensor de Vibração e Temperatura em Campo	42
FIGURA 22 – Sensores de corrente em campo	43
FIGURA 23 – Quadro de Acionamento Elétrico Blower	44
FIGURA 24 – Vista Geral aplicação em Campo	45
FIGURA 25 – Modem 4G/Wi-Fi	46
FIGURA 26 – Dashboard dados Globais	46
FIGURA 27 – Dashboard Vibração - Período de 4 dias	47
FIGURA 28 – Dashboard Vibração - Período de 4 minutos	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	9
1.2	OBJETIVOS	10
1.3	JUSTIFICATIVA	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1	PRINCÍPIOS DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	11
2.2	MOTORES ELÉTRICOS	12
2.3	MANUTENÇÃO PREDITIVA EM MOTORES ELÉTRICOS INDUSTRIAIS	15
2.4	ESTADO DA ARTE	16
2.5	SENSORES	19
2.6	ACELERÔMETRO	20
3	METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO	21
3.1	ESTRUTURA DO DISPOSITIVO	21
3.2	MICROCONTROLADOR	21
3.3	MÓDULO MPU6050	22
3.4	SENSOR DE CORRENTE STC-013	23
3.5	ETAPAS DO TRABALHO	24
4	RESULTADOS	26
4.1	VISÃO GLOBAL DA ESTRUTURA DO PROJETO	26
4.2	SISTEMA MICROCONTROLADO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	26
4.3	PLATAFORMA DE MONITORAMENTO EM TEMPO REAL	27
4.4	TESTES E CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO	27
4.5	APLICAÇÃO EM CAMPO - BLOWER PISO TÉCNICO LEV	28
4.6	ANÁLISE DE DADOS	28
4.7	COMENTÁRIOS FINAIS	29
5	CONCLUSÕES	31

REFERÊNCIAS	33
APÊNDICES	37
APÊNDICE A FIGURAS GERAIS	38
APÊNDICE B FIGURAS RESULTADOS	40
APÊNDICE C ACESSO AOS CÓDIGOS DO PROJETO	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A gestão energética em tempo real tem se tornado um desafio crítico para a indústria brasileira, sobretudo no setor automotivo, onde o consumo de energia é elevado e afeta diretamente os custos operacionais e a pegada ambiental das empresas (Santos; Lopes, 2020). Apesar da existência de tecnologias acessíveis e de fácil implementação, como microcontroladores de baixo custo Arduino, ESP32 e STM32, observa-se uma baixa adesão por parte das indústrias, possivelmente devido à falta de conhecimento técnico ou à ausência de diretrizes estruturadas (Silva, 2023).

Nas últimas décadas, a indústria passou por uma transformação significativa rumo à eficiência operacional e à sustentabilidade, impulsionada pelos conceitos da Indústria 4.0 e pela necessidade de atender critérios de ESG (Environmental, Social and Governance) (Ferreira *et al.*, 2020). No Brasil, esse processo ganha força em virtude do alto custo da energia elétrica e das exigências por redução de impactos ambientais (EPE, 2019).

A aplicação de tecnologias como Internet das Coisas (IoT) tem viabilizado práticas avançadas de monitoramento, controle e análise de dados em tempo real, promovendo melhorias expressivas em produtividade e eficiência energética (Santos; Cunha, 2021). Dispositivos embarcados com sensores eletrônicos — como sensores de corrente, vibração e temperatura — possibilitam a coleta contínua de dados críticos, fornecendo subsídios técnicos para manutenção preditiva, gestão energética e identificação de desperdícios (Sousa *et al.*, 2021).

Este trabalho concentra-se na planta de fabricação de motores da HORSE DO BRASIL, propondo o desenvolvimento e a implementação de uma solução de baixo custo baseada em IoT, voltada ao monitoramento do consumo energético e das condições operacionais dos motores elétricos. A proposta busca aliar tecnologia acessível à sustentabilidade industrial, contribuindo para a competitividade e modernização dos processos produtivos (Carvalho; Mendes, 2022).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a eficiência energética aplicada à manutenção preditiva de motores elétricos na planta da HORSE DO BRASIL, por meio do desenvolvimento e validação de um dispositivo eletrônico de monitoramento com tecnologias de baixo custo.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um sistema microcontrolado para aquisição de dados elétricos e mecânicos (corrente, vibração e temperatura) de motores elétricos industriais.
- Desenvolver uma plataforma para monitoramento em tempo real e registro histórico dos dados coletados.
- Realizar testes e calibração do dispositivo, avaliando sua aplicação em ambiente fabril e validando a eficácia das medições.

1.3 JUSTIFICATIVA

Este trabalho ganha relevância pela necessidade crítica de otimização energética na indústria automobilística, que concentra um consumo elevado de recursos em linhas de montagem e motores. A utilização de soluções de monitoramento baseados em dispositivos eletrônicos de monitoramento representa uma abordagem prática, de baixo custo e escalável para gerenciamento energético, alinhada a boas práticas de sustentabilidade. Soluções com monitoramento de baixo custo possibilitam rápida replicação e integração com plataformas de análise, promovendo ganho contínuo no controle de energia e confiabilidade industrial.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PRINCÍPIOS DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética é definida como a utilização racional da energia, buscando reduzir desperdícios e maximizar o aproveitamento energético nos processos produtivos, sem comprometer a qualidade dos serviços ou a produtividade (MME, 2022). Trata-se de um dos pilares para a sustentabilidade industrial, contribuindo diretamente para a redução dos custos operacionais e dos impactos ambientais, ao passo que diminui a demanda por recursos energéticos e emissões associadas (Gomes, R. F. *et al.*, 2021).

De acordo com Goldemberg (2018), eficiência energética significa "produzir mais com menos energia", sendo considerada uma das maneiras mais econômicas de suprir a demanda crescente por energia, principalmente em setores industriais que possuem processos com elevado consumo elétrico, como os de fabricação de motores e sistemas de automação industrial. Em complemento, Dias (2020) destaca que as medidas de eficiência energética podem reduzir o consumo de energia elétrica em até 30% em algumas indústrias, dependendo da modernização de equipamentos e da implementação de monitoramentos contínuos de consumo.

A necessidade de eficiência energética se intensifica diante do cenário global de transição energética e das pressões relacionadas às práticas de ESG (Environmental, Social and Governance), nas quais empresas são cada vez mais cobradas para reduzir sua pegada de carbono e adotar operações mais limpas (International Energy Agency, 2023). No Brasil, políticas públicas como o Programa de Eficiência Energética (PEE), regulamentado pela ANEEL, têm incentivado projetos focados em reduzir o consumo de energia no setor industrial (ANEEL, 2023).

Na indústria, a eficiência energética elétrica se relaciona com o uso de motores de alta eficiência, sistemas inteligentes, melhorias em sistemas de iluminação, além da gestão de cargas e da implementação de sistemas de monitoramento energético em tempo real (Pinto *et al.*, 2022). Esses sistemas permitem identificar pontos de consumo excessivo, ineficiências operacionais e perdas por harmônicos ou desequilíbrios de carga, possibilitando ações corretivas e preventivas (Souza; Gomes, 2019).

Além disso, tecnologias de Internet das Coisas (IoT) aplicadas em plantas industriais permitem maior granularidade no monitoramento de consumo, temperatura e vibração em motores e equipamentos, colaborando com a manutenção preditiva e evitando paradas não programadas que resultam em picos de consumo (Santos; Cunha, 2021). O uso de sensores inteligentes conectados a plataformas de análise em nuvem também é apontado como tendência para o aprimoramento da eficiência energética, integrando dados ao planejamento estratégico das empresas (Vasconcelos *et al.*, 2020). Nesse contexto, a incorporação de técnicas de Inteligência Artificial (IA) potencializa o valor dos dados coletados, permitindo a identificação de padrões de funcionamento, predição de falhas e otimização do desempenho energético. Essa integração entre IoT, IA e sistemas de monitoramento caracteriza um dos pilares da Indústria 4.0, em que a digitalização e a automação industrial promovem maior eficiência, confiabilidade e sustentabilidade nos processos produtivos (WEG, 2025).

Portanto, adotar práticas de eficiência energética no setor industrial não é apenas uma questão de redução de custos, mas um passo essencial para a competitividade e conformidade com os princípios ESG, possibilitando uma atuação ambientalmente responsável, socialmente justa e economicamente viável (Gomes, R. F. *et al.*, 2021). A busca pela eficiência energética contribui diretamente para a mitigação dos impactos ambientais, auxilia no combate às mudanças climáticas e fortalece a imagem institucional das empresas perante a sociedade.

2.2 MOTORES ELÉTRICOS

Os motores elétricos são dispositivos eletromecânicos responsáveis pela conversão de energia elétrica em energia mecânica, amplamente utilizados em processos industriais devido à sua robustez, confiabilidade e eficiência operacional. Segundo Mamede Filho (2023), os motores constituem a principal carga em plantas industriais, sendo aplicados em sistemas de bombeamento, ventilação, compressores e diversos processos de manufatura.

Estudos indicam que esses equipamentos são responsáveis por cerca de 68% do consumo de energia elétrica do setor industrial brasileiro, o que destaca sua relevância estratégica para programas de eficiência energética e redução de custos operacionais (EPE, 2019). A elevada participação dos motores na matriz de consumo

industrial reforça a importância de ações como a substituição por modelos de alto rendimento, dentre outras estratégias.

A vida útil média de um motor industrial é de aproximadamente 17 anos. Nesse contexto, a adoção de motores da classe IE3 (também chamados de motores “premium”) é recomendada por regulamentações nacionais e internacionais, visando aumentar o rendimento mínimo desses equipamentos e reduzir perdas energéticas. Essa medida é apoiada por estudos da ANEEL e da Eletrobras, demonstrando ganhos significativos em economia de energia e retorno econômico (Eletrobras, 2015). Na FIGURA 1 pode-se visualizar um exemplo de motor elétrico da fabricante WEG:

FIGURA 1 – Motor Elétrico WEG



Fonte: WEG (2025)

2.2.1 Monitoramento de Consumo

O consumo de energia em motores está diretamente ligado ao torque demandado pela carga e à eficiência do motor. Motores operando em subcarga apresentam baixo fator de potência e menor eficiência, enquanto sobrecargas podem elevar a temperatura e reduzir a vida útil (Brito *et al.*, 2019).

Em regime permanente, o consumo resulta de perdas no cobre (resistência dos enrolamentos), perdas no ferro (histerese e correntes parasitas), perdas mecânicas (atrito e ventilação) e perdas adicionais associadas a desalinhamentos ou desbalanceamentos. Monitorar o consumo permite otimizar o uso de energia e reduzir custos operacionais (PROCEL, 2020). A deterioração do rendimento do motor pode decorrer tanto do envelhecimento natural como de rebobinamentos mal executados. A realização de serviços inadequados podem ocasionar perdas de eficiência de 3% a 7,5% , impactando diretamente o consumo de energia e os custos operacionais (WEG, 2022),

o que reforça a importância do monitoramento do desempenho energético desses equipamentos.

2.2.2 Monitoramento de Condições

2.2.2.1 Vibração

A vibração é um dos principais indicadores de condição operacional e saúde do motor, podendo ser causada por desbalanceamentos, desalinhamentos, folgas mecânicas, falhas em rolamentos ou problemas elétricos, como desequilíbrio de fases (Mobley, 2002).

O monitoramento dos níveis e das frequências de vibração possibilita a detecção precoce de falhas, permitindo intervenções programadas e evitando paradas inesperadas, sendo fundamental para programas de manutenção preditiva.

2.2.2.2 Temperatura

A temperatura é um parâmetro crítico para a operação e a durabilidade dos motores elétricos, pois elevações excessivas podem reduzir a vida útil dos enrolamentos e componentes mecânicos, além de impactar negativamente na eficiência (Mobley, 2002). De acordo com o guia técnico da WEG (2024), um aumento de aproximadamente 10 °C na temperatura da isolação pode reduzir pela metade a vida útil do motor, devido ao envelhecimento acelerado do material isolante disponível na classe térmica do equipamento.

O monitoramento da temperatura é essencial para garantir o funcionamento seguro e eficiente dos motores. Sistemas que realizam o acompanhamento em tempo real da temperatura superficial dos motores, permitem a análise de tendências e a detecção precoce de sobreaquecimentos que podem indicar sobrecarga, falhas de ventilação ou problemas nos rolamentos (WEG, 2025). Essa prática auxilia no planejamento de paradas de manutenção e na redução de custos operacionais, alinhando-se às práticas de eficiência energética industrial.

2.3 MANUTENÇÃO PREDITIVA EM MOTORES ELÉTRICOS INDUSTRIAIS

A manutenção preditiva consiste em técnicas utilizadas para monitorar a condição operacional de máquinas e equipamentos, permitindo identificar falhas potenciais antes que ocorram paradas inesperadas ou danos graves, possibilitando intervenções programadas e aumento da disponibilidade operacional dos ativos (Mobley, 2002). Essa abordagem difere das manutenções corretivas e preventivas, pois utiliza dados em tempo real ou históricos para antecipar falhas, otimizando custos de manutenção e aumentando a confiabilidade do sistema produtivo (Silva; Oliveira, 2017).

A integração de estratégias de manutenção preditiva aos programas de eficiência energética torna-se relevante, visto que falhas nos motores podem ocasionar não apenas paradas imprevistas, mas também aumento no consumo energético devido ao funcionamento em condições degradadas (Ferreira *et al.*, 2020).

As principais técnicas utilizadas em manutenção preditiva de motores industriais incluem:

- **Análise de vibração:** Permite monitorar desequilíbrios, desalinhamentos e falhas em rolamentos, utilizando acelerômetros para coleta de dados de vibração em tempo real, possibilitando a análise de espectros de frequência para detecção precoce de falhas (Costa *et al.*, 2020).
- **Monitoramento de temperatura:** O aumento de temperatura em partes específicas do motor pode indicar problemas como sobrecarga, falha de ventilação ou desgaste de rolamentos, sendo possível utilizar sensores e termistores para monitoramento térmico (Almeida; Silva, 2018).
- **Análise de corrente elétrica:** Permite identificar alterações de carga e possíveis falhas no rotor, bem como problemas de isolamento, funcionando como uma ferramenta complementar à análise de vibração (Duarte; Santos, 2020).
- **Monitoramento contínuo via IoT:** A utilização de dispositivos como microcontroladores e sensores possibilita a coleta, transmissão e análise de dados de motores em nuvem, permitindo o acompanhamento em tempo real e a identificação de padrões que antecipem falhas (Sousa *et al.*, 2021).

A implementação da manutenção preditiva está alinhada aos conceitos de Indústria 4.0, a qual busca a digitalização e a automação dos processos industriais, integrando dados de sensores aos sistemas de gestão e possibilitando tomadas de decisão mais rápidas e precisas (Araújo *et al.*, 2019). Além disso, a manutenção preditiva conecta-se aos princípios de ESG (Environmental, Social and Governance) ao contribuir para a redução do consumo energético, prolongamento da vida útil dos equipamentos e minimização do impacto ambiental, aspectos essenciais para empresas comprometidas com a sustentabilidade e a eficiência em seus processos (Ferreira *et al.*, 2020).

Dessa forma, a manutenção preditiva em motores elétricos industriais, aliada ao monitoramento por IoT e às práticas de Indústria 4.0, representa uma ferramenta estratégica para a eficiência energética e a sustentabilidade industrial, alinhando-se às diretrizes de inovação tecnológica e responsabilidade socioambiental.

2.4 ESTADO DA ARTE

2.4.1 Tendências e desafios do uso de IoT para automação e gestão energética em plantas industriais

A IoT tem revolucionado a forma como plantas industriais monitoram e gerenciam seus processos energéticos. A capacidade de conectar sensores inteligentes, gateways e sistemas de análise de dados em tempo real permite a otimização do consumo, manutenção preditiva e tomada de decisão baseada em dados (Zhang *et al.*, 2020). Associada à IA, essa conectividade amplia ainda mais o potencial de análise, permitindo identificar padrões complexos, prever falhas e apoiar estratégias avançadas de eficiência energética dentro do contexto da Indústria 4.0.

O uso de microcontroladores de baixo custo e com capacidade de conexão Wi-Fi/Bluetooth, é uma solução bastante adotada para prototipagem de projetos industriais de pequeno a médio porte (Silva, 2023).

Além disso, a análise de vibração e temperatura por meio de sensores como acelerômetros e termistores contribui para a manutenção preditiva, evitando falhas e interrupções não programadas, melhorando a disponibilidade dos ativos e a eficiência operacional (Gomes, G. F. *et al.*, 2020).

2.4.2 Aplicações de Inteligência Artificial na Manutenção Preditiva

A Inteligência Artificial tem se consolidado como uma aliada estratégica na gestão energética e na manutenção preditiva de sistemas industriais. A partir da coleta de dados em tempo real — como corrente elétrica, temperatura e vibração — algoritmos de aprendizado de máquina (*machine learning*) são capazes de identificar padrões de comportamento, prever falhas e indicar desvios de desempenho antes que causem danos ou perdas significativas (TEB, 2025). Na literatura técnica, modelos de IA têm sido aplicados com sucesso em identificação de anomalias e previsão de falhas em motores elétricos (Barbosa *et al.*, 2022). Esses modelos são treinados com históricos de dados operacionais, rotulados com falhas conhecidas ou condições normais de funcionamento. A integração desses algoritmos com plataformas embarcadas e conectadas via IoT, como ESP32, permite que os dados captados pelos sensores sejam analisados localmente ou enviados para servidores na nuvem, onde modelos preditivos podem ser executados continuamente.

2.4.3 Dispositivos de Monitoramento de Consumo Elétrico e Condições

Monitoramento de Consumo Elétrico

Atualmente, existem diversas soluções comerciais disponíveis para medição e monitoramento do consumo elétrico em máquinas e motores, visando eficiência energética e controle operacional em ambientes industriais. Entre estas soluções, destacam-se os dispositivos da **Schneider Electric**, reconhecidos pela robustez e confiabilidade no mercado de gestão de energia (Schneider Electric, 2025).

Um exemplo é o **PowerTag Energy**, um sensor de medição de energia sem fio projetado para monitorar circuitos de máquinas e cargas individuais em tempo real (Schneider Electric, 2025). Os dados são transmitidos para plataformas de gestão de energia, facilitando a análise de consumo, identificação de desperdícios, alertas de consumo excessivo e ações de manutenção preditiva. Entre suas características, destacam-se: medição de corrente, tensão, potência, fator de potência e energia. Instalação em disjuntores e quadros elétricos existentes. Integração com sistemas de monitoramento remoto em nuvem. Alertas configuráveis para sobrecarga e anomalias operacionais. Esse equipamento tem um custo aproximado de R\$3.000 reais. No APÊNDICE A, na FIGURA 9 pode-se verificar o dispositivo.

Monitoramento de Condições

Com a crescente demanda por eficiência operacional e redução de paradas inesperadas, a **WEG** desenvolveu o **WEG Motor Scan**, um sensor de monitoramento de condições voltado para motores elétricos e outros equipamentos industriais, sendo uma solução robusta para manutenção preditiva em ambientes industriais (WEG, 2025).

O dispositivo realiza a medição de vibração triaxial, temperatura de superfície, tempo de funcionamento, rotação, carga estimada e frequência, enviando os dados via Bluetooth para dispositivos móveis ou via gateway para plataformas em nuvem, permitindo monitoramento em tempo real e análises históricas para identificação de tendências e falhas potenciais. O WEG Motor Scan integra-se ao *WEG Motion Fleet Management*, permitindo visualização centralizada, emissão de relatórios e utilização de inteligência artificial aplicada as configurações de alertas para condições fora dos padrões, como vibrações elevadas ou aumento de temperatura, auxiliando na tomada de decisões de manutenção preditiva.

Entre suas características, destacam-se: medição de vibração triaxial e temperatura superficial. Monitoramento de rotação, carga estimada e tempo de funcionamento. Comunicação via Bluetooth e Gateway para nuvem. Integração com a plataforma WEG Motion Fleet Management. Relatórios, alarmes e análise preditiva utilizando inteligência de dados. A adoção de dispositivos como o WEG Motor Scan reforça a importância do monitoramento contínuo de condições em motores, contribuindo para a melhoria da confiabilidade operacional, aumento da disponibilidade de máquinas e otimização do consumo energético, estando alinhado ao propósito deste estudo. Esse equipamento tem um custo aproximado de R\$5.000 reais. No APÊNDICE A, na FIGURA 10 pode-se observar o sensor WEG Motor Scan.

2.4.4 Microcontroladores

Para o desenvolvimento de dispositivos de monitoramento e automação industrial com conectividade IoT, diversos microcontroladores podem ser empregados. Os mais utilizados atualmente em projetos acadêmicos e industriais incluem o Arduino Uno, o ESP32 e o Raspberry Pi Pico, cada um com características específicas que influenciam diretamente na escolha conforme o objetivo do projeto.

O Arduino Uno é uma placa baseada no microcontrolador ATmega328P. Seu preço gira em torno de R\$ 60,00. De outro lado, o ESP32 é uma solução mais robusta e moderna, seu preço médio varia entre R\$ 35,00 e R\$ 50,00, sendo uma das opções com melhor custo-benefício do mercado. Já o Raspberry Pi Pico, baseado no chip RP2040, é indicado para aplicações que exigem maior controle de tempo real e capacidade de processamento intermediária, com preço em torno de R\$ 50,00.

A TABELA 1 apresenta um comparativo entre as principais características das placas mencionadas:

TABELA 1 – Comparativo entre microcontroladores

Modelo	Clock	RAM	Conectividade
Arduino Uno	16 MHz	2 kB	Nenhuma
ESP32	240 MHz (dual)	520 kB	Wi-Fi / Bluetooth
Raspberry Pi Pico	133 MHz	264 kB	Nenhuma (versão comum)

Fonte: O Autor (2025)

Um exemplo da aplicação de microcontroladores com conectividade IoT para monitoramento de consumo energético em contextos industriais é o trabalho de Soares (2021), desenvolvido na UFERSA. Esse TCC implementa um sistema com microcontrolador ESP32, sensores eletrônicos e transmissão via Wi-Fi para armazenamento e visualização em interface web, permitindo controle remoto de cargas e coleta de dados em tempo real.

2.5 SENSORES

Sensor de Corrente

Sensores de corrente são dispositivos utilizados para medir a intensidade da corrente elétrica em um condutor, sem a necessidade de interromper o circuito. Eles desempenham papel fundamental em sistemas de monitoramento e proteção de circuitos elétricos, permitindo a análise de consumo e a detecção de falhas em equipamentos e instalações (Lago, 2011). No APÊNDICE A, na FIGURA 13, pode-se observar um modelo de alicate amperímetro Fluke 302+, que atua como sensor de corrente. O custo desse equipamento é aproximadamente R\$ 400,00.

Sensor de Temperatura

Os sensores de temperatura são dispositivos utilizados para medir a quantidade de calor presente em um sistema, permitindo o monitoramento e controle de processos industriais, a prevenção de falhas e a análise de desempenho de máquinas, como motores elétricos. A temperatura é uma das variáveis mais importantes no monitoramento de condições, pois variações fora dos padrões podem indicar falhas iminentes ou condições de operação ineficientes.

No monitoramento de motores elétricos, os sensores de temperatura são utilizados para identificar situações de sobreaquecimento em rolamentos, bobinas e carcaças, que podem indicar falhas mecânicas, problemas de ventilação ou sobrecarga. O controle da temperatura contribui diretamente para a manutenção preditiva e para a extensão da vida útil do motor, permitindo intervenções planejadas antes que ocorram danos mais severos ao equipamento (Sensorex, 2021). No APÊNDICE A, na FIGURA 11 pode-se observar o modelo de sensor TS2229, com fixação tipo sonda, da fabricante IFM. Esse sensor tem um custo aproximado de R\$600,00.

2.6 ACELERÔMETRO

Os acelerômetros são sensores utilizados para medir a aceleração, isto é, a taxa de variação da velocidade em relação ao tempo, expressa no Sistema Internacional de Unidades (SI) em metros por segundo ao quadrado (m/s^2). São amplamente utilizados em diversas áreas, como monitoramento de vibração, controle de movimento e detecção de inclinação, além de aplicações em manutenção preditiva e eficiência energética em sistemas industriais.

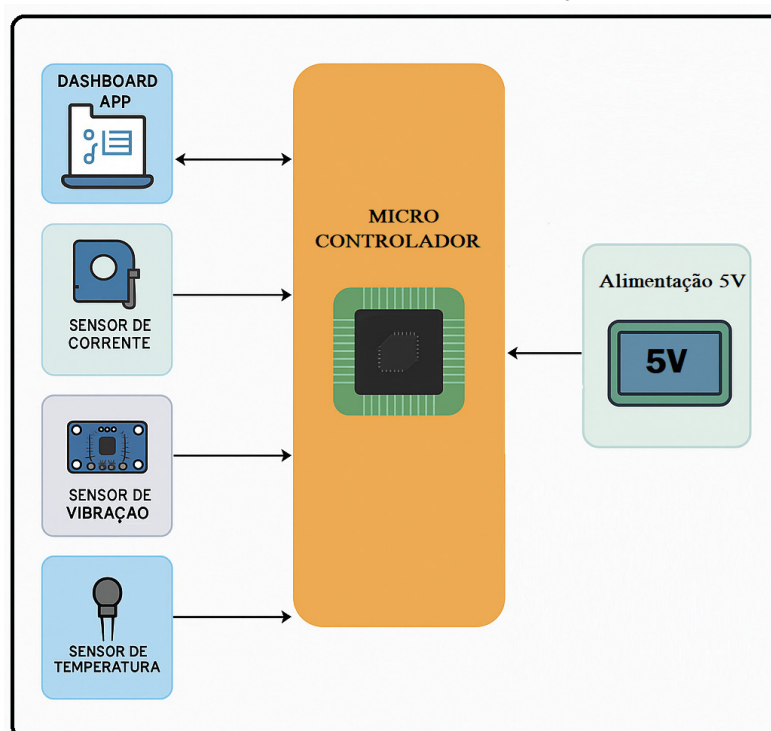
A utilização de acelerômetros triaxiais no monitoramento de vibrações em motores elétricos permite a detecção precoce de falhas, como desalinhamentos, desbalanceamentos e folgas em rolamentos. Isso impacta positivamente na confiabilidade dos equipamentos e na eficiência energética, permitindo a implementação de estratégias de manutenção preditiva em ambientes industriais (Nagel, 2022). No APÊNDICE A, na FIGURA 12 pode-se observar o modelo de sensor VVB301, triaxial, da fabricante IFM. Esse sensor tem um custo aproximado de R\$3.500,00.

3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

3.1 ESTRUTURA DO DISPOSITIVO

No diagrama de blocos da FIGURA 2, pode-se compreender o funcionamento do dispositivo. O sistema será equipado com um microcontrolador robusto que irá realizar a aquisição e processamento dos dados, sensores de corrente para medição de consumo, um sensor de vibração para captação da vibração mecânica, um sensor de temperatura para monitoramento térmico, e por fim um sistema dashboard para visualização de dados remotamente.

FIGURA 2 – Estrutura do Projeto



Fonte: O Autor (2025)

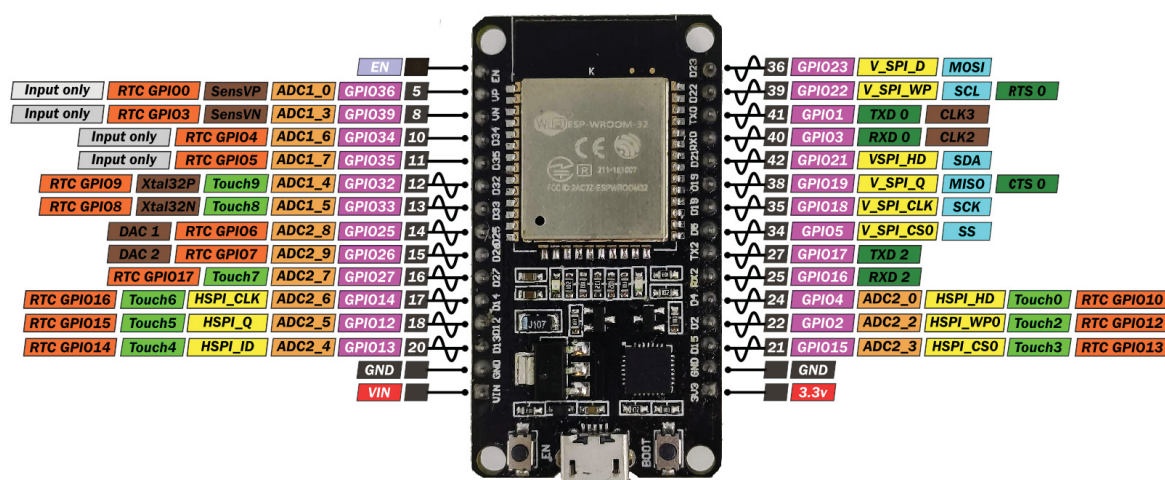
3.2 MICROCONTROLADOR

Levando em consideração o objetivo principal do projeto, foi realizada uma análise de microcontroladores disponíveis no mercado, visando uma solução que ao mesmo tempo fornecesse uma gama de funcionalidades e fosse compacto. O crucial para a decisão foi a disponibilidade de comunicações embarcadas, custo e tamanho. Assim, optou-se pela escolha do do microcontrolador ESP32 (Modelo WROOM-32), o qual fornece todos os requisitos necessários para o projeto do dispositivo.

Plataforma ESP32

O ESP32 é um microcontrolador desenvolvido pela empresa *Espressif*, que possui comunicação Wi-Fi e Bluetooth integrada, processador *Dual Core*, alguns sensores embutidos e diversos pinos de I/O (Espressif, 2024). A plataforma ESP32 DEV KIT, permite versatilidade e flexibilidade na conexão de circuitos e na programação do microcontrolador, através de comunicação USB. Na FIGURA 3, pode-se verificar a plataforma com sua pinagem e informações.

FIGURA 3 – Plataforma ESP32



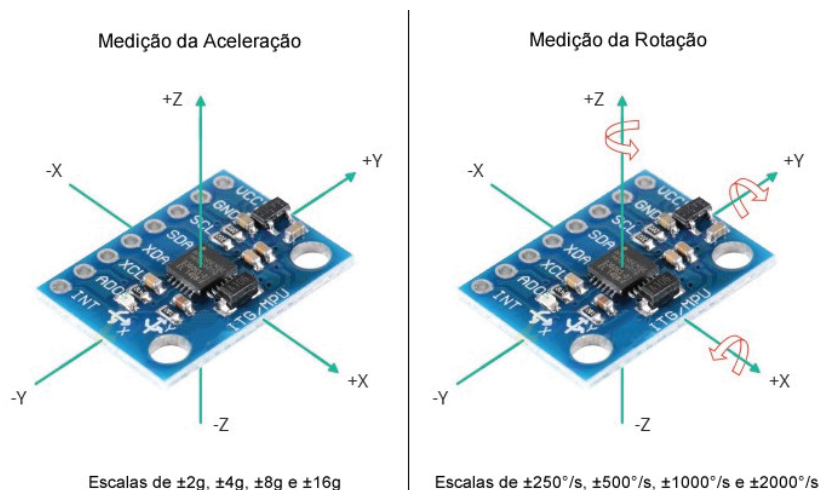
Fonte: Tutorials (2025)

3.3 MÓDULO MPU6050

Visando o monitoramento de vibração e temperatura de motores elétricos na planta, foi realizada a análise de sensores disponíveis no mercado, com foco em custo, precisão e facilidade de integração com microcontroladores. Para este projeto, optou-se pelo sensor MPU6050, que combina acelerômetro e sensor de temperatura em um único módulo, permitindo medições em três eixos com alta sensibilidade.

O MPU6050 é um sensor desenvolvido pela *InvenSense*, integrando um acelerômetro de três eixos e um sensor de temperatura, permitindo medições precisas de aceleração e temperatura (InvenSense, 2023). Sua comunicação ocorre via protocolo I2C, facilitando a integração com o ESP32 e demais microcontroladores. Na FIGURA 4, observa-se o módulo MPU6050 com seus pinos de conexão. Esse sensor tem um custo aproximado de R\$30,00.

FIGURA 4 – Módulo MPU6050



Fonte: UsinaInfo (2025)

3.4 SENSOR DE CORRENTE SCT-013

O SCT-013 é um transformador de corrente tipo *split core* (núcleo dividido), que permite ser acoplado ao redor de um condutor sem desconectar o circuito, realizando medições de corrente alternada na faixa de 0 a 100A de forma segura e precisa (Yuanxing, 2025). Sua saída analógica é proporcional à corrente medida, facilitando a leitura e o processamento pelo microcontrolador ESP32. A FIGURA 5 mostra o sensor SCT-013 com detalhes de sua estrutura física. Esse sensor tem um custo aproximado de R\$60,00.

FIGURA 5 – Sensor de Corrente SCT-013



Fonte: Yuanxing (2025)

3.5 ETAPAS DO TRABALHO

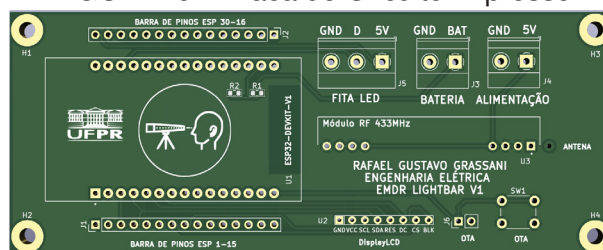
O desenvolvimento deste estudo será estruturado em quatro etapas principais, em consonância com os objetivos específicos estabelecidos:

3.5.1 Desenvolvimento do sistema microcontrolado

Nesta etapa será realizado o projeto e a implementação de um dispositivo baseado em microcontrolador ESP32 para aquisição de dados elétricos e mecânicos. Serão integrados 3 sensores de corrente SCT-013 (para monitoramento de corrente trifásico) e um módulo MPU6050 (para aquisição da vibração e temperatura), de modo a viabilizar a coleta contínua de informações relevantes para a análise de eficiência energética e manutenção preditiva.

Para a construção do hardware foi utilizada uma estrutura proveniente de um TCC anterior do curso de Engenharia Elétrica. A placa de circuito impresso foi projetada e industrializada com o objetivo de contemplar a conexão do microcontrolador com os sensores e demais periféricos. Na FIGURA 6, pode-se verificar o projeto da PCB:

FIGURA 6 – Placa de Circuito Impresso



Fonte: O Autor (2025)

O design físico do dispositivo foi projetado em um software de modelagem e produzido com uma impressora 3D. Na FIGURA 7, pode-se verificar o projeto do invólucro físico:

FIGURA 7 – Design Físico do Dispositivo



Fonte: O Autor (2025)

3.5.2 Implementação da plataforma de monitoramento

Após a etapa de hardware, será implementada uma plataforma dashboard para monitoramento em tempo real e registro histórico dos dados. Essa plataforma permitirá a visualização dos parâmetros de operação, além de disponibilizar indicadores de desempenho energético e condições operacionais dos motores elétricos. Como o objetivo principal desse trabalho é validar o dispositivo de monitoramento, será utilizada uma plataforma de IoT existente no mercado, com disponibilidade gratuita limitada. Após pesquisas e testes realizados com algumas plataformas disponíveis, optou-se por utilizar a Ubidots®, que é uma plataforma com foco em Indústria 4.0, integração com dispositivos IoT e análise de dados em tempo real. A Ubidots permite o tráfego de dados por meio da internet via protocolo MQTT, com funcionalidades muito interessantes, como por exemplo a criação de dashboards interativas, armazenamento de dados, gerenciamento de alertas com notificação por email, entre outras.

3.5.3 Testes e calibração do dispositivo

O protótipo será submetido a testes em ambiente fabril, em condições controladas e reais de operação, visando validar a confiabilidade e a precisão das medições. Serão realizados procedimentos de calibração dos sensores e verificação da robustez do sistema de aquisição de dados.

3.5.4 Análise e validação dos dados

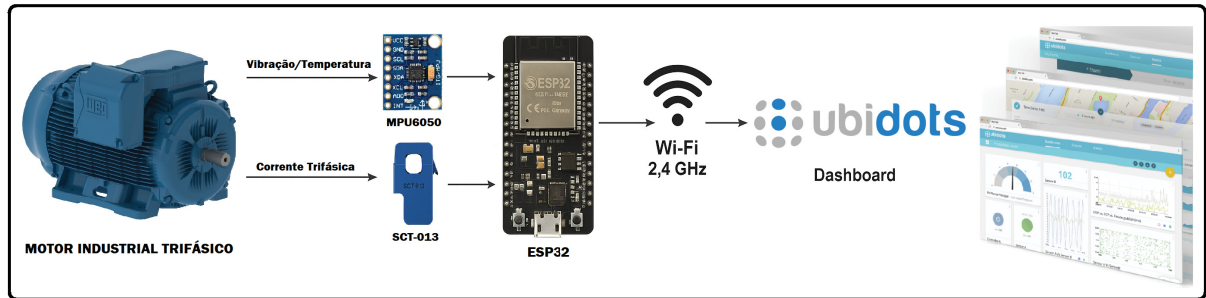
Com base nos dados coletados e processados, será conduzida uma análise crítica, identificando padrões de consumo, anomalias de funcionamento e oportunidades de economia de energia. A partir dessa análise, serão propostas diretrizes alinhadas à manutenção preditiva e eficiência energética.

4 RESULTADOS

4.1 VISÃO GLOBAL DA ESTRUTURA DO PROJETO

No diagrama de blocos da FIGURA 8, pode-se verificar uma visão global do dispositivo

FIGURA 8 – Visão Global da Estrutura do Projeto



Fonte: O Autor (2025)

4.2 SISTEMA MICROCONTROLADO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema desenvolvido foi baseado no microcontrolador **ESP32**, escolhido pela sua conectividade Wi-Fi integrada e capacidade de processamento adequada para aplicações de IoT. Foram integrados dois sensores principais: **SCT-013** para medição da corrente elétrica dos motores e **MPU6050**, utilizado para coleta simultânea de dados de vibração (aceleração nos três eixos) e de temperatura. O custo aproximado do protótipo foi de **R\$ 450,00**, incluindo microcontrolador, sensores e periféricos de montagem. A TABELA 2 apresenta os custos do desenvolvimento:

TABELA 2 – Custos do Desenvolvimento

Item	Modelo	Quantidade	Custo Total
Microcontrolador	ESP32-WROOM	1	R\$50,00
Sensor de Corrente	SCT-013	3	R\$180,00
Acelerômetro	MPU-6050	1	R\$30,00
Invólucro 3D	Personalizado	1	R\$30,00
Conectores	Diversos	4	R\$20,00
PBC Industrializada	Personalizado	1	R\$100,00
Outros	Diversos	1	R\$40,00

Fonte: O Autor (2025)

4.3 PLATAFORMA DE MONITORAMENTO EM TEMPO REAL

Foi implementada a configuração de uma plataforma de monitoramento em tempo real, a Ubidots®. A partir de transmissão de dados via Wi-Fi, o ESP32 envia os dados por protocolo MQTT, possibilitando visualização em tempo real das variáveis elétricas e mecânicas. Os testes mostraram que:

- A comunicação entre sensores e ESP32 foi estável, com taxa de atualização de 1s, suficiente para acompanhamento contínuo;
- O sistema registrou adequadamente variações de corrente em diferentes condições de operação do motor;
- A temperatura lida pelo MPU6050 apresentou resposta coerente às mudanças térmicas do ambiente e do motor;
- As leituras de vibração mostraram consistência, permitindo identificar padrões básicos de funcionamento.

A estabilidade e a responsividade confirmam que a plataforma pode ser utilizada como base para monitoramento contínuo em ambiente fabril.

4.4 TESTES E CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO

Foram realizados ensaios comparativos para validar a confiabilidade das medições:

- **Corrente elétrica:** o sensor SCT-013 foi comparado ao alicate amperímetro, apresentando divergência média inferior a 5%;
- **Temperatura:** as medições do MPU6050 foram comparadas ao termômetro digital externo, com variação média inferior a 2 °C;
- **Vibração:** o MPU6050 registrou acelerações nos três eixos, demonstrando potencial para análises futuras em frequência utilizando FFT (Transformada Rápida de Fourier).

4.5 APLICAÇÃO EM CAMPO - BLOWER PISO TÉCNICO LEV

Para validação do dispositivo foi realizado um estudo de aplicação em campo, no motor elétrico do exaustor (Blower) do LEV (Laboratório de Emissões Veiculares) no departamento Testing da HORSE do Brasil. O Blower é um equipamento que fica ligado praticamente de forma ininterrupta, sendo considerado um motor crítico na operação de exaustão do laboratório. A instalação no Blower foi escolhida por permitir o acoplamento dos sensores de corrente nos condutores dentro do quadro de acionamento elétrico, que se localiza muito próximo ao motor, o que facilitou a instalação.

4.6 ANÁLISE DE DADOS

4.6.1 Corrente e Equilíbrio de Fases

As medições indicaram equilíbrio entre as fases, com correntes em torno de $I_a \approx I_b \approx I_c \approx 19 \text{ A}$, sem assimetria relevante. Para análise de desempenho, utilizou-se como referência o valor de placa do motor, cuja corrente nominal é de aproximadamente 20 A, e a potência nominal é de aproximadamente 13 kW.

A comparação entre a corrente medida e a corrente nominal de placa mostrou proximidade adequada, indicando que o motor opera dentro do regime esperado. Esse resultado evidencia que o equipamento não se encontra nem em subdimensionamento (sobrecorrente) nem em sobredimensionamento (corrente abaixo do previsto para a carga). Assim, a condição de operação pode ser considerada normal e compatível com a especificação do fabricante.

4.6.2 Estimativa de Consumo de Energia

Sob operação contínua (24 h), a energia diária estimada é

$$E_{\text{dia}} = 13 \text{ kW} \times 24 \text{ h} = 312 \text{ kWh.}$$

Em um mês de 30 dias, obtém-se

$$E_{30\text{d}} = 312 \text{ kWh/dia} \times 30 = 9.360 \text{ kWh.}$$

4.6.3 Temperatura Operacional

A temperatura de operação observada do conjunto manteve-se entre 25°C e 30°C, estável ao longo do período monitorado. Esse intervalo encontra-se amplamente dentro das condições de projeto para motores industriais, que assumem tipicamente *ambiente* de até 40°C. Assim, as leituras registradas indicam operação térmica confortável e sem risco para a integridade do equipamento.

4.6.4 Síntese e Estratégia de Alertas

Com base nas grandezas monitoradas (corrente trifásica, vibração e temperatura), é possível estabelecer uma estratégia de operação com alertas automáticos:

- **Desequilíbrio de corrente:** alerta se % de desequilíbrio entre fases $> 10\%$ (indicativo de anomalia de carga ou conexão).
- **Sobrecorrente:** alerta por limiar absoluto (p. ex., $I > 22\text{ A}$ por mais de N segundos)
- **Consumo:** alerta por consumo diário acima da meta (p. ex., $> 320\text{ kWh/dia}$) ou por perfil atípico.
- **Temperatura:** alerta se T exceder faixa operacional definida (p. ex., $> 40^\circ\text{C}$, ou aumento súbito ΔT em curto intervalo).
- **Vibração:** alerta de aceleração acima do valores padrão de qualquer eixo ou por frequência anômala quando FFT for incorporada.

Essa configuração de alertas, associada aos *dashboards* e históricos, permite intervenções proativas (manutenção preditiva), evitando degradação de desempenho, perdas energéticas e paradas não programadas.

4.7 COMENTÁRIOS FINAIS

Durante o processo de desenvolvimento, algumas dificuldades foram encontradas, como por exemplo intermitências ocasionais na conexão Wi-Fi em ambiente industrial, e dificuldade de acesso às redes industriais. Diante disso, a solução encontrada para contornar esse problema, foi a instalação de um modem 4G/Wi-Fi, com

utilização de chip de dados móveis. Em relação ao dispositivo, um módulo de baterias de lítio foi reutilizado do projeto anterior, o que poderia fornecer dois dias de autonomia de funcionamento para o dispositivo. No entanto, como os testes em campo duraram cerca de duas semanas, foi instalado uma fonte 5V para alimentação contínua do dispositivo.

A Ubidots possui um período de utilização gratuito de 30 dias, após isso é necessário assinar uma mensalidade de aproximadamente R\$ 500,00. Existe a possibilidade de um desenvolvimento de uma solução própria, no entanto demandaria mais tempo hábil de implementação. Apesar desses desafios, o protótipo demonstrou viabilidade técnica e econômica como alternativa de baixo custo para monitoramento de motores elétricos, apresentando um custo de R\$ 450,00, cerca de 90% inferior a soluções comerciais. Este valor demonstra a viabilidade da solução de baixo custo quando comparada a dispositivos comerciais como o *WEG Motor Scan* ou o *Schneider PowerTag*, que apresentam preços significativamente superiores. Relembrando, ainda, que o dispositivo engloba tecnologias de medições de dois tipos de sistemas diferentes, um deles sendo o monitoramento de condições (temperatura e vibração), e o outro o monitoramento de consumo (corrente elétrica), o que torna o dispositivo ainda mais competitivo e eficiente. Os resultados confirmam que o dispositivo é capaz de fornecer medições confiáveis para aplicações iniciais de eficiência energética e manutenção preditiva.

Todas as figuras referentes aos resultados do projeto e aplicações em campo podem ser encontradas no APÊNDICE B.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo analisar a aplicação da eficiência energética em conjunto com a manutenção preditiva de motores elétricos na planta da HORSE do Brasil, por meio do desenvolvimento de um dispositivo de monitoramento baseado em tecnologias de baixo custo. Os resultados obtidos demonstraram que o protótipo atendeu plenamente aos objetivos propostos, apresentando desempenho satisfatório em ambiente fabril.

O sistema microcontrolado foi capaz de coletar dados elétricos e mecânicos de forma consistente, com custo total de aproximadamente R\$ 450,00. Esse valor representa uma economia de cerca de 90% em relação a soluções comerciais como o WEG Motor Scan (R\$ 5.000,00) ou o PowerTag Energy da Schneider (R\$ 3.000,00). A plataforma de monitoramento em tempo real funcionou de maneira estável, permitindo acompanhamento contínuo das variáveis monitoradas via protocolo MQTT, evidenciando a viabilidade de se utilizar soluções acessíveis em contextos industriais.

Os testes de calibração mostraram resultados satisfatórios: a corrente elétrica medida pelo sensor SCT-013 apresentou divergência média inferior a 5% quando comparada a um alicate amperímetro de referência, enquanto a temperatura medida pelo MPU6050 apresentou variação inferior a 2 °C em relação a um termômetro digital. Esses valores confirmam a confiabilidade do sistema para aplicações iniciais de manutenção preditiva e análise de eficiência energética.

Em relação à operação do motor analisado (19A por fase em 380V, com potência próxima de 13 kW), os resultados demonstraram equilíbrio entre fases e consumo diário da ordem de 312 kWh em regime contínuo, reforçando a aplicabilidade prática do dispositivo em monitoramentos prolongados.

Do ponto de vista prático, o dispositivo evidencia que é possível utilizar soluções IoT de baixo custo para apoiar estratégias de eficiência energética em ambientes industriais. Ainda que em fase inicial, o sistema já se mostra promissor para auxiliar na detecção de anomalias de operação, apoiar decisões de manutenção e fornecer subsídios para otimização energética. Entretanto, também foram identificadas limitações, como instabilidades ocasionais da rede Wi-Fi industrial, necessidade de calibração mais refinada em condições severas e restrições do plano gratuito da plataforma Ubidots.

Além do foco em manutenção e eficiência energética, destaca-se que a mensuração contínua de consumo e desempenho de motores também pode servir como ferramenta de apoio estratégico à gestão industrial. A partir dos dados obtidos, torna-se possível calcular o consumo de energia por produto ou peça produzida, permitindo avaliar a rentabilidade de processos específicos e identificar gargalos energéticos. Da mesma forma, o monitoramento viabiliza práticas de benchmarking: motores de mesma potência e função podem ter seus desempenhos comparados, apontando desvios que merecem investigação, enquanto diferentes plantas produtivas podem ser avaliadas entre si quanto ao consumo para fabricação do mesmo produto. Dessa forma, mesmo sem o emprego imediato de técnicas de Inteligência Artificial, o sistema já oferece subsídios valiosos para decisões operacionais e estratégicas, ampliando seu impacto para além da manutenção preditiva e contribuindo para a competitividade industrial.

A adoção de um dispositivo de monitoramento industrial pode incentivar maior consciência sobre o uso da energia e fortalecer a integração entre áreas técnicas e estratégicas. Além de apoiar a manutenção de ativos, a tecnologia permite gerar relatórios gerenciais, indicadores de eficiência e comparações entre setores, linhas de produção ou até mesmo diferentes fábricas. Dessa forma, pode contribuir para programas de certificação energética, conformidade com a ISO 50001 e práticas de ESG, consolidando a imagem corporativa perante clientes, acionistas e sociedade.

Como encaminhamentos futuros, recomenda-se ampliar os testes em diferentes tipos e potências de motores, implementar algoritmos de análise no domínio da frequência (FFT), explorar técnicas de Inteligência Artificial para detecção automática de falhas e alertas de manutenção, bem como integrar o sistema a plataformas industriais (SCADA). Tais avanços podem potencializar a gestão energética em tempo real e a confiabilidade dos ativos, inserindo o dispositivo em um patamar ainda mais estratégico dentro da Indústria 4.0.

Conclui-se, portanto, que a solução proposta representa uma alternativa viável, escalável e de grande relevância para empresas que buscam reduzir custos operacionais, otimizar consumo energético e prolongar a vida útil de motores elétricos. Mais do que isso, trata-se de uma ferramenta que alia inovação tecnológica, eficiência e sustentabilidade, reforçando o compromisso da indústria com práticas de produção mais inteligente, eficiente e responsável.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. S.; SILVA, M. R. Técnicas de monitoramento térmico em motores elétricos de indução. **Revista Científica da FATEC**, v. 8, n. 2, p. 23–30, 2018.

ANEEL. **Programa de Eficiência Energética – PEE**. Brasília, Brasil: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2023. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/pee>. Acesso em: 28 jun. 2025.

ARAÚJO, R. F.; MARTINS, R. A.; SANTOS, L. H. Relação entre manutenção preditiva e eficiência energética em motores elétricos industriais. **Revista Brasileira de Engenharia de Produção**, v. 19, n. 3, p. 45–53, 2019.

BARBOSA, Felipe A.; SOUZA, Ricardo H.; CARDOSO, Antonio J. M. Predictive maintenance using machine learning applied to electric motors: A review. **Journal of Intelligent Fuzzy Systems**, v. 42, n. 3, p. 3095–3107, 2022.

BRITO, M. A. F.; SILVA, J. F.; CARVALHO, L. F. **Eficiência Energética em Sistemas Motrizes**. Rio de Janeiro: Interciência, 2019.

CARVALHO, André Luiz; MENDES, Geraldo. Implementação da ISO 50001 como ferramenta de gestão de energia em indústrias brasileiras. **Revista Brasileira de Energia**, v. 28, n. 1, p. 85–98, 2022. Acesso em: 29 jun. 2025. Disponível em: <https://www.rbe.org.br/article/view/iso-50001>.

COSTA, J. L.; MENDES, A. C.; LIMA, T. S. Análise de vibração como ferramenta para manutenção preditiva em motores elétricos. **Encontro Nacional de Engenharia e Tecnologia**, 2020.

DIAS, L. A. **Eficiência Energética em Sistemas Industriais**. 2. ed. São Paulo, Brasil: Blucher, 2020.

DUARTE, P. C.; SANTOS, H. G. Análise de corrente elétrica aplicada à manutenção preditiva de motores industriais. **Revista Técnica de Engenharia**, v. 6, n. 1, p. 12–20, 2020.

ELETROBRAS. **Estudo de Impacto Regulatório sobre motores da classe IR3**. Rio de Janeiro, 2015.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2019.

ESPRESSIF. **ESP32 Series Datasheet**. 2024. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 4 jul. 2025.

FERREIRA, J. P.; SILVA, A. M.; OLIVEIRA, D. P. Eficiência energética e manutenção preditiva em sistemas motrizes. **Revista Brasileira de Engenharia Industrial**, v. 14, n. 1, p. 33–42, 2020.

FLUKE. **Fluke 302+**. Acesso em: 30 jul. 2025. 2025. Disponível em: <https://www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/alicates-amperímetros/fluke-302-plus>.

GOLDEMBERG, José. **Energia: o estado e o setor privado**. São Paulo, Brasil: EDUSP, 2018.

GOMES, G. F. *et al.* A systematic review of the use of machine learning in the analysis of vibration signals for fault diagnosis. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 138, 2020.

GOMES, R. F.; LIMA, V. P.; OLIVEIRA, T. S. Eficiência energética e ESG: uma análise da indústria brasileira. **Revista Brasileira de Energia**, v. 27, n. 2, p. 115–130, 2021.

IFM. **IFM TS2229 - Sensor de temperatura com cabo e sonda de contato**. Acesso em: 30 jul. 2025. 2025. Disponível em: <https://www.ifm.com/br/pt/product/TS2239>.

IFM. **Sensor de Vibração IFM VVB301**. Acesso em: 30 jul. 2025. 2025. Disponível em: <https://www.ifm.com/br/pt/product/VVB301>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Efficiency 2023: Analysis and Outlook to 2030**. Paris, França: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>. Acesso em: 28 jun. 2025.

INVENSENSE, TDK. **MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4**. 2023. Disponível em: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2025.

LAGO, João L. **Instrumentação Eletrônica**. São Paulo, Brasil: Érica, 2011.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2023.

MME. **Política Nacional de Eficiência Energética**. Brasília, Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2022. Disponível em:

<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/politica-energetica/politica-nacional-de-eficiencia-energetica>. Acesso em: 28 jun. 2025.

MOBLEY, R. K. **An Introduction to Predictive Maintenance**. 2. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2002.

NAGEL, David. **Sensors and Actuators in Mechatronics**. New York: Springer, 2022.

PINTO, J. R.; SOUZA, A. P.; MOURA, F. S. Eficiência energética aplicada à indústria 4.0: desafios e oportunidades. **Revista de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 9, n. 1, p. 45–59, 2022.

PROCEL. **Guia de Eficiência Energética em Motores Elétricos**. Rio de Janeiro, 2020.

SANTOS, Bruno A.; LOPES, Maria E. Eficiência energética na indústria brasileira: avanços e desafios. **Revista Brasileira de Energia**, v. 26, n. 1, p. 43–55, 2020. Acesso em: 29 jun. 2025. Disponível em: <https://www.rbe.org.br/article/view/eficiencia-energetica-industria>.

SANTOS, M. G.; CUNHA, A. R. IoT e eficiência energética: o uso de sensores inteligentes na indústria. **Caderno de Tecnologia Aplicada**, v. 5, n. 1, p. 12–25, 2021.

SCHNEIDER ELECTRIC. **PowerTag Energy – Wireless energy sensor**. Acesso em: 30 jun. 2025. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/product-range/63626-powerlogic-powertag/>.

SENSOREX. **Sensor Technology Handbook**. Amsterdam: Elsevier, 2021.

SILVA, P. R.; OLIVEIRA, L. A. Manutenção Preditiva: Conceitos e Aplicações em Ambientes Industriais. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 12, p. 125–142, 2017.

SILVA, Tiago R. Aplicações de IoT com ESP32 em ambientes industriais: monitoramento e controle de energia. **Revista Tecnologia em Foco**, v. 11, n. 2, p. 77–89, 2023. Acesso em: 29 jun. 2025. Disponível em: <https://www.tecfoco.org/article/view/iot-esp32-industrial>.

SOARES, Esdras de Sousa. **Desenvolvimento de medidor de energia de baixo custo aplicado à Internet das Coisas utilizando ESP-32**. [S. l.: s. n.], 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Caraúbas. Disponível em:

<https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/9491>. Acesso em: 29 jul. 2025.

SOUSA, G. F.; COSTA, R. C.; MENEZES, V. P. IoT no monitoramento de motores industriais: uma aplicação com ESP32 e SCT-013. **Revista de Engenharia e Tecnologia Aplicada**, v. 4, n. 1, p. 58–66, 2021.

SOUZA, E. P.; GOMES, F. T. Monitoramento de energia elétrica e eficiência energética industrial. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica**, v. 11, n. 2, p. 88–99, 2019.

TEB. **O papel da inteligência artificial na manutenção industrial**. Acesso em: 23 ago. 2025. 2025. Disponível em: <https://www.tebmanutencao.com.br/blog/engenharia-de-manutencao/o-papel-da-inteligencia-artificial-na-manutencao-industrial>.

TUTORIALS, Random Nerd. **ESP32 Pinout Reference: Which GPIO pins should you use?** 2025. Disponível em: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-pinout-reference-gpios/>. Acesso em: 4 jul. 2025.

USINAINFO. **Acelerômetro e Giroscópio MPU-6050**. 2025. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br>. Acesso em: 4 jul. 2025.

VASCONCELOS, L. R.; ALMEIDA, J. F.; MENEZES, S. B. Estratégias de eficiência energética e gestão de energia em indústrias. **Revista Brasileira de Energia Renovável**, v. 9, n. 3, p. 77–90, 2020.

WEG. **Gestão Eficiente da Energia Elétrica**. Jaraguá do Sul: [s. n.], 2022. <https://static.weg.net>. Acesso em: 24 jul. 2025.

WEG. **Guia de Especificação de Motores Elétricos**. Jaraguá do Sul: [s. n.], 2024. <https://static.weg.net>. Acesso em: 24 jul. 2025.

WEG. **WEG Motor Scan e Soluções de Monitoramento**. Acesso em: 29 jun. 2025. 2025. Disponível em: <https://www.weg.net/institutional/BR/pt/digital-solutions/solutions/wegmotorscan>.

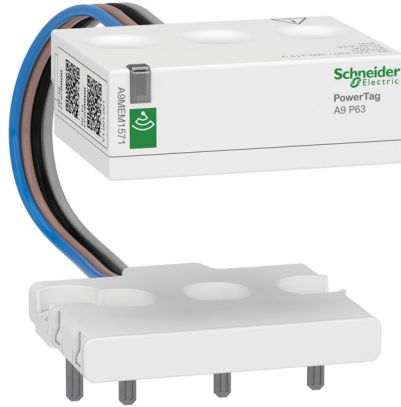
YUANXING. **Clamp-On Current Transformers**. Acesso em: 1 jul. 2025. 2025. Disponível em: <https://www.yuanxing.net>.

ZHANG, Yu *et al.* Industrial Internet of Things (IIoT): A review of enabling technologies, applications, and open research issues. **IEEE Access**, v. 8, p. 219744–219770, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3041953.

APÊNDICES

APÊNDICE A – FIGURAS GERAIS

FIGURA 9 – Powertag Energy



Fonte: Schneider Electric (2025)

FIGURA 10 – Weg Motor Scan



Fonte: WEG (2025)

FIGURA 11 – Sensor IFM TS2229



Fonte: (IFM, 2025a)

FIGURA 12 – Sensor IFM VVB301



Fonte: (IFM, 2025b)

FIGURA 13 – Alicate amperímetro Fluke302+



Fonte: Fluke (2025)

APÊNDICE B – FIGURAS RESULTADOS

FIGURA 14 – Vista Lateral do Dispositivo



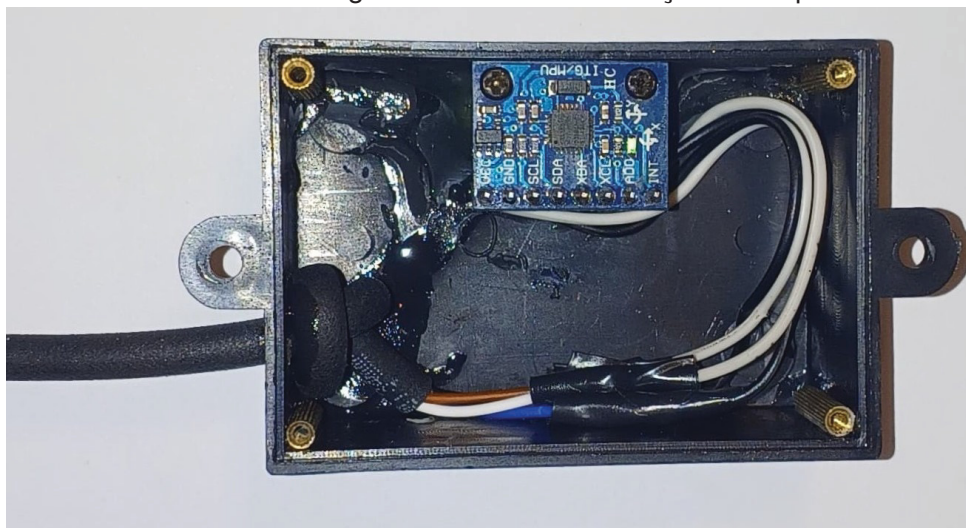
Fonte: O Autor (2025)

FIGURA 15 – Vista Indicador de Carga



Fonte: O Autor (2025)

FIGURA 16 – Montagem do Sensor de Vibração e Temperatura



Fonte: O Autor (2025)

FIGURA 17 – Vista Sensor de Corrente Dispositivo



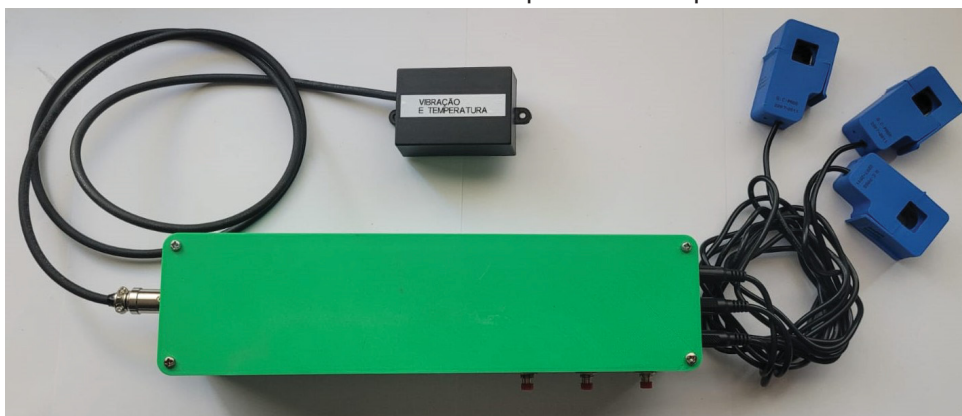
Fonte: O Autor (2025)

FIGURA 18 – Vista Sensor de Vibração e Temperatura



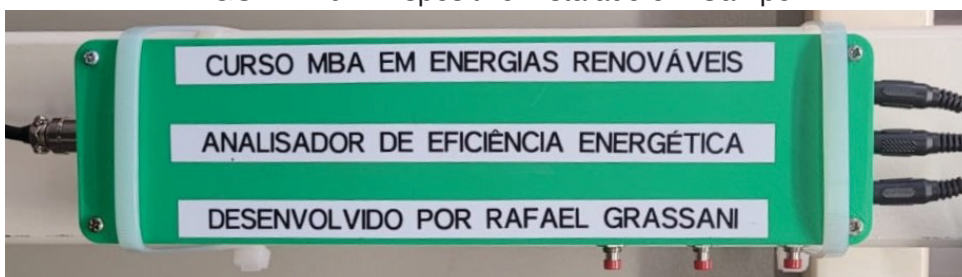
Fonte: O Autor (2025)

FIGURA 19 – Vista Dispositivo Completo



Fonte: O Autor (2025)

FIGURA 20 – Dispositivo Instalado em Campo



Fonte: O Autor (2025)

FIGURA 21 – Sensor de Vibração e Temperatura em Campo



Fonte: O Autor (2025)

FIGURA 22 – Sensores de corrente em campo



Fonte: O Autor (2025)

FIGURA 23 – Quadro de Acionamento Elétrico Blower



Fonte: O Autor (2025)

FIGURA 24 – Vista Geral aplicação em Campo



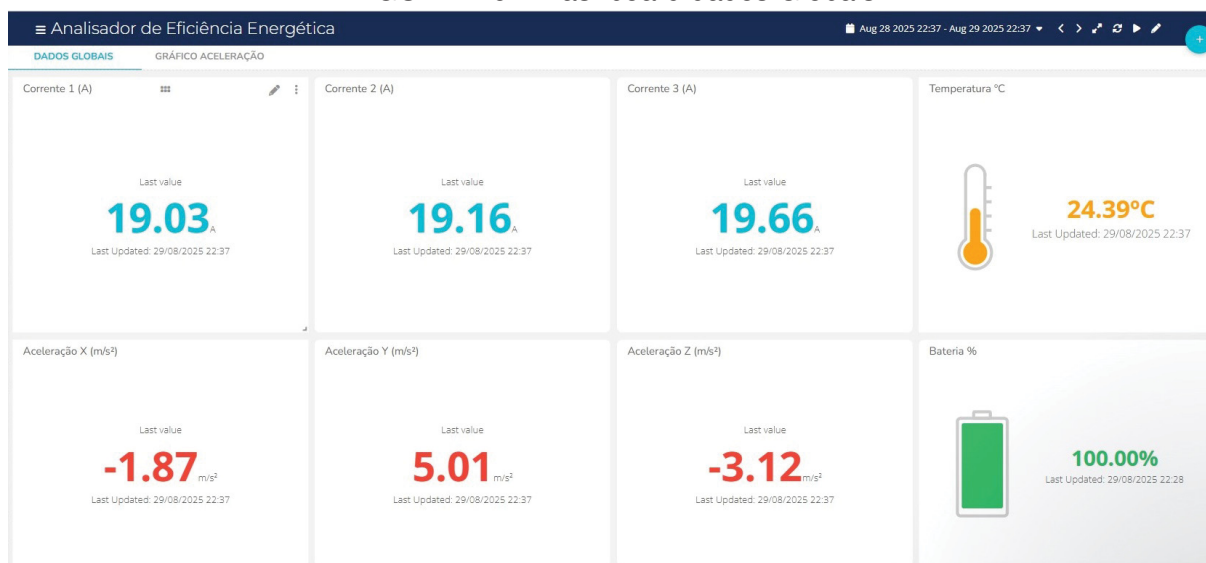
Fonte: O Autor (2025)

FIGURA 25 – Modem 4G/Wi-Fi



Fonte: O Autor (2025)

FIGURA 26 – Dashboard dados Globais



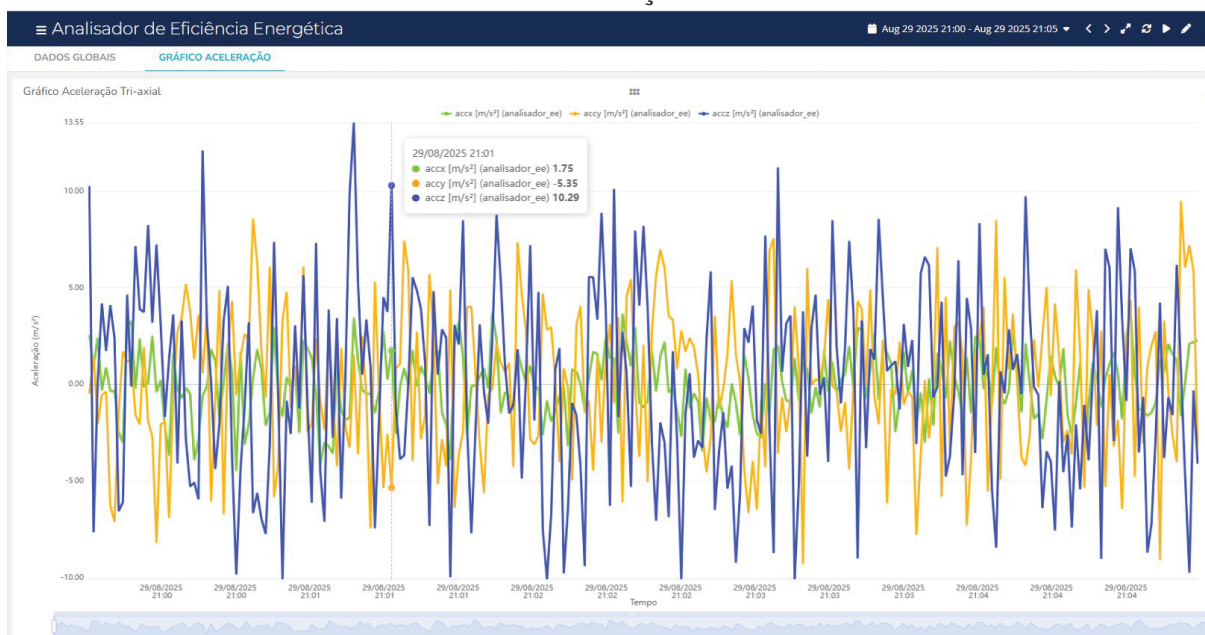
Fonte: O Autor (2025)

FIGURA 27 – Dashboard Vibração - Período de 4 dias



Fonte: O Autor (2025)

FIGURA 28 – Dashboard Vibração - Período de 4 minutos



Fonte: O Autor (2025)

APÊNDICE C – ACESSO AOS CÓDIGOS DO PROJETO

Todos os arquivos do desenvolvimento do projeto estão disponibilizados em um repositório *Github*. Isto possibilita a replicação do projeto para aprendizado global, além da vantagem de atualizações e correções futuras. O acesso pode ser feito pelo *link* a seguir:

https://github.com/grassanir/analizador_eficiencia_energetica