

Desenvolvimento de um Sistema de Aquisição e Monitoramento de Dados de Motores Elétricos usando Internet das Coisas

Lucas S. do Nascimento* Eglon P. da Silva* Eduardo G. Pereira*

* Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – IFPE, (e-mail: lsn4@discente.ifpe.edu.br, eps12@discente.ifpe.edu.br, eduardopereira@ipojuca.ifpe.edu.br).

Abstract: In this paper, we present the development and implementation of a data monitoring system for three-phase induction electric motors based on Internet of Things (IoT) technology aimed at improving predictive maintenance and operational efficiency. The system integrates temperature, current, and vibration sensors, managed by an ESP32 microcontroller, which collects and transmits data in real time to a dashboard hosted on Google Sheets. The data acquisition and analysis methods are detailed, including the application of a graphical interface to facilitate data interpretation by end users. Experiments were conducted on a test bench, which allowed simulating different operational conditions and evaluating the system's response to induced load and vibration variations. The results demonstrate the system's ability to provide continuous monitoring and reliable data, necessary for the implementation of predictive maintenance strategies.

Resumo: Neste artigo, é apresentado o desenvolvimento e a implementação de um sistema de monitoramento de dados para motores elétricos de indução trifásicos baseado na tecnologia da Internet das Coisas (IoT) com o objetivo de melhorar a manutenção preditiva e a eficiência operacional. O sistema integra sensores de temperatura, corrente e vibração, gerenciados por um microcontrolador ESP32, que coleta e transmite os dados em tempo real para um dashboard hospedado no Google Sheets. Os sistemas de aquisição e visualização de dados são apresentados, incluindo a aplicação de uma interface gráfica para facilitar a interpretação dos dados por usuários finais. Experimentos foram realizados em uma bancada de testes, que permitiu simular diferentes condições operacionais e avaliar a resposta do sistema às variações de carga e vibração induzidas. Os resultados demonstram a capacidade do sistema de fornecer monitoramento contínuo e dados confiáveis, necessários para a implementação de estratégias de manutenção preditiva.

Keywords: Induction Motor, Internet of Things, Predictive Maintenance, Monitoring System, Interactive Dashboard.

Palavras-chaves: Motor de Indução, Internet das Coisas, Manutenção Preditiva, Sistema de Monitoramento, Dashboard Interativo.

1. INTRODUÇÃO

Motores elétricos, especialmente motores de indução trifásicos, desempenham um papel fundamental no cenário industrial devido à sua eficiência, flexibilidade operacional e gama de aplicações (Rocha et al., 2023). A operação contínua desses motores em ambientes industriais exige a realização de manutenção preventivas periódicas para garantir a performance e a vida útil desses motores (Lu et al., 2009). No entanto, mesmo com manutenções preventivas periódicas, condições adversas e imprevisíveis podem ocorrer, causando possíveis prejuízos que podem comprometer significativamente a performance e a longevidade desses motores, evidenciando a necessidade de sistemas contínuos de monitoramento e manutenção.

A eficiência e a confiabilidade dos motores elétricos são afetadas por diversos fatores, como acúmulo de sujeira,

dissipação de calor inadequada, falhas elétricas e vibrações excessivas (Portos et al., 2019). Estas condições adversas não apenas reduzem o desempenho dos motores, mas também aceleram o seu desgaste, podendo resultar em custos elevados de manutenção e potenciais paradas inesperadas de produção, que podem ter consequências econômicas significativas.

Recentemente, a Internet das Coisas (IoT) emergiu como uma tecnologia que oferece soluções inovadoras para o monitoramento contínuo e a manutenção preditiva de equipamentos industriais (Compare et al., 2020). A integração de sensores inteligentes e redes de comunicação permite a coleta e análise de dados em tempo real, possibilitando a identificação precoce de problemas potenciais antes que se tornem críticos (Aheleroff et al., 2020).

Neste artigo, é apresentado um sistema de aquisição e monitoramento de dados para motores elétricos, empregando

a tecnologia de Internet das Coisas. O sistema desenvolvido é capaz de coletar dados críticos, como corrente, temperatura e vibração, utilizando um microcontrolador ESP32. O sistema também oferece um *dashboard* interativo desenvolvida no google sheets para exibição das informações. O *dashboard* possui possibilidade de seleção do período de visualização. Resultados experimentais são apresentados para demonstrar a funcionalidade do sistema desenvolvido.

2. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

2.1 Sistema de Sensores

O sistema de monitoramento foi desenvolvido com o objetivo de monitorar continuamente os três principais parâmetros de motores elétricos de indução: temperatura, corrente elétrica e vibrações mecânicas. O acompanhamento da temperatura é útil para indicar aspectos como sobrecarga, problemas no sistema de resfriamento, degradação do isolamento e falta de lubrificação (Ferreira et al., 2015). O monitoramento da corrente serve para detecção de sobrecarga, falhas elétricas em geral e dimensionamento inadequado (Thomson and Fenger, 2001). A supervisão de vibrações mecânicas pode indicar um desequilíbrio de fases, desalinhamento entre carga e motor e outras complicações mecânicas como falhas de acoplamento ou problemas de fixação de componentes (Finley et al., 2015).

Na medição de temperatura, foi utilizado um sensor termopar do tipo K ligado a um condicionador de sinais MAX6675. Para realizar o posicionamento do sensor, foi aberta a caixa de ligação do motor e o sensor foi fixado abaixo do isolamento dos enrolamentos do estator. Na Fig. 1, pode ser visualizado o posicionamento do termopar. O motor no qual foram realizados os testes experimentais tem um sensor PTC embutido, e este foi utilizado para verificar a aquisição adequada dos dados de temperatura por meio do termopar.

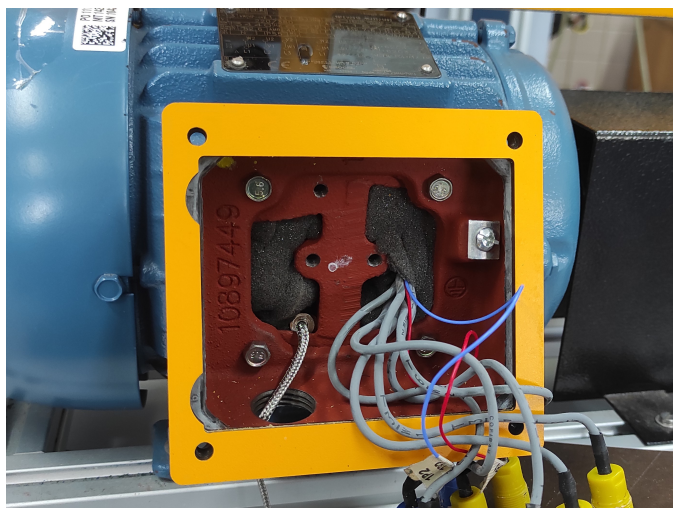


Figura 1. Fotografia da caixa de ligação do motor aberta com o posicionamento do sensor termopar nos enrolamentos do estator.

Para efetuar a medição de corrente elétrica, foi utilizado o sensor de corrente SCT013, que mede a corrente via campo magnético induzido, gerando uma tensão de saída proporcional à corrente. A instalação do sensor foi realizada

acoplado-o diretamente a uma das fase de alimentação do motor, conforme pode ser visto na Fig. 2. Um divisor resistivo foi projetado para adequar a amplitude de saída do sensor ao conversor AD do ESP32. Com a expectativa de equilíbrio de carga entre as fases, a medição de uma única fase é suficiente para falhas elétricas e sobrecargas no motor, uma vez que um desequilíbrio de fases pode ser detectado pela análise de vibrações mecânicas. A verificação da medição adequada de corrente ocorreu por meio da utilização de um multímetro operando no modo amperímetro.

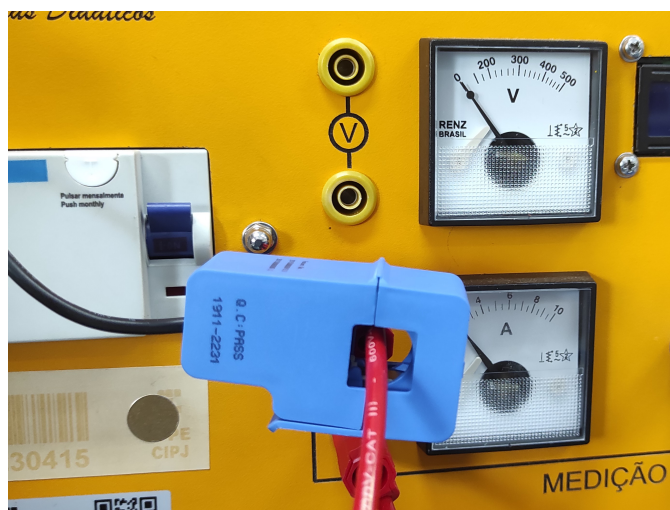


Figura 2. Fotografia do sensor de corrente SCT013 acoplado a uma fase de alimentação do motor.

Para medir vibrações mecânicas, foi utilizado o sensor MPU-6050, que combina giroscópio e acelerômetro, sendo possível detectar vibração em três eixos ou direções. O sensor foi fixado na superfície do motor utilizando cola epox com o eixo x do sensor alinhado com o eixo de rotação do motor, o eixo z do sensor alinhado ao eixo vertical e o eixo y do sensor completando o plano horizontal. Uma fotografia do posicionamento do sensor de vibração no motor pode ser visualizada na Fig. 3.

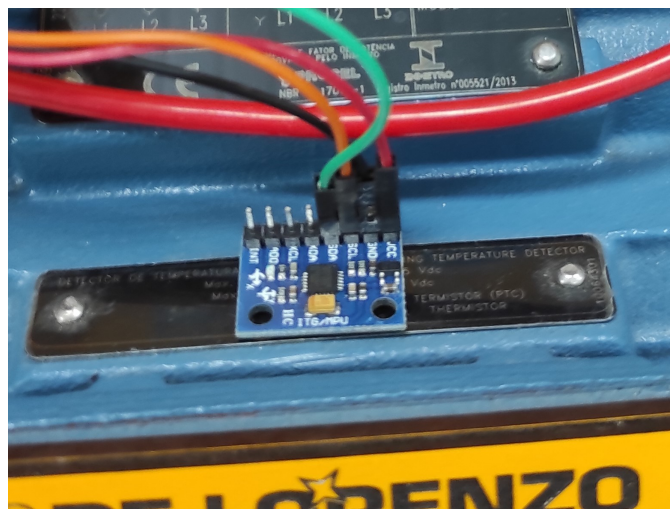


Figura 3. Fotografia do sensor de vibração fixado ao motor de testes.

2.2 Aquisição e Transmissão de Dados

Os sensores foram conectados a um microcontrolador ESP32, que é um microcontrolador de alta capacidade de processamento, baixo custo e capacidade de comunicação sem fio. A função primária do ESP32 neste sistema é coletar e transmitir continuamente os dados dos sensores de temperatura, corrente e vibração. O código desenvolvido para o microcontrolador é estruturado em torno de duas interrupções de temporizador com funções distintas: uma função de aquisição de dados e uma função de transmissão de dados.

Aquisição de Dados A aquisição de dados é ativada por uma interrupção de temporizador. Com o motor sendo alimentado a uma frequência de 60 Hz, uma frequência de amostragem ao menos 10 vezes maior é recomendada para corrente e vibração. O período de chamada da interrupção foi configurado para ser 1 ms, garantindo uma frequência de amostragem de 1 kHz para os sinais de corrente, vibração e temperatura. A utilização dessa taxa de amostragem para armazenamento e transmissão das grandezas medidas geraria um volume de dados muito grande, o que inviabilizaria ou tornaria muito custoso o uso contínuo do sistema. Para contornar este problema, foi estabelecida uma taxa de armazenamento de dados de 0.4 Hz, gerando uma amostra a cada 2.5 s. Durante este período, são realizadas 2500 aquisições de cada grandeza e calculados, de forma recursiva, o valor médio da temperatura, o valor eficaz da corrente, e o valor máximo de vibração para cada eixo. Além de reduzir o volume de dados, esse processamento ajuda a suavizar flutuações e melhorar a confiabilidade das informações capturadas. Após 2500 aquisições, os dados são organizados em um formato padrão preparado para envio. Esta organização inclui a serialização e a organização dos dados em formato de *string*. Após a organização, os dados são alocados em uma fila circular de envio, armazenando os dados para que sejam transmitidos. O fluxograma da função da interrupção de aquisição pode ser visualizado na Fig. 4.

Transmissão de Dados Outra interrupção por temporizador foi configurada para a função de transmissão dos dados. O período de transmissão foi configurado para ser 30 s. Este valor foi escolhido porque, em testes preliminares de transmissão, foi percebido que tentativas múltiplas de acesso à planilha do google em um curto intervalo de tempo resultavam num bloqueio temporário de acesso. A transmissão de dados no período de armazenamento (2.5 s) também resultou em bloqueios em testes contínuos de transmissão num intervalo de 24 horas. A primeira tarefa nesta função é verificar se o sistema está conectado à internet. Caso não esteja conectado, o sistema tenta estabelecer uma conexão e continua o processo até que o sistema esteja conectado à rede. Com a conexão estabelecida, um loop é chamado e verifica se há dados na fila de envio. Enquanto a fila não estiver vazia, o loop, de forma sequencial transmite o elemento mais antigo da fila para a planilha do google e o substitui por um elemento vazio. A transmissão é realizada por meio da plataforma IFTTT (IF This, Then That), serviço que facilita a automação entre dispositivos IoT e serviços online. A utilização do IFTTT permite a criação de uma ponte automatizada entre o microcontrolador e a planilha, garantindo que os dados

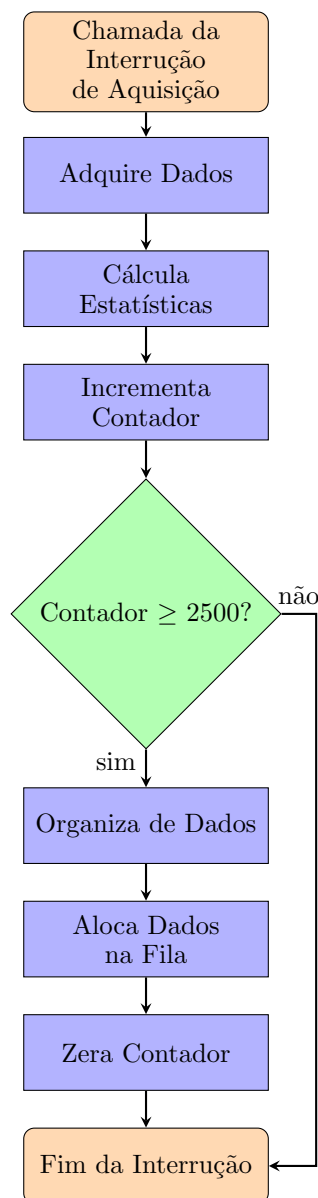


Figura 4. Fluxograma da função da interrupção do temporizador utilizada para aquisição e preparação de dados.

coletados sejam enviados de forma eficiente e sem erros. A transmissão é direcionada a uma planilha hospedada no Google Sheets, onde os dados podem ser acessados e analisados. Na plataforma IFTTT, foi configurada uma *applet* que é ativada automaticamente ao receber a *string* de dados formatada enviada pelo ESP32. Esta *applet* é especificada para decompor a *string* recebida, organizando os dados em colunas correspondentes na planilha do Google. Além dos dados de cada sensor, cada entrada na planilha inclui o tempo da aquisição dos dados, gerando um registro cronológico que pode ser utilizado em análises subsequentes e monitoramento de tendências ao longo do tempo. A fila circular implementada tem capacidade para 1024 elementos, caso a fila esteja cheia devido a falhas de transmissão, os dados adquiridos são alocados na fila sobrepondo os dados mais antigos, que são descartados. O fluxograma da função de loop principal está exibido na Fig. 5.

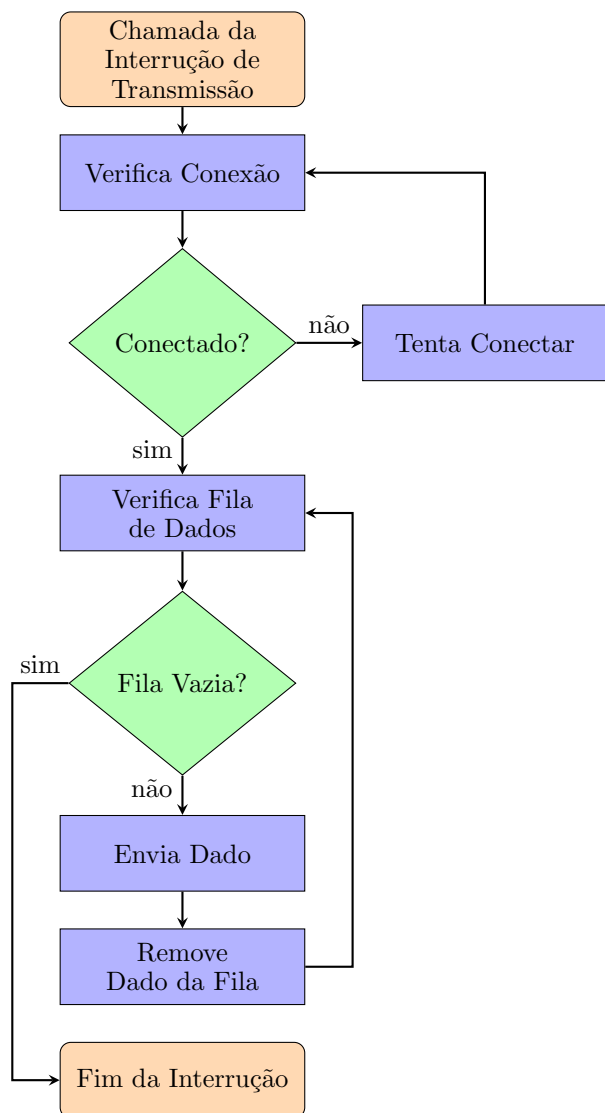


Figura 5. Fluxograma da função principal, utilizada para conexão com a internet e transmissão de informações.

2.3 Dashboard

Outra etapa do desenvolvimento do sistema de monitoramento foi a criação de uma interface de usuário amigável e funcional para a visualização dos dados coletados pelos sensores. Para atender a essas necessidades, optou-se por desenvolver um *dashboard* interativo na plataforma Google Sheets, uma vez que esta já é utilizada para o recebimento de dados, fica disponível online e é de fácil compartilhamento para inserção de novos usuários.

O *dashboard* projetado no Google Sheets é customizável, oferecendo aos usuários a capacidade de selecionar e visualizar dados baseados em variáveis específicas monitoradas, como temperatura, corrente e vibração. Isso é feito por meio de menus seletores que permitem ao usuário escolher quais variáveis desejam visualizar. Além disso, os usuários podem definir o período de aquisição dos dados que desejam analisar. Essa funcionalidade é particularmente útil para identificar tendências ao longo do tempo ou para focar em eventos específicos onde os parâmetros monitorados mostraram desvios significativos.

A habilidade de filtrar dados por variável e período facilita análises detalhadas e pode auxiliar na rápida identificação de potenciais problemas ou anomalias no funcionamento dos motores. Uma imagem de captura de tela da página principal do dashboard é exibida na Fig. 6.

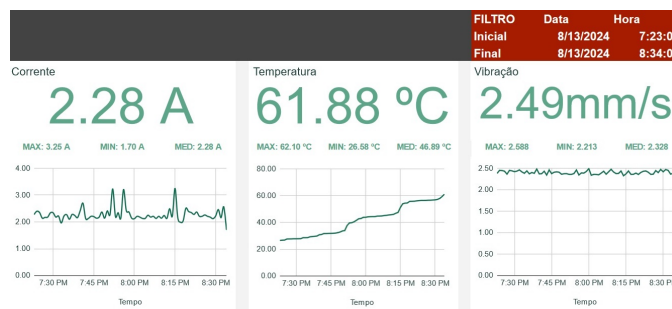


Figura 6. Captura de tela do *dashboard* com seleção de intervalo de exibição por data e hora.

Além das funcionalidades básicas de seleção e visualização, o dashboard também inclui capacidades adicionais para análise de dados. Os usuários podem calcular e visualizar estatísticas descritivas como valores médios, máximos, mínimos e a variância para qualquer conjunto de dados num período de tempo selecionado. Além da exibição atualizada automaticamente nos períodos das últimas 24 horas a medida que novos dados são coletados e transmitidos ao Google Sheets, garantindo acesso e visualização às informações mais recentes.

3. REALIZAÇÃO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

Para verificar a eficácia do sistema de monitoramento desenvolvido, foi organizada uma bancada de testes composta por dois motores de indução trifásicos. O primeiro motor, denominado motor de testes, foi o objeto de monitoramento do experimento e foi equipado com os sensores de temperatura, corrente e vibração, conforme descrito na Seção 2. Este motor foi conectado diretamente à rede trifásica, permitindo que operasse sob condições normais de carga elétrica, como seria esperado em um ambiente industrial típico. O segundo motor, denominado motor de carga, foi utilizado como uma carga variável, conectado através de um inversor de frequência. O uso do inversor permitiu um controle ajustável da carga imposta ao motor de testes. Essa abordagem foi escolhida porque permite simular diferentes condições operacionais, ajustando a carga de maneira controlada e medindo o efeito dessas variações nas leituras dos sensores instalados no motor principal. Uma foto da bancada de testes está exibida na Fig. 7.

Durante a realização dos testes, os dados coletados pelos sensores foram transmitidos em tempo real para o *dashboard* no Google Sheets, permitindo a visualização imediata dos dados. Na Fig. 8, é exibida uma captura de tela da planilha do google com os dados recebidos.

Na realização experimental, a carga aplicada pelo segundo motor foi variada intencionalmente para induzir diferentes estados operacionais no motor de testes. Ao aumentar a carga, esperava-se observar um aumento na corrente consumida pelo motor de testes e um conseqüente aumento na temperatura devido ao esforço adicional e à maior demanda de energia. Além disso, mudanças na carga podem

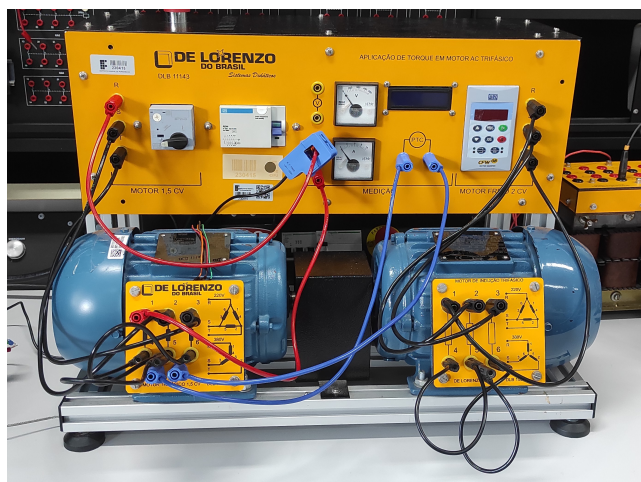


Figura 7. Fotografia da bancada montada para realização de testes experimentais.

#	DATA	Temperatura	Corrente	Vibração Total	Vibração Eixo Horizontal	Vibração Eixo Vertical	Vibração Eixo Axial
10977	8/13/2024 - 20:04:46	46,9	2,19	2,462	2,496	0,180	0,207
10978	8/13/2024 - 20:04:50	46,90	2,27	2,516	2,498	0,180	0,207
10979	8/13/2024 - 20:04:52	46,90	2,26	2,516	2,492	0,227	0,221
10976	8/13/2024 - 20:04:45	46,85	2,18	2,502	2,634	0,205	0,227
10977	8/13/2024 - 20:04:46	46,82	2,07	2,589	2,669	0,189	0,262
10978	8/13/2024 - 20:04:48	46,84	2,18	2,562	2,651	0,180	0,176
10979	8/13/2024 - 20:04:50	46,88	2,02	2,673	2,662	0,248	0,229
10980	8/13/2024 - 20:04:52	46,90	2,21	2,762	2,599	0,190	0,167
10981	8/13/2024 - 20:04:54	46,84	2,29	2,522	2,608	0,229	0,128
10982	8/13/2024 - 20:04:56	46,86	2,29	2,466	2,465	0,207	0,238
10983	8/13/2024 - 20:04:58	46,84	2,13	2,621	2,484	0,344	0,123
10984	8/13/2024 - 20:04:59	46,82	2,12	2,400	2,294	0,019	0,184
10985	8/13/2024 - 20:05:01	46,90	2,18	2,505	2,488	0,232	0,203
10986	8/13/2024 - 20:05:03	46,85	2,32	2,546	2,629	0,218	0,188
10987	8/13/2024 - 20:05:05	46,87	2,16	2,466	2,480	0,114	0,160
10988	8/13/2024 - 20:05:07	46,81	2,15	2,618	2,489	0,280	0,262
10989	8/13/2024 - 20:05:09	46,87	2,20	2,520	2,697	0,281	0,248
10990	8/13/2024 - 20:05:10	46,90	2,28	2,583	2,592	0,327	0,175
10991	8/13/2024 - 20:05:12	46,90	2,24	2,516	2,470	0,461	0,183
10992	8/13/2024 - 20:05:14	46,88	2,18	2,523	2,591	0,360	0,205
10993	8/13/2024 - 20:05:16	46,88	2,20	2,563	2,482	0,278	0,175
10994	8/13/2024 - 20:05:18	46,92	2,19	2,610	2,690	0,279	0,158

Figura 8. Captura de tela da planilha do google na aba de captura de dados exibindo dados adquiridos de corrente, temperatura e vibração.

também influenciar as vibrações detectadas, oferecendo condições para testar a capacidade dos sensores de registrar mudanças significativas em várias condições. O gráfico do *dashboard* para corrente está exibido na Fig. 9 e o gráfico para temperatura está exibido na Fig. 10.

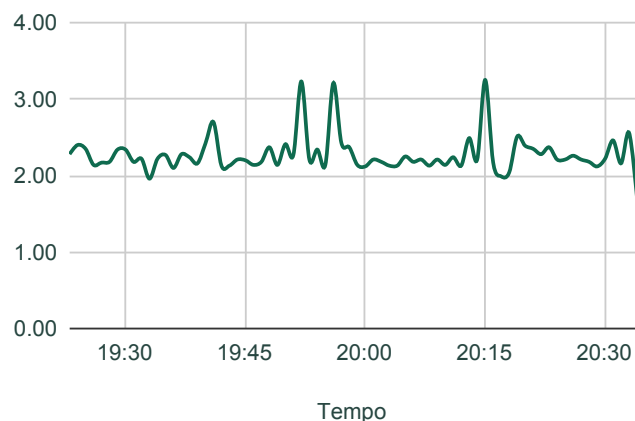


Figura 9. Curva de corrente (em A) ao longo do tempo obtida na realização experimental.

Para verificar o monitoramento da vibração, pancadas foram dadas na bancada em momentos específicos para capturar variações da vibração. A vibração total foi cal-

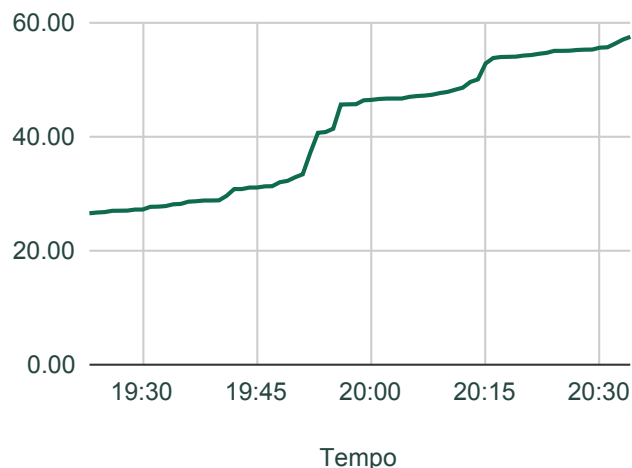


Figura 10. Curva da temperatura (em °C) ao longo do tempo obtida na realização experimental.

culada como o módulo da soma vetorial da vibração dos três eixos captados pelo sensor. O gráfico da vibração ao longo do tempo está exibido na Fig. 11. Os pontos de picos na figura correspondem aos momentos de pancadas para verificação do aumento de vibração.

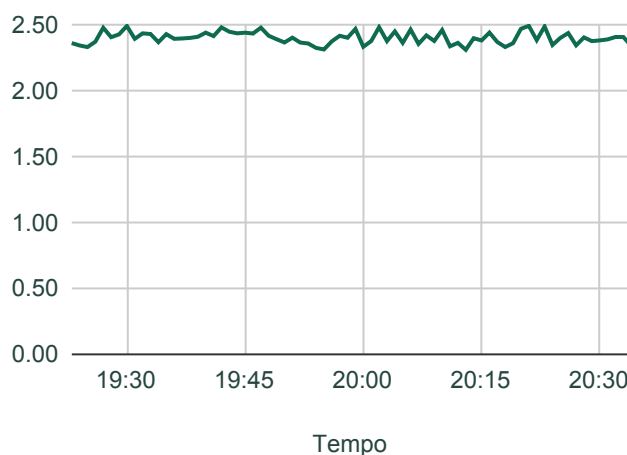


Figura 11. Curva da vibração (em mm/s) ao longo do tempo obtida na realização experimental.

4. CONCLUSÃO

Neste artigo, foi apresentado o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de motores de indução utilizando a IoT. O sistema integra sensores de temperatura, corrente e vibração, juntamente com estratégias de pré-processamento e transmissão de dados do microcontrolador ESP32. Para visualizar os dados, foi desenvolvida um *dashboard* interativo no Google Sheets com a capacidade de definição de período de visualização dos dados e exibição de variáveis estatísticas específicas.

O funcionamento do sistema de monitoramento foi verificado experimentalmente em uma bancada de testes. Durante os testes experimentais, dados de corrente e temperatura foram comparados com dados obtidos por outros

medidores para validar o funcionamento adequado dos dados obtidos.

A abordagem provou ser uma estratégia eficaz para a supervisão em tempo real desses motores resultando em uma ferramenta para auxiliar na detecção precoce de irregularidades e falhas operacionais. Como continuação deste trabalho, pretende-se implementar estratégias de processamento de sinais para detectar, de forma automática, anormalidades e problemas e emitir alertas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Campus Ipojuca do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco por fornecer infraestrutura, equipamento e material para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Ahleroff, S., Xu, X., Lu, Y., Aristizabal, M., Pablo Velásquez, J., Joa, B., and Valencia, Y. (2020). Iot-enabled smart appliances under industry 4.0: A case study. *Advanced Engineering Informatics*, 43, 101043. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101043>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034620300124>.
- Burman, J.P. (1965). Moving seasonal adjustment of economic time series. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 128(4), 534–558. URL <http://www.jstor.org/stable/2343468>.
- Compare, M., Baraldi, P., and Zio, E. (2020). Challenges to iot-enabled predictive maintenance for industry 4.0. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(5), 4585–4597. doi:10.1109/JIOT.2019.2957029.
- Ferreira, F.J.T.E., Baoming, G., and de Almeida, A.T. (2015). Reliability and operation of high-efficiency induction motors. In *2015 IEEE/IAS 51st Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference (ICPS)*, 1–13. doi:10.1109/ICPS.2015.7266412.
- Finley, W.R., Sauer, B.J., and Loutfi, M. (2015). Motor vibration problems: How to diagnose and correct vibration errors. *IEEE Industry Applications Magazine*, 21(6), 14–28. doi:10.1109/MIAS.2014.2345811.
- Lu, B., Durocher, D.B., and Stemper, P. (2009). Predictive maintenance techniques. *IEEE Industry Applications Magazine*, 15(6), 52–60. doi:10.1109/MIAS.2009.934444.
- Portos, J., Dean, K., Parker, B., and Cannon, J. (2019). Most common mechanisms and reasons for electric motor failures in industry. In *2019 IEEE IAS Pulp, Paper and Forest Industries Conference (PPFIC)*, 1–11. doi:10.1109/PPFIC43189.2019.9052384.
- Rocha, J.T.d., Rodrigues Neto, C.S., Santos, D.R., Vieira, E.C.M., Eugenio, Q.H.d.S., and Campos, C.d.M. (2023). Motores de indução trifásicos para operações industriais. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 9(4), 278289. doi:10.47456/bjpe.v9i4.42440. URL <https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/42440>.
- Thomson, W. and Fenger, M. (2001). Current signature analysis to detect induction motor faults. *IEEE Industry Applications Magazine*, 7(4), 26–34. doi:10.1109/2943.930988.