



Uma plataforma IoT para monitoramento contínuo de motores de indução trifásico

An IoT platform for continuous monitoring of three-phase induction motors

Thiago Kenzo Mori¹, Marcelo Favoretto Castoldi², Arthur Carvalho dos Santos³, Gabriel Tavore de Arruda⁴, Alessandro Goedtel⁵

RESUMO

Os motores de indução trifásico desempenham um papel essencial no processo de produção industrial. Atualmente o setor brasileiro consome cerca de 35% do total de energia elétrica gerada, sendo 70% consumida por estas máquinas. Apesar de possuir uma construção simples e robusta, quando expostos a condições impróprias de trabalho, elas estão sujeitas a falhas elétricas e mecânicas. Dessa forma, este trabalho busca desenvolver uma plataforma para monitoramento remoto e contínuo de um MIT para a identificação e diagnóstico de falhas de forma preditiva, utilizando um acelerômetro e uma placa de desenvolvimento para realizar o tratamento e aquisição do sinal de vibração condicionado. A partir dessa aquisição será realizado o processamento desse sinal no domínio do tempo para se obter o sinal no domínio da frequência e assim realizar o diagnóstico do equipamento. Estes dados serão enviados para a nuvem possibilitando a sua visualização remota e o acionamento da manutenção preditiva. Dessa forma, foi realizado o levantamento de sensores e placas de desenvolvimento que atendessem aos requisitos do projeto. O resultado obtido pelo processamento do sinal de vibração se mostrou de acordo com o esperado, sendo possível verificar a frequência fundamental sendo a mesma da frequência ajustada no inversor de frequência.

PALAVRAS-CHAVE: acelerômetro; falhas no motor; motor de indução trifásico; vibração.

ABSTRACT

Three-phase induction motors have a crucial role in the industrial production process. Currently, the Brazilian sector consumes approximately 35% of the total generated electrical energy, with 70% of it being consumed by these machines. Despite their simple and robust construction, when exposed to improper working conditions, they are subject to electrical and mechanical failures. Thus, this work aims to develop a platform for remote and continuous monitoring of a Three-Phase Induction Motor for the predictive identification and diagnosis of faults. This is achieved using an accelerometer and a development board to perform the conditioning and acquisition of the vibration signal. Following this acquisition, signal processing in the time domain is performed to obtain the frequency domain signal, enabling equipment diagnosis. These data will be sent to the cloud, enabling remote visualization and triggering of predictive maintenance. Therefore, a survey of sensors and development boards that met the project's requirements was conducted. The results obtained from the vibration signal processing aligned with expectations, allowing verification of the fundamental frequency, which matches the frequency set in the frequency inverter.

KEYWORDS: accelerometer; motor failures; three-phase induction motor; vibration.

¹ Bolsista da Fundação Araucária. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: thiagomori@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 4819625262739741.

² Docente em Engenharia Elétrica/DAELE Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: marcastoldi@utfpr.edu.br. ID Lattes: 6178029384175205.

³ Bolsista PIVIC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: arthur.2019@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 9950678454774434.

⁴ Bolsista PIVIC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: gabriel.2019@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 6133828718115699

⁵ Docente em Engenharia Elétrica/DAELE/Fundação Araucária. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: agoedtel@utfpr.edu.br. ID Lattes: 1920650157123774.



INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, o uso de máquinas elétricas está cada vez mais presente nos processos de produção. No Brasil, o setor industrial é responsável por cerca de 35% do consumo total de energia elétrica gerada, sendo que 70% desse consumo é demandada pelos sistemas motrizes (ELETROBRAS, 2021). Entre as categorias de máquinas elétricas, o motor de indução trifásico (MIT) se destaca devido a sua construção simples e robusta, de baixo custo de aquisição e manutenção, além da capacidade de converter a energia elétrica em energia mecânica-motriz, permitindo que equipamentos operem com um custo de operação reduzido (GONGORA, 2019).

Quando expostos a condições e esforços indesejáveis, as máquinas elétricas estão sujeitas a falhas elétricas e mecânicas que podem comprometer o seu funcionamento. Essas falhas podem ocorrer de forma isolada ou em combinação de duas ou mais falhas, que podem se agravar rapidamente, causando danos tanto ao MIT quanto aos equipamentos associados. Com isso, pesquisadores tem conduzido estudos com o objetivo de determinar as possíveis causas dessas falhas, sendo destacadas a falha nos rolamentos, curto-circuito de estator, barras do rotor quebradas, entre outras causas (BAZAN ET AL., 2021 (a, b); BIANCHINI, 2023; FROSINI, 2020; BAZAN ET AL., 2022; GUEDES ET AL., 2018).

Dessa forma, este trabalho busca desenvolver uma plataforma IoT que proporciona o monitoramento remoto e contínuo da grandeza vibração de um MIT, a partir do diagnóstico de falhas eminentes e da condição associada a ele. Assim, com base nas informações extraídas do sinal de vibração com o condicionamento e processamento necessário para que essas características permitam uma análise confiável e assim realizar o envio dos dados para a nuvem, possibilitando o diagnóstico remoto por meio de uma dashboard a partir dos dados armazenados em nuvem do MIT, e assim possibilitar o acionamento da correção preditiva do mesmo.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa elaborada neste trabalho consiste na continuidade do trabalho realizado por Mori *et al.* (2022). Os testes foram realizados no espaço do Laboratório de Sistemas Inteligentes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná do Campus Cornélio Procópio com os materiais adquiridos com a bolsa de iniciação científica concedida PIBIC junto à Fundação Araucária, desenvolvendo assim uma plataforma para monitoramento remoto e contínuo de máquinas elétricas.

Na fase de aquisição dos dados foi utilizado um módulo acelerômetro MPU-6050, fabricado pela *IvenSense*. Este sensor digital possui um acelerômetro de três graus de liberdade, um giroscópio e um sensor de temperatura encapsulados em seu circuito integrado. Para o desenvolvimento do trabalho, foi utilizado o acelerômetro para a aquisição de informações relativas à grandeza vibração do motor. O Quadro 1 indica os principais parâmetros levantados durante o estudo.

Quadro 1 – Principais especificações do módulo acelerômetro MPU-6050

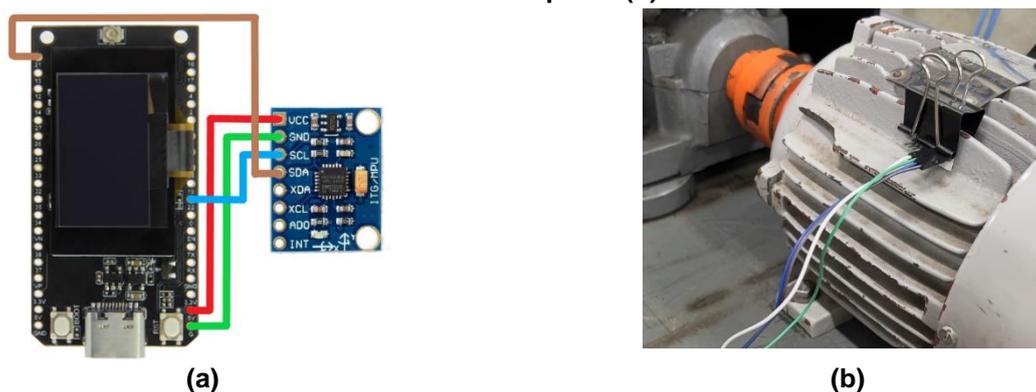
Faixa de medição	$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$	Protocolo de comunicação	I2C
Taxa de amostragem	100 Hz ($\pm 333\text{Hz/eixo}$)	Resolução do conversor A/D	16-bit
Sensibilidade do acelerômetro	16384 LSB/g	Tensão de operação	3-5 V

Fonte: Elaborado pelo autor com base no datasheet do módulo MPU-6050 (2023)

Para que o sinal de vibração condicionado pelo módulo acelerômetro seja convertido em dados possíveis de serem analisados, foi utilizado uma placa de desenvolvimento ESP32 LoRa WiFi SX1278, projetado pela empresa *Heltec Automation*. Este dispositivo possui interfaces UART, SPI e I2C em seus GPIO, possibilitando a utilização de diversos sensores e dispositivos externos e apresentando um baixo consumo de energia, além de suportar conexão *WiFi* e *Bluetooth*, apresentando potencial para a sua utilização para o desenvolvimento deste projeto.

Para realizar a conexão do acelerômetro na placa de desenvolvimento, é necessário conectar os pinos VCC, GND, SCL e SDA do módulo nos pinos correspondentes da placa de desenvolvimento, sendo os pinos 5V, GND, GPIO21 e GPIO22, uma vez que o sensor utiliza a interface de comunicação I2C. A Figura 1(a) ilustra as ligações realizadas. A partir dessa conexão, os testes foram realizados acoplado o acelerômetro na carcaça do MIT de 4 polos, como apresentado na Figura 1(b). O MIT em questão estava acoplado a um motor de 2 polos sendo cuja velocidade foi controlada por um inversor de frequência ajustado a 30Hz.

Figura 1 – Conexão do MPU-6050 no ESP32 LoRa WiFi SX1278 (a); MPU-6050 acoplado na carcaça do MIT de 4 polos (b)



Fonte: Autoria própria (2023)

Após a aquisição das amostras durante um período de 30 segundos, foi selecionado um intervalo de 1 segundo de amostras do monitor serial da IDE, cada amostra era composta pelo instante de aquisição, aceleração do eixo X, Y e Z. A partir desse conjunto de amostras, foi utilizado o *software Microsoft Excel* para montar a base de dados no formato CSV, e o *software Matlab R2022a*, para realizar a plotagem dos gráficos e o processamento do sinal utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT). A FFT consiste na representação do sinal por meio de espectros de frequência que possuem picos diferentes por meio da separação dos sinais somados no domínio do tempo.

Concomitantemente à aquisição dos dados, as amostras adquiridas estavam sendo enviadas para um banco de dados hospedados no servidor local utilizando o método GET implementado no código-fonte compilado na placa de desenvolvimento.

RESULTADOS

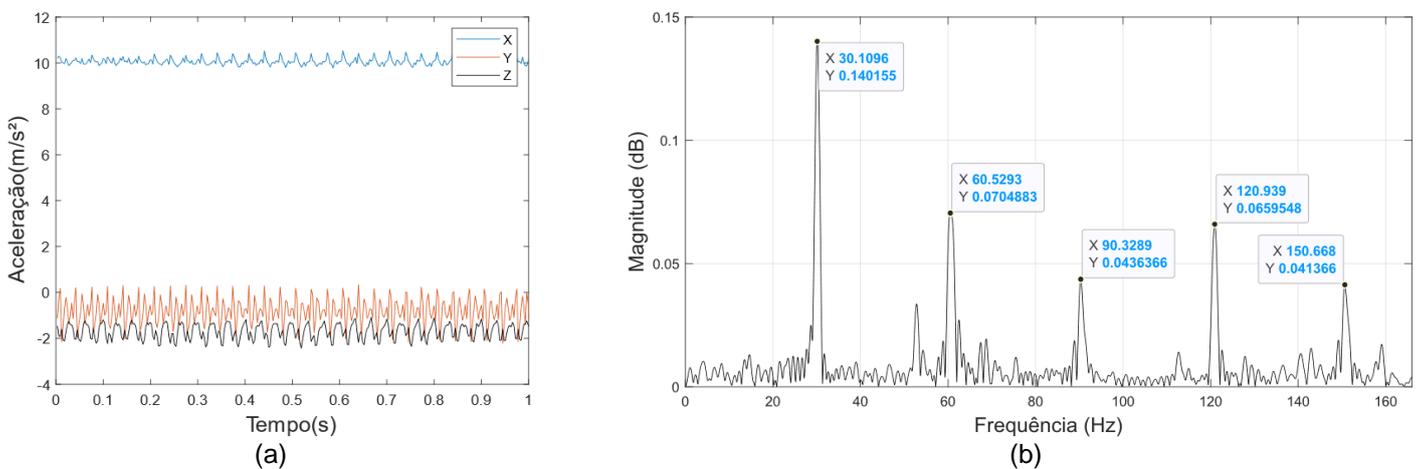
Esta seção apresenta os resultados experimentais obtidos durante o desenvolvimento da metodologia descrita neste trabalho. Após o desenvolvimento do



código fonte com o respectivo tratamento dos dados, foi possível realizar a aquisição da vibração dos eixos X, Y e Z, em m/s², realizando a aquisição de 333 amostras por segundo, que eram apresentados no monitor serial da IDE utilizada.

A partir da aquisição dos dados de vibração do MIT, a base de dados foi importada para o Matlab R2022a, onde foi feita a plotagem do sinal de vibração nos três eixos, tendo como resultado o sinal apresentado na Figura 2(a). A partir desse conjunto, foi realizado o processamento desse sinal utilizando o algoritmo da FFT, obtendo a representação das componentes espectrais no domínio da frequência do eixo X, indicado na Figura 2(b).

Figura 2 – Sinal de vibração no domínio do tempo (a); Sinal de vibração no domínio da frequência (b)



Fonte: Autoria própria (2023)

Analisando o resultado obtido pela FFT, obteve-se a frequência fundamental do sinal em 30Hz, tal resultado está em conformidade, uma vez que a velocidade do MIT está sendo controlado pelo inversor de frequência que está ajustado na frequência de 30Hz.

O envio dos dados para o banco de dados hospedado em um servidor local ocorreu de forma simultânea à aquisição pela placa de desenvolvimento, utilizando o método GET, onde a cada pacote enviado, era alocado uma nova linha na tabela com os novos valores e assim armazenado para consulta. A Figura 3 apresenta o banco de dados com as amostras recebidas.

Figura 3 – Banco de dados com as amostras recebidas

	ID	Data	Eixo_X	Eixo_Y	Eixo_Z
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	115	2023-09-13 10:57:00	-5.32	-0.35	9.03
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	116	2023-09-13 10:57:00	-5.34	-0.33	8.91
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	117	2023-09-13 10:57:00	-5.31	-0.35	9.08
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	118	2023-09-13 10:57:00	-5.31	-0.38	9.12
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	119	2023-09-13 10:57:00	-5.29	-0.35	9.1
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	120	2023-09-13 10:57:00	-5.31	-0.36	8.96
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	121	2023-09-13 10:57:00	-5.28	-0.34	9.1
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	122	2023-09-13 10:57:00	-5.27	-0.42	9.14
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	123	2023-09-13 10:57:00	-5.31	-0.37	8.96
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	124	2023-09-13 10:57:00	-5.29	-0.34	9.05
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	125	2023-09-13 10:57:00	-5.3	-0.36	9.14

Fonte: Autoria própria (2023)



Ao analisar o resultado do monitoramento dos dados no banco de dados, obteve-se um resultado promissor, onde a exibição dos dados ocorreu como esperado. Porém, houve a presença de uma restrição no envio de todos os dados para o banco. A possível causa desse atraso é devido a grande quantidade de dados que estão sendo enviados a cada segundo.

CONCLUSÃO

Por meio desse trabalho, foi possível realizar o envio das amostras para um banco de dados utilizando o método GET implementado no código-fonte desenvolvido e fazer o processamento dos sinais condicionados pelo acelerômetro, bem como validar o funcionamento do acelerômetro com base no resultado da FFT do sinal coletado, apresentando a frequência fundamental esperada, sendo resultados válidos para a futura utilização da plataforma para realizar o diagnóstico de possíveis falhas no motor. A placa de desenvolvimento se mostrou essencial para a aquisição dos dados e envio para a rede, desenvolvendo assim uma plataforma para monitoramento remoto de máquinas elétricas.

Os próximos passos da pesquisa será implementar no código-fonte o envio dos dados para o banco de dados no formato de pacote de dados. Assim, espera-se reduzir a limitação no envio dos dados para o banco. E também será trabalhado o desenvolvimento de um código em html e javascript para apresentar os dados adquiridos em gráficos para facilitar a visualização dos dados, além de contratar um servidor dedicado para hospedar a plataforma e assim possibilitar o acesso da dashboard e os dados armazenados na nuvem.

Agradecimentos

Agradeço ao Programa de Iniciação Científica (PIBIC) junto à Fundação Araucária pelo apoio financeiro à pesquisa no formato de bolsa e auxílio financeiro que tornou este trabalho possível e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procopio, pela oportunidade de desenvolvimento deste estudo.

Disponibilidade de código

O código desenvolvido está indisponível para terceiro, pelo fato do mesmo possuir chaves para o acesso à rede e ao servidor utilizado. Ainda, entende-se que este trabalho tem potencial para submissão a AGINT-UTFPR pedido de patente e registro de software.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

BAZAN, Gustavo Henrique; GOEDEL, Alessandro; CASTOLDI, Marcelo Favoretto; GODOY, Wagner Fontes; DUQUE-PEREZ, Oscar; MORINIGO-SOTELO, Daniel. **Mutual Information and Meta-Heuristic Classifier Applied to Bearing Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motors**. Applied Sciences-Basel, v. 11, p. 314-331, 2021 (a).



BAZAN, Gustavo Henrique; GOEDEL, Alessandro; DUQUE-PEREZ, Oscar; MORINIGO-SOTELO, Daniel. **Multi-Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motors Using Data Optimization and Machine Learnings Techniques**. ELECTRONICS, v. 10, p. 1462-1485, 2021 (b).

BAZAN, Gustavo Henrique; GOEDEL, Alessandro; SCALASSARA, Paulo Rogerio; ENDO, Wagner; NUNES, Erick Araujo; TAKASE, Victor Takeo Ferreira; GUEDES, Jacqueline Jordan; GENTIL, Murillo Garcia. **An Embedded System for Stator Short-Circuit Diagnosis in Three-Phase Induction Motors Using Information Theory and Artificial Neural Networks**. IEEE Transactions on System Man Cybernetics-Systems, v. X, p. 1-11. 2022.

BIANCHINI, Carolina Alves. **Diagnóstico de falhas localizadas de rolamento em motores de indução trifásicos a partir de um modelo matemático**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, PR. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/31011>. Acesso em: 13 set 2023.

ELETOBRAS, **Resultados PROCEL 2021: ano-base 2020**. [S. l.] 2021. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2021/>. Acesso em: 13 set 2023.

FROSINI, Lucia. **Novel Diagnosis Techniques for Rotating Electrical Machines – A Review**. Energies, v. 13, n. 19, p. 5066, 2020.

GONGORA, Wylliam Salviano; DA SILVA, Ivan Nunes; GOEDEL, Alessandro; CASTOLDI, Marcelo Favoretto; DOS SANTOS, Tiago Henrique. **Reference Signal Injection in Induction Motors Drives to Electrical Failures Detection**. JOURNAL OF CONTROL, AUTOMATION AND ELECTRICAL SYSTEMS, v. 30, p. 242-252, 2019.

GUEDES, Jacqueline Jordan; CASTOLDI, Marcelo Favoretto, GOEDEL, Alessandro; AGULHARI, Cristiano Marcos; SANCHES, Danilo Sipoli. **Parameter estimation of three-phase induction motors using differential evolution**. ELECTRIC POWER SYSTEMS RESEARCH, v. 154, p. 204-212, 2018.

IvenSense Inc., 2013. **MPU-6000/MPU-6050 Product Specification, PS-MPU-6000A-00 Datasheet**, revision 3.4. Disponível em: <http://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>. Acessado em: 14 set 2023.

MORI, Thiago Kenzo; CASTOLDI, Marcelo Favoretto; LOUZADA, Ailton de Oliveira; GOEDEL, Alessandro. **Desenvolvimento de uma plataforma para monitoramento remoto de máquinas elétricas para identificação de falhas**. In: Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Anais...Santa Helena (PR) UTFPR Santa Helena, 2022. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/547090-DESENVOLVIMENTO-DE-UMA-PLATAFORMA-PARA-MONITORAMENTO-REMOTO-DE-MAQUINAS-ELETRICAS-PARA-IDENTIFICACAO-DE-FALHAS>. Acesso em: 13 set 2023