

## **Análise das Condições Elétricas e Mecânicas de um Motor de Indução Trifásico com a Implementação de Conceitos de Internet das Coisas**

TORNE, ISRAEL GONDRES<sup>1</sup>

*Doctor, Professor of Electrical Engineering at Amazonas State University, Brazil.*

SILVA, RUBEM SILAS DIAS

*Student of Electrical Engineering at Amazonas State University, Brazil*

CAMELO, LEONARDO YUTO SUZUKI

*Master, Professor of Electronic Engineering at Amazonas State University, Brazil*

NASCIMENTO, LENNON. B. F.

*Student of Electrical Engineering at Amazonas State University, Brazil*

PRINTES, ANDRÉ LUIS

*Master, Professor of Electronic Engineering at Amazonas State University, Brazil*

CARDOSO, FÁBIO DE SOUZA

*Doctor, Professor of Electronic Engineering at Amazonas State University, Brazil.*

MARTINS, KAROLAYNE BARBOSA

*Student of Electrical Engineering at Amazonas State University, Brazil*

SOBRINHO, ANGILBERTO MUNIZ FERREIRA

*Doctor, Professor of Electronic Engineering at Amazonas State University, Brazil*

OLIVEIRA, JOZIAS PARENTE

*Doctor, Professor of Electrical Engineering at Amazonas State University, Brazil*

GOMES, RAIMUNDO C. SOUZA

*Doctor, Professor of Electrical Engineering at Amazonas State University, Brazil*

### **Abstract**

*In this article, the authors present a proposal for the implementation of an active methodology using the virtual laboratory tool to support engineering teaching at Amazonas State University located in Manaus, Amazonas, Brazil. From the formulation of the learning problem, formulation of the task and following a previously designed methodological guide, the analysis of variables and selection or obtaining the mathematical models of system or equipment to be researched is started, which will allow to conform the simulation schemes to be used. The objective is to demonstrate that, for example, when selecting the energy efficiency parameter, it is feasible to create*

---

<sup>1</sup> Corresponding author: itorne@uea.edu.br

TORNE, Israel Gondres; SILVA, Rubem Silas Dias; CAMELO, Leonardo Yuto Suzuki; NASCIMENTO, Lennon. B. F.; PRINTES, André Luis; CARDOSO, Fábio de Souza; MARTINS, Karolayne Barbosa; SOBRINHO, Angilberto Muniz Ferreira; OLIVEIRA, Jozias Parente; GOMES, Raimundo C. Souza– **Análise das Condições Elétricas e Mecânicas de um Motor de Indução Trifásico com a Implementação de Conceitos de Internet das Coisas**

---

*a tool, employing computer resources, to help students increase knowledge of the contents that involve this term through the practical tools of simulation.*

**Keywords:** Motor de indução trifásico, MQTT, RTOS.

## 1. INTRODUÇÃO

A maioria das indústrias localizadas no Brasil possui maquinários compostos por motores em sua essência. De acordo com dados de 2019 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), cerca de 35% da energia produzida no Brasil é destinada à classe industrial. Estima-se que os motores elétricos são responsáveis pelo consumo de 50% dessa energia, principalmente os motores de indução trifásico. Apesar da alta confiabilidade, os motores de indução estão sujeitos a fatores que poderão causar falhas, como envelhecimento, condições de instalação, aplicações inadequadas, esforços mecânicos e elétricos, que, na maioria das vezes, acarretam interrupção de processos produtivos. Portanto, em um cenário de competitividade industrial, aumenta-se a cobrança pelo crescimento da disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos e pela redução de custos.

O presente estudo visa o desenvolvimento de uma plataforma de análise das condições elétricas e mecânicas de um motor de indução trifásico com a implementação de conceitos de *Internet das Coisas* (IoT). O sistema é subdividido em duas vertentes, um dispositivo de hardware responsável pela captura do sensoriamento e transmissão dos dados coletados do motor, e uma aplicação em software para o monitoramento da condição do motor.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta os conceitos preconizados para implementação da rede proposta para NLP, juntamente com os métodos para análise de desempenho do modelo.

### 2.1. Motor de indução trifásico

O motor de indução trifásico é o tipo de motor de corrente alternada mais utilizado na indústria, devido à sua simplicidade e facilidade de operação. Um motor de indução depende da ação de um transformador para induzir tensões e correntes no seu circuito de campo, não necessitando de um circuito de campo separado. Motores de indução são aplicados em diversas máquinas, como ventiladores, bombas, sopradores, tornos mecânicos e outros [1].

Motores de indução ficam sujeitos a diversas falhas devido ao seu uso contínuo e por causas externas, podendo ser categorizados em falhas internas e externas, que podem ser classificados mais além como:

- 1) Falhas Elétricas, envolvendo alimentação desbalanceada de tensão ou corrente, falha no aterramento, falha numa das fases etc;
- 2) Falhas Mecânicas, envolvendo falha no enrolamento do rotor e estator, falha no rolamento, desbalanceamento no eixo etc.;
- 3) Falhas ambientais, envolvendo temperatura do ambiente, umidade, contaminação etc.

Assim, para obter uma operação confiável e flexível do motor de indução, o monitoramento dos fatores acima é essencial [2].

## **2.2. Aferição de parâmetros elétricos e mecânicos.**

Para a obtenção de parâmetros elétricos e mecânicos, são utilizados diversos sensores para averiguar as condições de um certo sistema. Para o monitoramento de motores de indução, os principais parâmetros monitorados são vibração, parâmetros elétricos (Tensão e Corrente), emissões acústicas, e temperatura [2] [3].

### **2.2.1. Sensor de vibração**

Para a aferição de vibração, é utilizado uma unidade de medição inercial (IMU). Os sensores IMU são normalmente compostos por um acelerômetro e um giroscópio. O sensor acelerômetro é um instrumento para medição de aceleração, detectando e medindo vibração e medindo aceleração devido a inclinação do corpo. O sensor giroscópio é um instrumento, normalmente montado numa superfície, que pode medir a velocidade angular a partir da rotação da superfície [4].

### **2.2.2. Sensor de corrente elétrica**

Para a aferição de corrente elétrica, é utilizado um transformador de corrente (TC). Transformadores de corrente são utilizados para medição de valores altos de corrente, transformando seu valor numa proporção conhecida para poder facilitar sua medição ou aplicação em instrumentos elétricos. Ele transforma a corrente que circula no primário, que cria um fluxo magnético alternado que induz forças eletromotrizes nos enrolamentos primários e secundários, em uma pequena corrente no secundário, segundo uma proporção [5].

### 2.2.3. Sensor de temperatura

Para a aferição de temperatura, e utilizado um sensor piezo-resistivo. Sensores piezo-resistivos operam baseado no princípio do efeito piezo-resistivo, efeito visto em certos materiais sobre deformação elástica, gerando uma variação na resistência  $r$  e na resistividade  $\rho$ , podendo ser utilizado para medição de temperatura 1001 [6].

### 2.3. Sistemas microcontrolados

Os sistemas de hardware, em geral, possuem em sua composição uma unidade que realizam processamento de dados e ações de controle de periféricos inerentes ao dispositivo. Os sistemas que utilizam microcontroladores para a realização dessas atividades são denominados sistemas microcontrolados [7]. Um microcontrolador, por sua vez, é constituído basicamente por uma unidade central de processamento (CPU), uma memória não volátil para armazenamento do firmware, bem memoria volátil geralmente armazena os dados do programa que são perdidos a cada vez que o sistema se desliga. Além desses elementos, a depender do microcontrolador, ele pode possuir em sua composição outros periféricos como acelerador de criptografia módulo de comunicação wireless, dentre outros [8]. Essas características podem ser visualizadas no diagrama da composição visualizado na figura 1 de um microcontrolador amplamente utilizado.

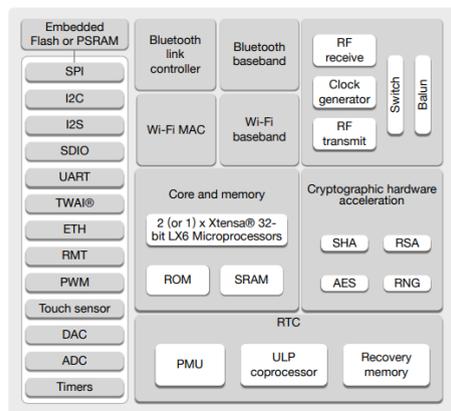
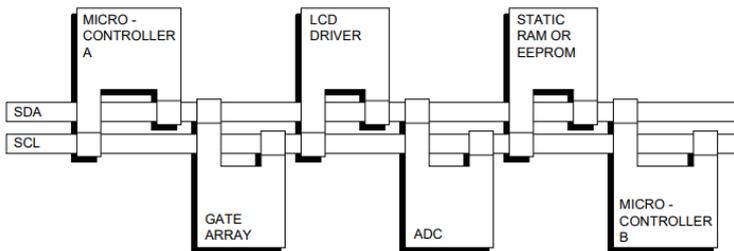


Figura 1. Diagrama do microcontrolador ESP 32. Fonte: [9].

### 2.4. Protocolos de comunicação serial

1) *I2C*: O protocolo *Inter - integrated Circuit* (I2C) é um protocolo de comunicação serial, inicialmente planejado para a conexão de chips periféricos

a uma placa mãe de um computador. Ele foi originalmente projetado pela Philips Semiconductor em 1982. Recentemente, é um protocolo amplamente utilizado para comunicação de curta distância. Esse protocolo utiliza um barramento com duas linhas bidirecionais de dreno aberto para comunicação de dados chamadas *Serial Data (SDA)* e *Serial Clock (SCL)*. A linha SDA é responsável pela transferência de dados e a linha SCL transporta o sinal de *clock*. Nesse barramento *half-duplex* cada dispositivo é reconhecido por um endereço único, seja um microcontrolador, memória ou circuitos integrados (CI) diverso, onde cada um deles podem operar como transmissor ou receptor, dependendo da função do dispositivo [10]. É possível visualizar na figura 2 um exemplo de configuração de um barramento com dois microcontroladores e outros periféricos conectados.



**Figura 2. Configuração de barramento I2C. Fonte: [10].**

A disposição de elementos no barramento que podem atuar como mestre ou escravo a depender do objetivo da comunicação facilita na adição ou remoção de dispositivos, o que é muito útil para aplicações de baixa manutenção e controle em sistemas microcontrolados.

2) *SPI*: O protocolo *Serial Peripheral Interface (SPI)* é um protocolo de comunicação serial síncrono que fornece comunicação *fullduplex*, ou seja, nos dois sentidos de forma simultânea em velocidades muito altas. Esse protocolo é do tipo mestre-escravo que fornece uma interface simples e de baixo custo entre um microcontrolador e seus periféricos. Ele assume a configuração de três ou quatro fios, sendo eles o sinal de *clock*, *Master Output Slave Input (MOSI)*, *Master Input Slave* e *chip select*. A figura 3 mostra a interface SPI com um master e múltiplos slaves.

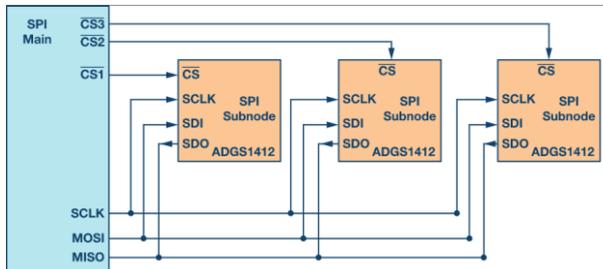


Figura 3. SPI com múltiplos slaves.

## 2.5. Protocolo Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)

MQTT se trata de um protocolo para troca de mensagens via WiFi, originalmente idealizado pela IBM voltado a redes de baixa largura de banda, dispositivos com memória e processamento limitados, além de trabalhar através dos padrões de comunicação *machine-to-server* (M2S), *server-to-server* (S2S) [11].

- 1) Estrutura do protocolo MQTT: A estrutura de comunicação via protocolo MQTT segue o modelo *Publish/Subscriber*. Nesse modelo, há um elemento chave dentro da rede denominado *Broker* responsável por gerir o fluxo de mensagens dentro da rede. Os dispositivos, portanto, trabalham em uma topologia estrela de rede, tendo o *Broker* como dispositivo central, o padrão de comunicação MQTT pode ser conferido na Figura 4.

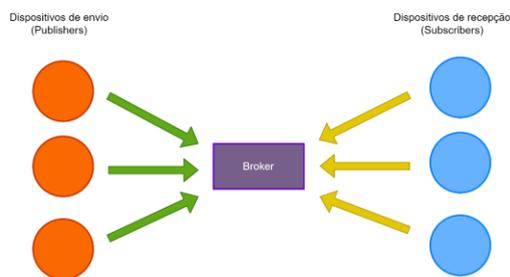


Figura 4. Estrutura de comunicação MQTT.

- 2) Modelo *Publisher/subscriber*: A organização do modelo *Publisher/subscriber* se dá com a definição de tópicos que os dispositivos da rede, denominados *clients*, podem se associar realizando o ato de subscrição, então todos os membros subscritos ao

tópico têm liberdade para enviar e receber mensagens através do tópico utilizado [12].

## **2.6. Sistema operacional de tempo real**

E comum que aplicações de software embarcado utilizem arquiteturas de software sequenciais, orientadas a interrupções ou estruturadas como máquinas de estado, mas conforme as aplicações crescem em complexidade, a implementação dessas arquiteturas pode não atender a todos os requisitos de execução de tarefas. Para tentar resolver possíveis problemas de sincronia e organização de sistema são utilizados os sistemas operacionais, em especial os sistemas operacionais de tempo real. Sistemas operacionais de tempo real, do inglês *real time operational system* (RTOS), e uma subdivisão dentro do conceito de sistemas operacionais voltados a capacidade de um sistema de garantir a periodicidade na execução de uma tarefa [13]. Esse tipo de sistema e normalmente utilizado em aplicações detentoras de requisitos específicos para a frequência em que as tarefas são executadas, e quando a condição temporal não é atendida, o funcionamento da aplicação é comprometido.

Uma importante característica da implementação de RTOS's em um sistema embarcado, e a possibilidade de trazer vários aspectos de um sistema operacional como algoritmos para troca de contexto, escalonadores de tempo etc. que são encontrados em sistemas operacionais de propósito geral, e unir aos serviços de interrupções dedicada a operações de tempo real [14], e então embarcar hardwares com memória e processamento limitado como os microcontroladores.

## **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Esta seção evidencia as ferramentas e os métodos utilizados para solução deste trabalho. O sistema de hardware proposto é composto por 4 elementos principais, como ilustrado na Figura 1. O elemento central é a unidade de controle responsável por gerenciar as medições oriundas dos periféricos de medição e realizar a transmissão dos dados registrados através do protocolo de comunicação *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT), os demais componentes consistem em blocos de hardware dedicados a medição de grandezas como, vibração, temperatura e qualidade de energia elétrica.

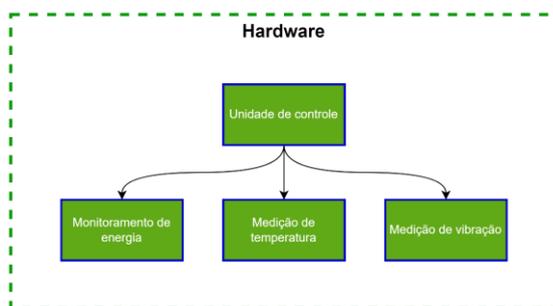


Figura 5- Sistema de hardware. Fonte: Autores.

### 3.1. Materiais utilizados

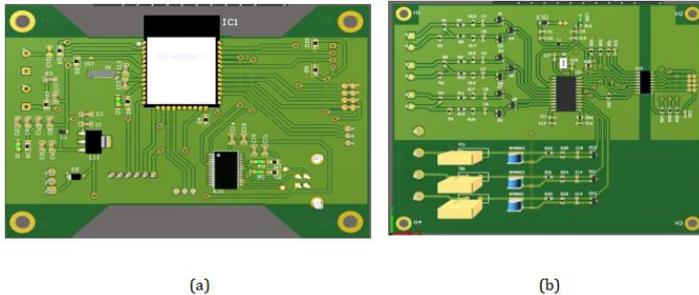
#### 3.1.1. Unidade de controle

Para o desenvolvimento da placa de controle foi utilizado o microcontrolador ESP32-WROOM-32D devido aos recursos disponíveis como sua memória RAM de 520KB, conectividade WiFi, suporte nativo para sistemas operacionais em tempo real, além de sua disponibilidade para dois núcleos de processamento, recursos estes que atendem os requisitos da aplicação proposta. O microcontrolador foi integrado a uma PCB, que dispõe dos recursos necessários para seu funcionamento, além de contar com suporte para estabelecer uma interface de comunicação entre a unidade de controle e os periféricos de medição, foram utilizados os canais de barramento I2C, SPI e UART também disponibilizados pelo microcontrolador. o layout do circuito encontrasse exposto na Figura 4(a).

#### 3.1.2. Unidade de monitoramento

Dado o propósito de medir os parâmetros elétricos do motor de indução trifásico, optou-se por implementar um circuito contendo o circuito integrado ADE 7758 por ser um circuito integrado dedicado a medição de qualidade de energia, e amplamente utilizado na indústria.

Nesta primeira etapa no desenvolvimento da placa foram incluídos no projeto três canais reservados para medição de tensão juntamente com outros três canais para medição de corrente presente no ADE 7758 como pode ser observado na Figura 4(b).



**Figura 6 – Representação em 3D placas de circuito impresso – (a) Placa de Gerenciamento – (b) Medidor de energia.**

Fonte: Autores.

### **3.1.3. Medição de temperatura e vibração**

Compondo os periféricos de medição de parâmetros físicos, tem-se os sensores de temperatura e vibração, para essas duas modalidades de medição fora utilizados os módulos HW-611 e GY-521, que contém internamente os sensores BMP280 para medição de temperatura e MPU 6050 para medição de vibração respectivamente.

Por se tratar de módulos de hardware comerciais, os sensores não foram integrados diretamente na PCB da unidade de controle, os mesmos foram integrados ao sistema por meio de fios conectados ao barramento de comunicação serial I2C do microcontrolador ESP32-WROOM-32D.

## **3.2. Metodologia**

### **3.2.1. Arquitetura de software e firmware**

O sistema proposto é composto por duas funcionalidades principais: A primeira consiste na aquisição e transmissão de dados. Primeiramente é realizada a leitura simultânea de três periféricos de aquisição de dados por meio de uma placa contendo um microcontrolador ESP32-WROOM-32D. Em seguida, os dados coletados são transmitidos via protocolo MQTT. A segunda funcionalidade se trata da recepção e exibição de dados em um dispositivo conectado à mesma rede de computadores do microcontrolador. Esse processo pode ser visualizado na Figura 7.

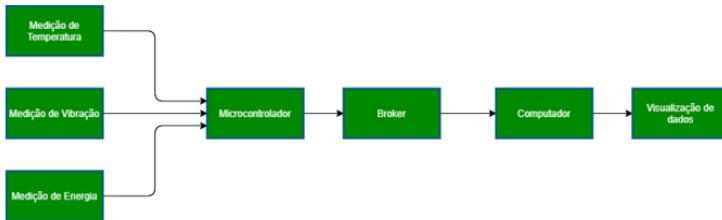


Figura 7 – Arquitetura de software firmware. Fonte: Autores.

### 3.2.2. Desenvolvimento do firmware

A estrutura da aplicação teve como base o sistema operacional de tempo real FreeRTOS, o qual permite separação de diferentes fluxos de processamento denominadas *tasks*. Mediante esta funcionalidade, foram criadas quatro *tasks*, três exclusivas para os periféricos de sensoriamento, e uma destinada a transmissão das medições realizadas ao Broker MQTT. Essa estrutura das *tasks* pode ser verificada na Figura 8.

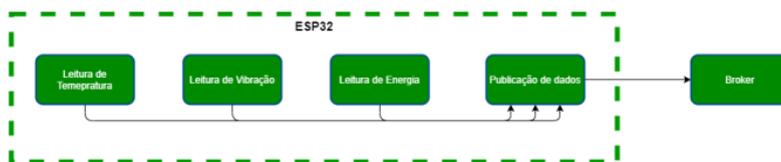
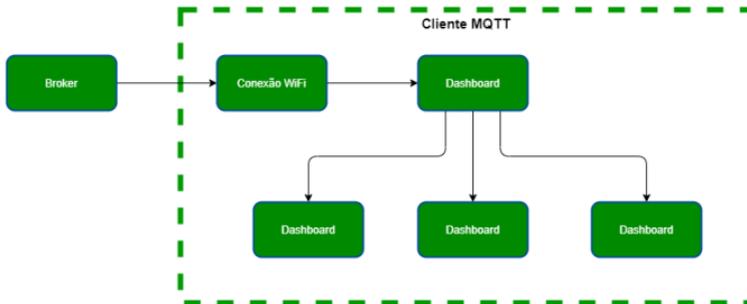


Figura 8 – Arquitetura de firmware. Fonte: Autores.

### 3.2.3. Desenvolvimento da aplicação de visualização

Para a recepção e visualização das medições realizadas pelos sensores, implementou-se um script em linguagem Python. Esse script foi responsável por instanciar um cliente MQTT que recebesse os dados advindos do microcontrolador, e os apresentar em uma interface. A Figura 9 apresenta a divisão das funcionalidades dentro do programa desenvolvido, com a divisão de dois fluxos de processamento entre: conectividade com a internet e uma Dashboard para exibição de dados.



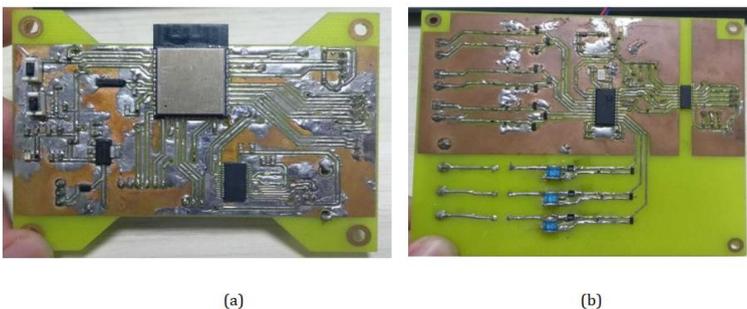
**Figura 9 – Arquitetura de software de visualização.**

Fonte: Autores.

O bloco Dashboard apresentado na Figura 9 consiste em uma interface gerada a partir da biblioteca Tkinter. A interface é dividida em três páginas direcionadas a apresentação de cada parâmetro medido. Outro recurso utilizado foi a função FuncAnimation pertencente a biblioteca Matplotlib, que permite a apresentação periódica de um mesmo gráfico em tela e possibilita a exposição em tempo real dos valores obtidos pelo cliente MQTT.

#### 4. RESULTADOS

Como resultado do desenvolvimento do hardware do sistema embarcado, foram geradas as placas de circuito impressos tanto da unidade de controle quanto do medidor de qualidade de energia, conforme visto na Figura 10, onde é mostrado o estágio final das placas.



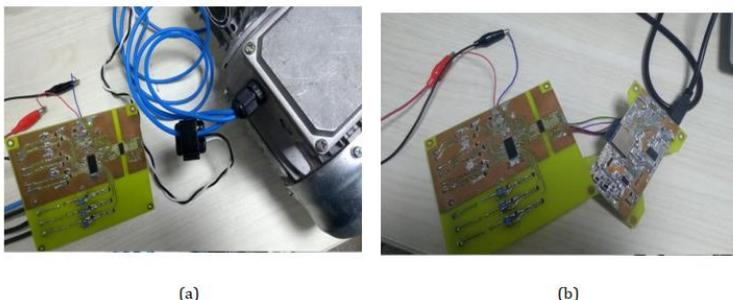
**Figura 10 – Placas de Circuito Impresso montadas – (a) unidade de controle – (b) Medidor de qualidade de energia.**

Fonte: Autores.

TORNE, Israel Gondres; SILVA, Rubem Silas Dias; CAMELO, Leonardo Yuto Suzuki; NASCIMENTO, Lennon. B. F.; PRINTES, André Luis; CARDOSO, Fábio de Souza; MARTINS, Karolayne Barbosa; SOBRINHO, Angilberto Muniz Ferreira; OLIVEIRA, Jozias Parente; GOMES, Raimundo C. Souza- **Análise das Condições Elétricas e Mecânicas de um Motor de Indução Trifásico com a Implementação de Conceitos de Internet das Coisas**

---

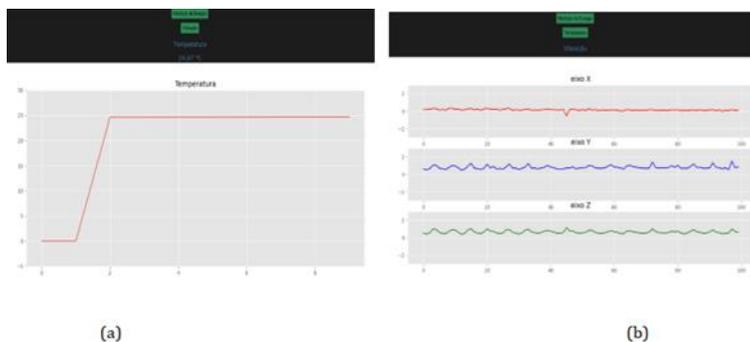
Na Figura 11 encontram-se disponíveis os cenários de testes de integração do hardware do sistema com um motor de indução trifásico.



**Figura 11 – Etapas de testes e validação com o motor de indução trifásicos – (a) Integração do Medidor de energia com motor de indução – (b) Integração da Placa de gerenciamento com Medidor de energia.**

Fonte: Autores.

Visando validar as funcionalidades do firmware, foram realizados testes de integração entre as PCB's, firmware e a aplicação de visualização de dados, que geraram os resultados apresentados na Figura 12.



**Figura 12 – Plotagem em tempo real – (a) Níveis de temperatura – (b) Níveis de vibração aferidos.**

Fonte: Autores.

## 5. CONCLUSÕES

A placa de desenvolvimento apresentou resultados satisfatórios em relação a medição dos sensores de vibração e de temperatura. O calor dissipado pelo motor era mínimo, pois na situação testada, ele estava sem carga no seu eixo.

Todavia, observou-se que as medições de temperatura realizadas pelo sensor eram compatíveis com a temperatura próxima ao motor, porém apresentando pouca variação conforme a variação de temperatura do motor.

Além disso, o sensor de vibração adotado, o acelerômetro, também logrou êxito, visto que foi possível acoplá-lo ao motor e obter sinais de vibração vindas do chassi do motor. Foi possível constatar a resposta de vibração nas ocasiões de partida do motor onde é perceptível maior oscilação no espaço, e no funcionamento estável do motor onde é visto certa constância na vibração.

É importante citar que a região próxima ao motor é suscetível a ruídos eletromagnéticos proveniente das bobinas. Essa interferência eletromagnética veio a interferir no barramento de comunicação I2C, que ligava os sensores de temperatura e vibração à unidade de controle.

O teste realizado com a placa do medidor de energia obteve resultados próximos ao esperado em relações as medições efetuadas de corrente e tensão, contudo, os valores obtidos oscilaram de maneira incomum devido às limitações na montagem da placa. Ainda assim, foram obtidos bons resultados nas leituras dos sensores e no medidor de energia e o desempenho em conjunto das duas placas foi satisfatório durante os testes.

Mediante pesquisas realizadas durante o projeto e o desenvolvimento do sistema, viu-se a possibilidade de extrair informações significantes da análise da vibração do motor. Portanto, uma sugestão para pesquisas futuras seria a análise do espectro de frequência de vibração do motor, além da utilização de inteligência artificial para o reconhecimento do estado da máquina por intermédio das medições realizadas.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. Chapman, **Fundamentos de Máquinas Elétricas – 5ed.** AMGH Editora, 2013.
- [2] A. Choudhary, D. Goyal, S. L. Shimi, and A. Akula, **Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: A review.** *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 26, no. 4, pp. 1221 – 1238, 2019.
- [3] S. Potturi and R. P. Mandi, **Critical survey on IoT based monitoring and control of induction motor.** *IEEE Student Conference on Research and Development (SCoReD)*. IEEE, 2018, pp. 1 – 6.
- [4] I. A. Faisal, T. W. Purboyo, and A. S. R. Ansori, **A review of accelerometer sensor and gyroscope sensor in imu sensors on motion capture.** *J. Eng. Appl. Sci*, vol. 15, no. 3, pp. 826 – 829, 2019.
- [5] E. So, R. Verhoeven, B. Simons, H. V. Parks, and D. Angelo, **A high-precision current transformer for loss measurements of ehv shunt reactors.** *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 6, pp. 1680-1687, 2019.
- [6] A. Fiorillo, C. Critello, and S. Pullano, **Theory, technology and applications of piezoresistive sensors: A review.** *Sensor and Actuators A: Physical*, vol. 281, pp. 156 – 175, 2018.

TORNE, Israel Gondres; SILVA, Rubem Silas Dias; CAMELO, Leonardo Yuto Suzuki; NASCIMENTO, Lennon. B. F.; PRINTES, André Luis; CARDOSO, Fábio de Souza; MARTINS, Karolayne Barbosa; SOBRINHO, Angilberto Muniz Ferreira; OLIVEIRA, Jozias Parente; GOMES, Raimundo C. Souza- **Análise das Condições Elétricas e Mecânicas de um Motor de Indução Trifásico com a Implementação de Conceitos de Internet das Coisas**

---

- [7] D. E. Bolanakis, **A survey of research in microcontroller education**. *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, vol. 14, no. 2, pp. 50 – 57, 2019.
- [8] M. Babiuch, P. Foltýnek, and P. Smutný. **Using the esp32 microcontroller for data processing**. 20<sup>th</sup> International Carpathian Control Conference (ICCC). IEEE, 2019, pp. 1 – 6.
- [9] **Esp32 series datasheet**. [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf), 2022 – 03 – 17.
- [10] **I2C-bus specification and user manual**. <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>, accessed: 2021 – 10 – 02.
- [11] M. B. Yassein, M. Q. Shatnwi, S. Alijwarneh, and R. Al-Hatmi, **Internet of things: Survey and open issues of mqtt protocol**. *International conference on engineering & MIS (ICEMIS)*. Ieee, 2017, pp. 1 – 6.
- [12] D. Soni and A. Makwana, **A survey on mqtt: a protocol of internet of things (IoT)**. *International Conference on Telecommunication, Power Analysis and Computing Techniques (ICTPACT – 2017)*, vol. 20, 2017, pp. 173 – 177.
- [13] G. W. Denardin and C. H. Barriuello, **Sistemas operacionais de tempo real e sua aplicação em sistemas embarcados**. Editora Blucher, 2019.
- [14] A. K. B. Salem, S. B. Othman, and S. B. Saoud, **Hard and soft-core implementation os embedded control application using RTOS**. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. IEEE, 2008, pp. 1896 – 1901.