

Sistema de monitoramento de sinais e controle de motores elétricos trifásicos com integração IoT para aplicações industriais

Signal monitoring system and control of three-phase electric motors with IoT integration for industrial applications

Sistema de monitoreo de señales y control de motores eléctricos trifásicos con integración IoT para aplicaciones industriales

Wesley Paulo Benetti¹

Willian Ricardo Bispo Murbak Nunes²

Resumo: Esse trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de sinais e controle para motores de indução, integrando IoT com o protocolo MQTT. No processo de desenvolvimento, buscou-se a integração de sistemas industriais convencionais com novas tecnologias de IoT para otimizar a manutenção de motores. A metodologia adotada envolveu a criação de uma placa de circuito impresso para aquisição de dados, programação de código embarcado e implementação de uma interface Node-RED para controle remoto. Testes em bancada validaram o sistema em condições reais, demonstrando sua compatibilidade com inversores antigos e a comunicação redundante via MODBUS. Comparado a outros trabalhos da literatura, o sistema proposto se destaca pela flexibilidade, possibilitando a modernização de processos industriais com mínima intervenção estrutural.

Palavras-chave: Manutenção preditiva. Indústria 4.0. Máquinas elétricas.

Abstract: This study presents the development of a signal monitoring and control system for induction motors, integrating IoT through the MQTT protocol. The integration of conventional industrial systems with new IoT technologies was pursued during the development process to optimize motor maintenance. The adopted methodology involved designing a printed circuit board for data acquisition, programming embedded code, and implementing a Node-RED interface for remote control. Bench tests validated the system under real conditions, demonstrating its compatibility with legacy inverters and redundant communication via MODBUS. Compared to other studies in the literature, the proposed system stands out for its flexibility, enabling the modernization of industrial processes with minimal structural intervention.

Keywords: Predictive maintenance. Industry 4.0. Electrical machines.

Resumen: Este estudio presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo de señales y control para motores de inducción, integrando IoT a través del protocolo MQTT. Em el processo de desarrollo, se buscó la Integración de sistemas industriales convencionales con nuevas tecnologías de IoT para optimizar el mantenimiento de motores. La metodología adoptada incluyó la creación de una placa de circuito impresso para la adquisición de datos, la programación de código embebido y la implementación de una interfaz en Node-RED para el control remoto. Las pruebas en banco validaron el sistema en condiciones reales, demostrando su compatibilidad con inversores antiguos y la comunicación redundante a través de MODBUS. En comparación con otros trabajos de la literatura, el sistema propuesto se destaca por su flexibilidad, permitiendo la modernización de procesos industriales con una intervención estructural mínima.

Palabras-clave: Mantenimiento predictivo. Industria 4.0. Máquinas eléctricas.

Submetido 08/11/2024

Aceito 03/04/2025

Publicado 15/04/2025

¹ Graduando em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8060-7711>. E-mail: wesleybenetti@alunos.utfpr.edu.br

² Doutor em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0002-3574-7441>. E-mail: willianr@utfpr.edu.

Considerações iniciais

O motor de indução desempenha um papel fundamental em uma ampla variedade de processos e aplicações industriais, como máquinas de mineração, veículos automotivos (Vanitha et al., 2023; Aktas et al., 2020; Abouzeid et al., 2020), cadeiras de rodas (Nunes et al., 2016), bombas (Shukla et al., 2021), ventiladores (Shukla et al., 2021), elevadores (Othman; Mohammed; Mohammed, 2021), produção de fertilizantes (Toulan et al., 2024) entre outros. Contudo, com o aumento da complexidade dos processos industriais, os métodos tradicionais de manutenção, como a manutenção reativa ou preventiva baseada em intervalo de tempo, tornam-se cada vez menos eficazes. Isso leva à necessidade de estratégias mais avançadas para otimizar a confiabilidade e reduzir o custo de manutenção de sistemas críticos.

Nesse cenário, a manutenção baseada em condições (CBM, do inglês *Condition-Based Maintenance*) tem ganhado destaque no ambiente industrial, permitindo decisões de manutenção mais precisas com base em dados coletados em tempo real (Prajapati; Bechtel; Ganesan, 2012). O monitoramento de condições (MC) e a detecção e diagnóstico de falhas (DDF) em máquinas rotativas têm recebido grande atenção recentemente para maximizar a vida útil (RUL, do inglês *Remaining Useful Life*) e o desempenho de sistemas industriais modernos (Peeters; Antoni; Helsen, 2020; Wang et al., 2020).

Para viabilizar a CBM de forma eficiente, torna-se essencial a adoção de tecnologias capazes de coletar, transmitir e processar dados em tempo real. Nesse contexto, a internet das coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) desempenha um papel importante, permitindo a integração de sensores e sistemas inteligentes para monitoramento contínuo e diagnóstico automatizado. A IoT já está sendo usada para coleta de dados e diagnósticos em várias áreas como: automação residencial (Iyer; Sharma, 2019), sistemas de vigilância (Rai; Rehman, 2019), monitoramento remoto de pacientes, veículos conectados a sistemas de gerenciamento de tráfego, monitoramento do solo e clima na agricultura, automação de irrigação, gestão de recursos em cidades inteligentes, entre outros. A indústria possui demanda para a otimização dos processos produtivos e a manutenção preditiva de equipamentos. No estado da arte constam alguns trabalhos relacionados com o monitoramento de sinais para máquinas de indução.

A integração crescente de soluções de IoT permite o monitoramento remoto de variáveis críticas de máquinas, facilitando a análise em tempo real e a automação da manutenção preventiva. Na comunicação de dados entre os dispositivos com diferentes capacidades

computacionais, observa-se uma variedade de protocolos para aplicações de IoT, entretanto o MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) tem sido o protocolo com maior proeminência nas aplicações (Quincozes et al., 2019). Estudos recentes demonstram a viabilidade de sistemas de monitoramento de motores com integração IoT (Yousuf et al., 2024; Santos et al., 2022; Shukla et al., 2021; Mamatha; Thejaswi, 2021; Ciancetta et al., 2021; Şen; Kul, 2017).

Nesse campo de desenvolvimento, vale mencionar a ferramenta de programação Node-RED, que tem se mostrado vantajosa por ser de código aberto, possuir uma interface *web* intuitiva e ser capaz de conectar vários dispositivos físicos em tempo real (Embong; Asbollah; Hamid, 2024). Em geral, os trabalhos propõem um sistema de monitoramento isolado sem a integração com outros dispositivos de campo como CLP (controlador lógico programável) e inversores de frequência (Shukla et al., 2024; Ioannides et al., 2023; Ichpas e Núñez, 2023; Shehzad et al., 2023; Şen e Kul, 2017). Outros estudos focam na aquisição de dados diretamente do inversor de frequência, responsável pelo acionamento do motor e pela estimativa de algumas variáveis (Embong; Asbollah; Hamid, 2024; Demir e Korkmaz, 2023). No primeiro caso, o sistema apenas coleta e envia os dados para a nuvem, sem interagir com os dispositivos de campo para viabilizar o acionamento e controle da máquina. No segundo caso, a adoção de inversores atualizados nem sempre é viável para as indústrias, limitando o monitoramento das variáveis.

A proposta deste trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema de monitoramento e controle de sinais para motor (SMCM) composto por uma placa de circuito impresso (PCI) contendo circuitos de condicionamento de diferentes tipos de sinais de uma máquina elétrica, tais como: a corrente elétrica em cada uma das fases, a tensão elétrica e a velocidade rotacional. O SMCM pode atuar tanto no CLP quanto no inversor de frequência, permitindo maior integração com sistemas industriais convencionais. Além disso, o sistema efetua a transmissão dos dados coletados para nuvem, via protocolo MQTT. Os dados podem ser visualizados em tempo real por meio de uma *dashboard* desenvolvida no Node-RED, que também possibilita ao usuário realizar o controle do motor de forma remota. Com essa coleta de dados é possível a criação de um banco de dados para o desenvolvimento de diferentes estratégias que apoiem a tomada de decisões em manutenção preventiva.

As principais contribuições desse trabalho consistem em:

1) um SMCM, inédito na literatura, com integração IoT via protocolo MQTT e conectividade com sistemas industriais convencionais, como inversores de frequência e controladores lógico programáveis (CLP), através do protocolo MODBUS;

2) um sistema de controle do motor redundante, que possibilita controlar o motor por meio do SMCM por comunicação direta com o inversor de frequência, em caso de falha do CLP;

3) uma estratégia alternativa de comunicação com o *broker* em caso de falha no *link* entre o SMCM e o servidor. O sistema pode transmitir dados via canal físico MODBUS para o CLP, que pode armazenar os dados ou efetuar a transmissão para o *broker* via MQTT;

4) uma comprovação de funcionamento através de ambiente simulado e experimentalmente em bancada de teste com carga resistiva e com motor de indução trifásico;

5) uma maior flexibilidade do sistema proposto, devido à possibilidade de ser inserido diretamente em processos industriais que contém dispositivos de acionamento antigos, reduzindo o custo de investimento para a integração de um processo à IoT.

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma: a próxima seção apresenta uma explicação da inserção e o princípio de funcionamento do SMCM na área de automação industrial, por meio de uma representação esquemática. Em seguida, é detalhada a metodologia para o desenvolvimento do *hardware* SMCM, especificando cada circuito eletrônico de condicionamento de sinais. A seção subsequente explica o protocolo MQTT, o código desenvolvido para o microcontrolador e a interface gráfica com o usuário elaborada através do Node-RED. Posteriormente, é apresentado o procedimento de validação experimental do sistema. Após essa explanação, o trabalho contém a seção de resultados e discussão, indicando um comparativo com os trabalhos mais recentes do estado da arte. Por fim, encerra-se com as considerações finais e indicações para trabalhos futuros.

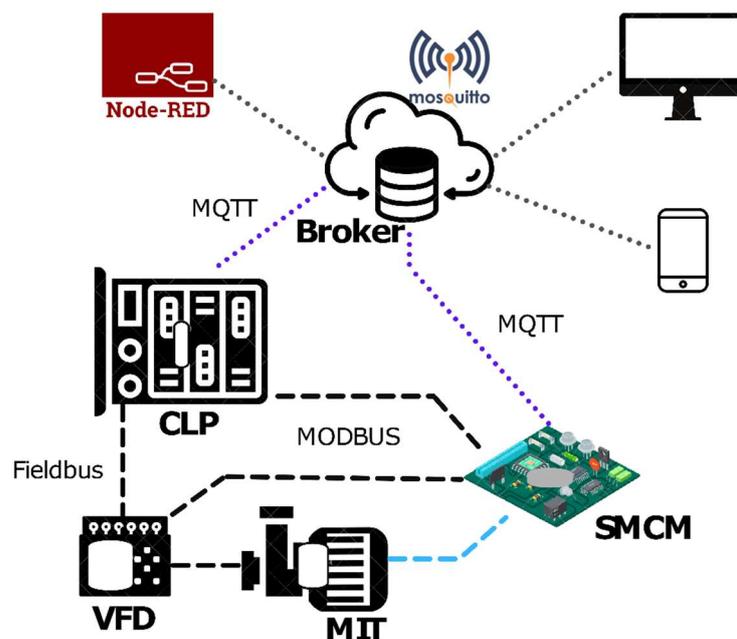
Visão geral do sistema proposto

A Figura 1 ilustra o SMCM desenvolvido neste trabalho, que possibilita efetuar a aquisição de dados e controle do motor. O sistema se conecta a um *broker* por meio do protocolo MQTT e com um CLP utilizando MODBUS. Nas aplicações industriais se utiliza um inversor de frequência, também denominado de VFD (*Variable Frequency Drive*), para realizar o acionamento do motor. O *broker* é um servidor central que intermedia a comunicação entre os

diferentes dispositivos da rede. Uma *dashboard* desenvolvida em Node-RED, pode ser acessada por dispositivos como *smartphones* ou computadores para realizar o controle e monitoramento das variáveis do motor.

Em um sistema de automação, o acionamento e controle de máquinas elétricas em aplicações industriais se dá por meio de CLP se comunicando com inversores de frequência. Há uma variedade de protocolos de comunicação de rede industriais (*fieldbus*) que podem ser utilizados nessa integração. Note que no contexto atual de indústria 4.0, o CLP é um *gateway*, ou seja, pode atuar como ponte entre os diferentes dispositivos, redes, protocolos e sistemas, facilitando a comunicação e fluxo de dados entre eles.

Figura 1 – Representação esquemática do SMCM proposto para uma aplicação industrial.



Fonte: Autores (2024).

Entre os diferenciais do SMCM em relação a sistemas similares está a possibilidade de configurar o sistema para realizar uma comunicação com o *broker* por meio de um caminho alternativo. Em condições normais, os dados coletados do motor são transmitidos pelo SMCM para o *broker*. Porém, em caso de falha no canal de comunicação, o SMCM pode enviar os

dados para o CLP, que atua como um *backup* e avalia a possibilidade de enviá-los para um *broker* hospedado em servidor paralelo.

Outro diferencial importante é a redundância no controle e acionamento do motor por meio do CLP e VFD. Contudo, em caso de falha do CLP, o SMCM pode ser configurado para assumir a responsabilidade de comando do VFD, garantindo uma operação segura do sistema de acionamento do motor.

Metodologia

O SMCM proposto neste trabalho foi desenvolvido em quatro etapas: 1) concepção e simulação dos circuitos; 2) testes preliminares dos circuitos em bancada; 3) desenvolvimento de *layout* e montagem da PCI; e 4) validação experimental.

O sistema de monitoramento proposto é composto por: 1) circuito de condicionamento de sinais de corrente; 2) circuito de condicionamento de sinais de tensão; 3) circuito de condicionamento dos sinais do *encoder*; 4) entrada de corrente alternada automática e regulação de tensão contínua simétrica; e 5) conexão com microcontrolador para processamento dos dados e integração com protocolos de comunicação MQTT e MODBUS.

O monitoramento das correntes de cada fase da alimentação do motor de indução trifásico (MIT) foi realizado com o sensor linear ACS-712, cujo funcionamento se baseia no efeito Hall.

O sinal proveniente do sensor requer ajuste em sua amplitude para adequação à aquisição pelo conversor AD do microcontrolador. Na instrumentação eletrônica, o circuito responsável por essa adequação é denominado de circuito de condicionamento. Assim, para cada fase do sistema, utiliza-se um circuito de condicionamento de sinal de corrente idêntico ao apresentado na Figura 2, derivado do trabalho de Nunes et al. (2016).

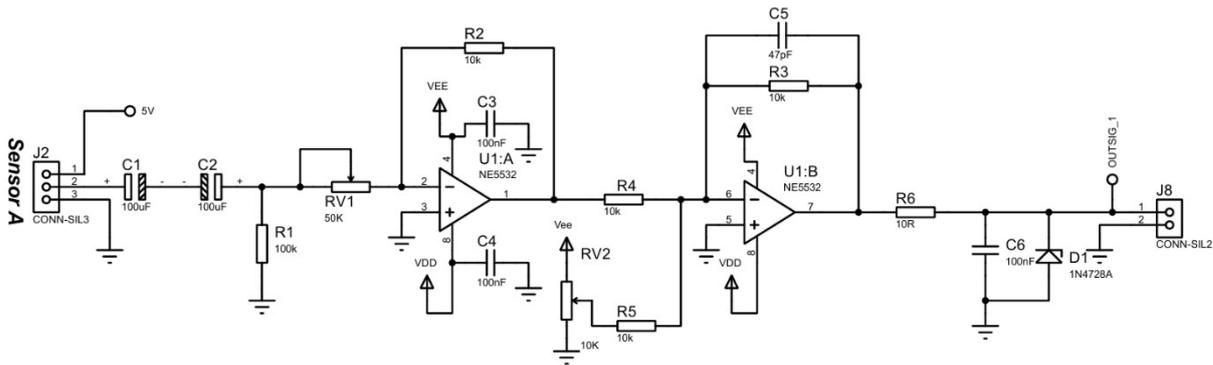
O conector J2 possui pinos ligados na alimentação de +5 V e no potencial de referência de 0 V, possibilitando alimentar o módulo sensor de corrente ACS-712. O pino 2 é o sinal de saída do sensor e passa pelo capacitor C1 que atenua a componente de corrente contínua (CC). Já C2 e R1 formam um filtro passa alta. O primeiro amplificador operacional (AMPOP) U1:A está no modo amplificador inversor, com RV1 capaz de ajustar seu ganho. Já o segundo AMPOP U1:B consiste em um somador com ganho inversor unitário e possui um circuito de *offset* composto por RV2 e R5. Por fim, R6 e C6 formam um filtro passa baixa e D1 é um diodo

zener que tem a função de limitar a tensão em até 3,3 V, limite de tensão suportada pela entrada analógica do ESP32. A frequência de corte dos filtros pode ser facilmente encontrada usando a relação $\omega_c = \frac{1}{RC}$, onde ω_c é a frequência de corte dada em rad/s. A tensão de saída do circuito $v_{i-out}(t)$, considerando a configuração dos AMPOP, é dada por (1):

$$v_{i-out}(t) = \frac{R2}{RV1} v_{sig}(t) + v_{id}(t) \quad (1)$$

onde $v_{sig}(t)$ é o sinal proveniente do sensor de corrente e $v_{id}(t)$ é o valor ajustado para o deslocamento.

Figura 2 – Circuito de condicionamento de sinal de corrente para cada fase do sistema.



Fonte: Autores (2024).

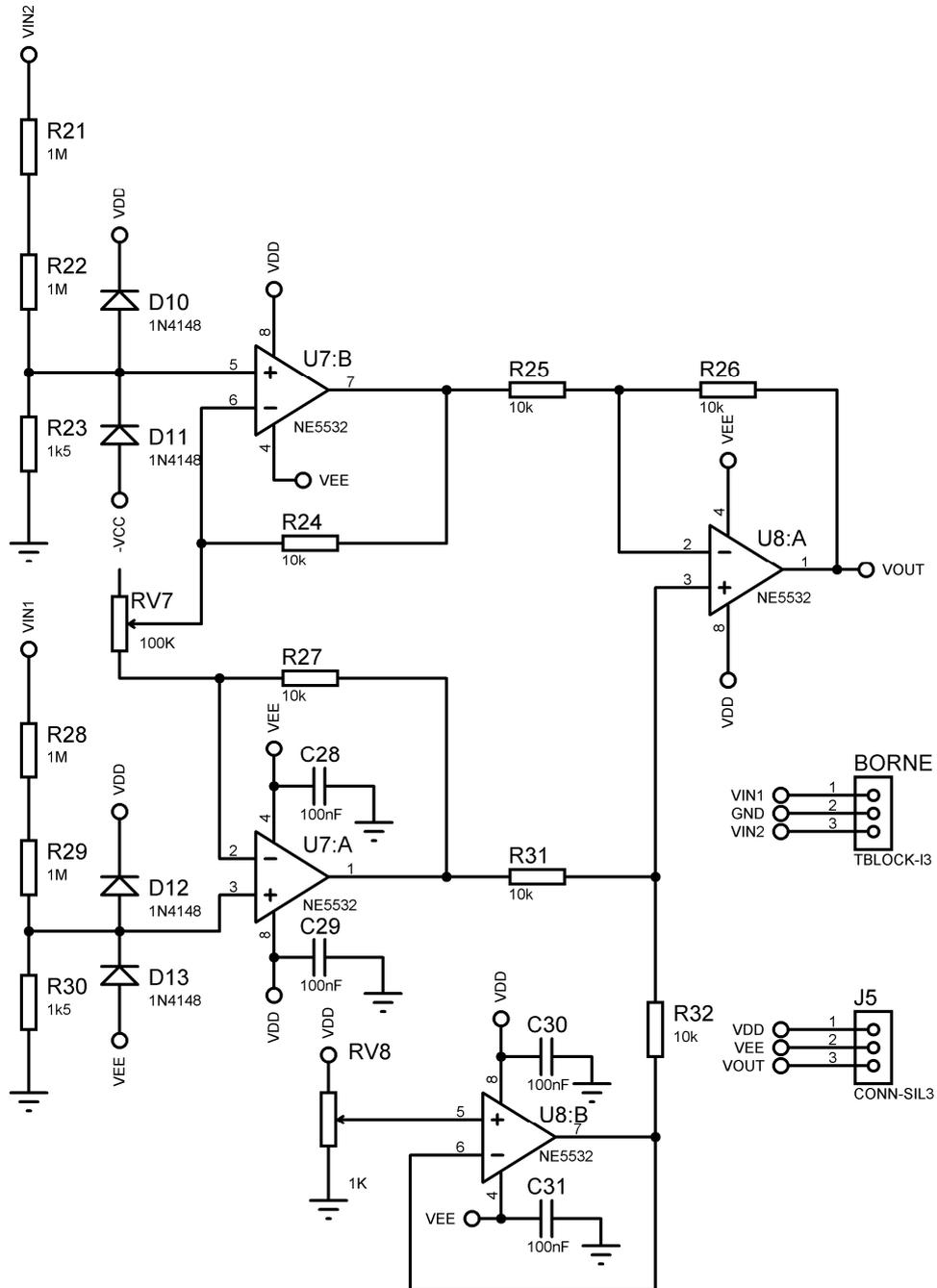
O circuito de condicionamento de tensão, inspirado em Nunes et al. (2016), realiza a medição por meio de um divisor resistivo combinado a uma estrutura de amplificador de instrumentação, conforme ilustrado na Figura 3.

O primeiro estágio do circuito de condicionamento consiste nos divisores de tensão, que produzem as tensões de entrada $v_1(t)$ e $v_2(t)$ nos AMPOPs U7:A e U7:B, respectivamente, obtidas a partir das tensões de alimentação do motor $V_{in1}(t)$ e $V_{in2}(t)$. Assim, obtêm-se (2) e (3):

$$v_1(t) = \frac{R30}{R28 + R29 + R30} V_{in1}(t) \quad (2)$$

$$v_2(t) = \frac{R23}{R21 + R22 + R23} V_{in2}(t) \quad (3)$$

Figura 3 – Circuito de condicionamento de sinal de tensão.



Fonte: Autores (2024).

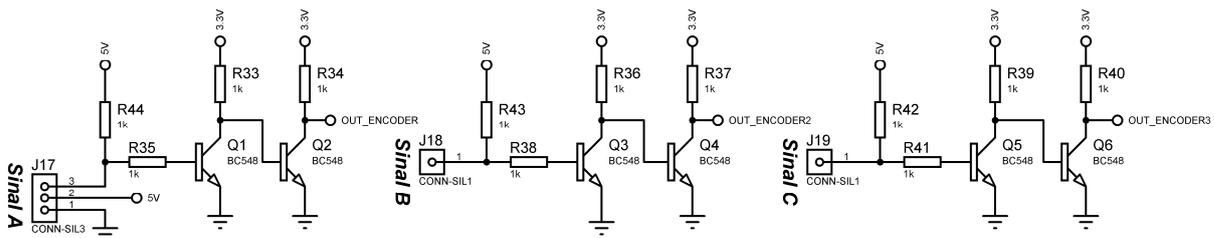
A tensão de saída do circuito de condicionamento de tensão $v_{v-out}(t)$ é dada pela relação proveniente da topologia do circuito amplificador de instrumentação, cuja expressão final é dada por (4):

$$v_{v-out} = \left(1 + \frac{2R}{R_{pot}}\right)(v_1 - v_2) + v_{vd}(t) \quad (4)$$

onde $v_{vd}(t)$ é o sinal de deslocamento ajustado por meio do *trimpot* RV8, $R_{pot} = RV7$ e $R = R32 = R31 = R24 = R25 = R26 = R27$.

O *encoder* utilizado tem uma resolução de 4096 pulsos por rotação, com alimentação de 5 a 24 V. Considerando que a tensão máxima lida pelo microcontrolador ESP32 é 3,3 V, foi utilizado um circuito de condicionamento com transistores bipolares operando no modo corte e saturação, conforme mostrado na Figura 4. A tensão de alimentação de 3,3 V é obtida do regulador proveniente do ESP32.

Figura 4 – Circuito de condicionamento de sinais do *encoder*.

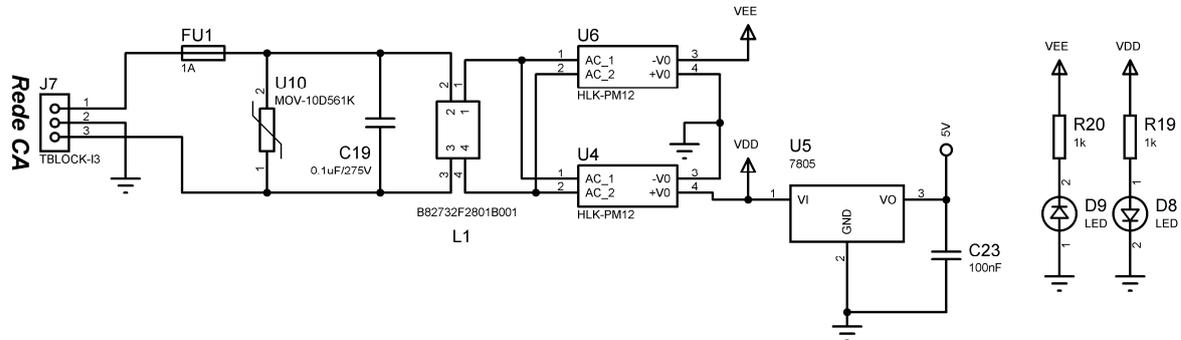


Fonte: Autores (2024).

Para alimentar o circuito são necessárias tensões simétricas de ± 12 V para os AMPOPs e alimentação de +5 V para o ESP32 e os sensores ACS-712. O circuito de alimentação é mostrado na Figura 5. Esse circuito pode receber de 100 VAC a 240 VAC e possui um fusível de 1 A, um capacitor, varistor e um indutor em modo comum com o objetivo de evitar sobretensões, sobrecorrentes e interferências. Duas fontes modelo Hi-Link HLK-PM12 são usadas de forma paralela para obter tensão alternada simétrica de 12 VDC. Um regulador linear LM7805 é usado para obter tensão regulada de 5 V.

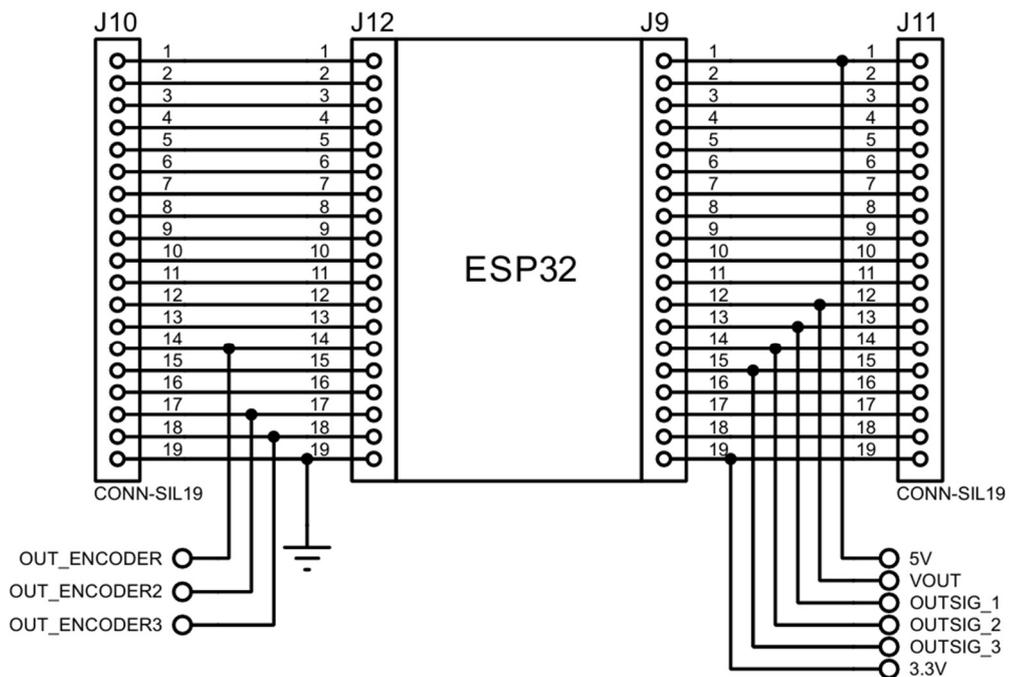
As conexões realizadas com ESP32-WROOM de 38 pinos estão indicadas na Figura 6. A placa de circuito impresso contempla conectores do tipo barras de pinos J10 e J11 paralelos aos pinos do microcontrolador, possibilitando acesso facilitado na leitura de sinais. Nos pinos GPIO 34, 35 e 32 estão conectados os sinais provenientes do circuito de condicionamento de corrente *OUTSIG1*, *OUTSIG2* e *OUTSIG3*, respectivamente. No pino GPIO 33 está conectado o sinal proveniente do circuito de condicionamento de tensão.

Figura 5 – Circuito da fonte de alimentação com dupla tensão alternada.



Fonte: Autores (2024).

Figura 6 – Conexões do microcontrolador ESP32.



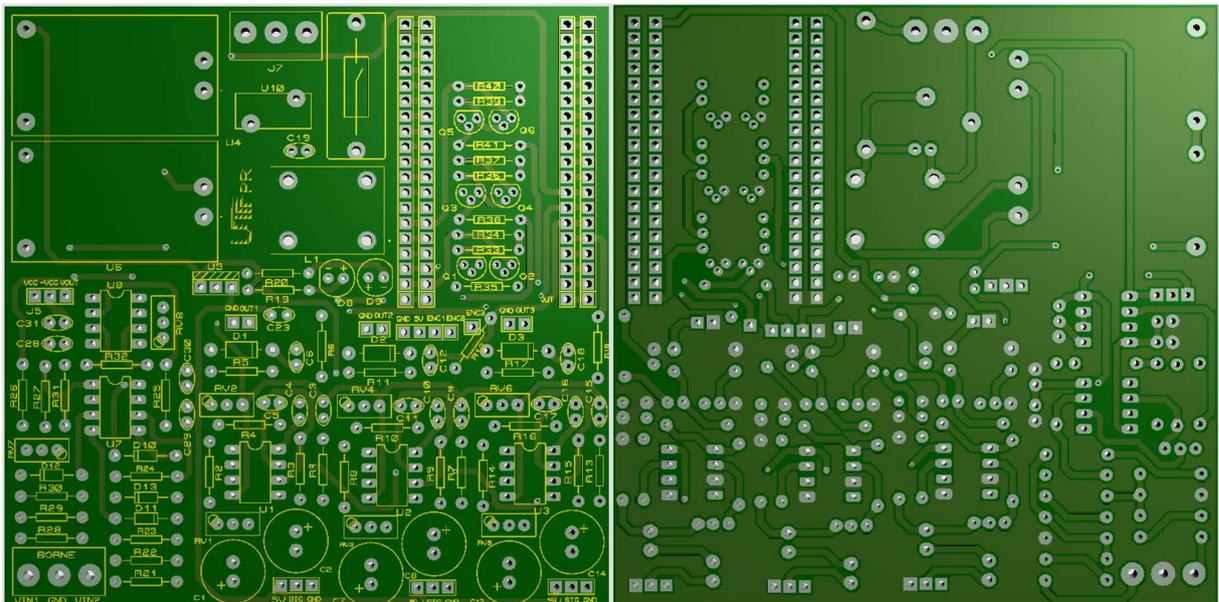
Fonte: Autores (2024).

Os GPIO's 23, 22 e 21 estão conectados aos três sinais do *encoder* (A, B e zero). O sinal de +5 V da fonte de alimentação é conectado no ESP32 para sua alimentação e a saída do regulador do ESP32 de 3,3 V é utilizada para o circuito de condicionamento de sinais do *encoder*. Para realizar a comunicação do microcontrolador com outros dispositivos (CLP ou inversor) é através do protocolo MODBUS/TCP, cuja implementação foi por meio do circuito comercial *Ethernet Shield W5100* via SPI (*Serial Peripheral Interface*). Com isso, o sistema

proposto suporta 16 kB de memória para *buffers* de transmissão e recepção, velocidade de conexão de até 100 Mbps e possibilidade de transmissão e recepção de dados simultâneo (modo de operação *full-duplex*).

O desenvolvimento do *layout* da placa eletrônica foi realizado para componentes eletrônicos do tipo THT (*Through-Hole Technology*). A Figura 7 apresenta o *layout* concebido para a PCI. O material da placa escolhido foi fibra de vidro FR-4, com dimensões de 10x10 cm, espessura 1,6 mm, trilhas com largura de no mínimo 40 mils (milésimos de polegadas).

Figura 7 – *Layout* da PCI desenvolvida, face superior à esquerda e face inferior à direita.



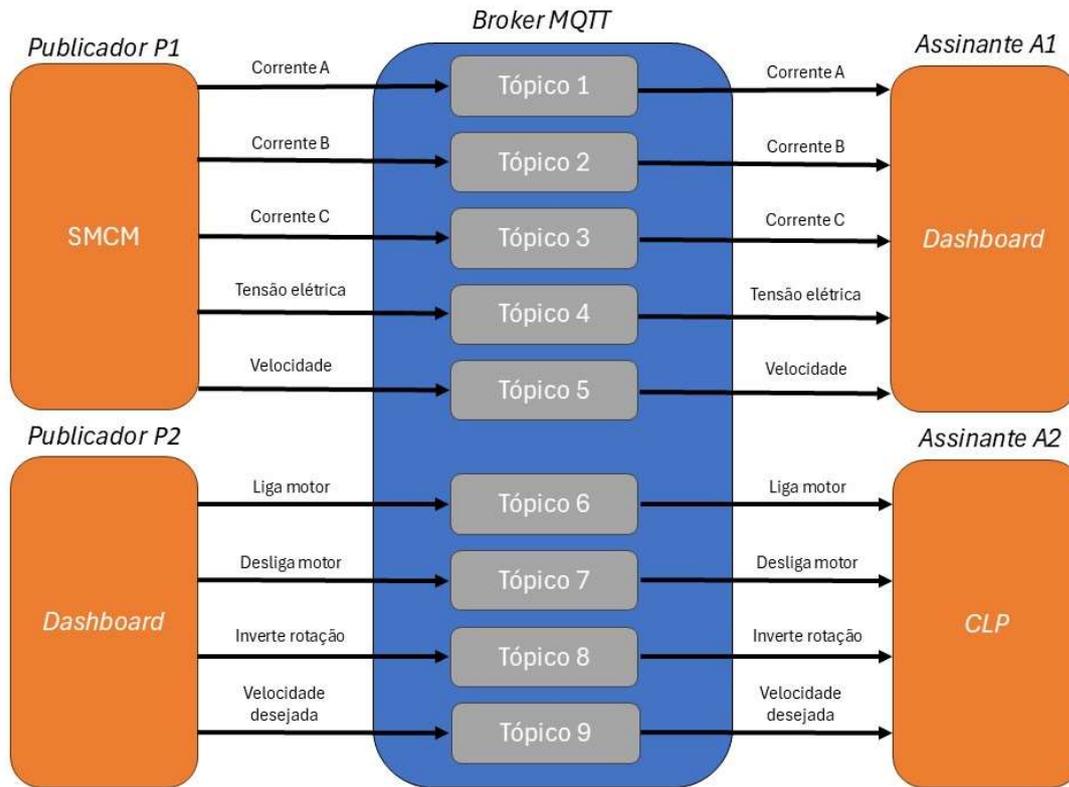
Fonte: Autores (2024).

Quanto ao desenvolvimento do *software*, o SMCM utiliza o protocolo de comunicação MQTT para enviar dados para a nuvem. O MQTT realiza a comunicação por um paradigma denominado de *publish/subscribe* (publicador/assinante). Os clientes assinam tópicos de interesse em um servidor centralizado chamado *broker* MQTT. O *broker* pode gerenciar múltiplos tópicos, permitindo a recepção de mensagens de diferentes dispositivos publicadores e distribuindo-as para vários assinantes do tópico.

A Figura 8 ilustra um cenário de aplicação IoT do sistema proposto neste trabalho. O publicador P1 é o SMCM, que publica os dados correspondentes aos sinais monitorados das correntes elétricas de cada fase, a tensão elétrica e velocidade do motor, respectivamente nos

tópicos de 1 a 5.

Figura 8 – Cenário de comunicação entre os dispositivos via protocolo MQTT.



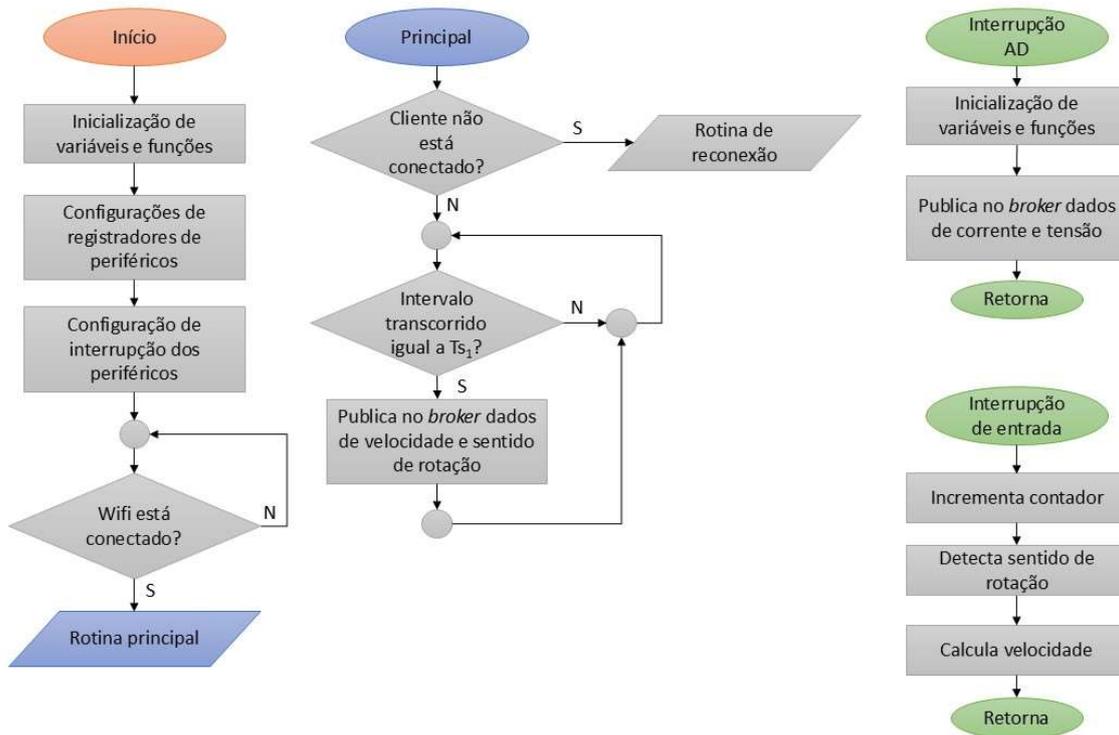
Fonte: Autores (2024).

Nesse cenário há um assinante A1, que manifesta o interesse em receber as informações provenientes dos tópicos de 1 a 5. O assinante A1 trata-se de um painel de controle em um computador ou celular contendo a *interface* com o usuário (*dashboard*). A *dashboard* também se enquadra como publicador P2, responsável em enviar os sinais de comando para o motor como ligar, desligar, inverter rotação e velocidade desejada, respectivamente nos tópicos de 6 a 9. O assinante A2 é o CLP que recebe as informações de comando para acionamento do motor e então realiza o comando do VFD através do protocolo MODBUS.

A Figura 9 apresenta o fluxograma do programa embarcado no SMCM. Inicialmente realiza-se a inicialização de variáveis, a configuração do registrador do conversor analógico para digital (CAD), leitura dos sinais analógicos, a definição dos pinos de entrada e saída do microcontrolador e a habilitação de rotinas de interrupção do CAD e de mudança de estado do

pino digital correspondente ao *encoder*. Após essa etapa, foi programado uma verificação de conexão com a rede internet por meio do módulo *Wifi*, através de acesso com usuário e senha.

Figura 9 – Fluxograma do código embarcado no SMCM.



Fonte: Autores (2024).

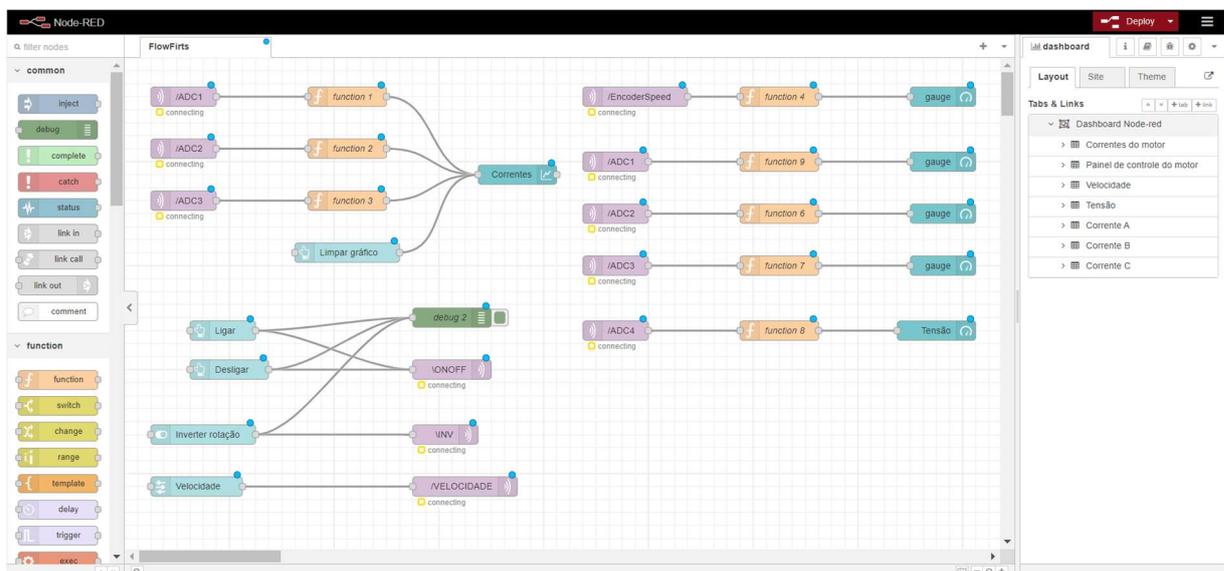
Em seguida o microcontrolador executa a rotina principal de repetição das tarefas, que inclui a verificação de cliente conectado ao MQTT. Caso a conexão não seja bem-sucedida, uma rotina de reconexão MQTT é promovida com o *broker*. Caso a conexão esteja adequada, verifica-se se o intervalo de tempo de publicação de mensagens do *encoder* Ts_1 foi alcançado, então envia-se os dados para os respectivos tópicos do *broker* MQTT. Note que esse evento é realizado continuamente dentro da tarefa principal.

Durante a execução da rotina principal, o microcontrolador pode suspender temporariamente essa tarefa em resposta à ocorrência de uma interrupção. No sistema SMCM, foram configuradas duas interrupções: a primeira, baseada em temporização, para realizar a conversão analógica-digital dos sinais de tensão e corrente elétrica; e a segunda, para a detecção de mudanças no nível lógico do pino conectado ao *encoder*.

Na interrupção do conversor AD, o microcontrolador realiza a conversão simultânea dos quatro sinais provenientes dos circuitos de condicionamento e publica os valores nos respectivos tópicos do *broker* MQTT. Quando a interrupção ocorre na entrada digital, é incrementada uma variável de contagem, conforme o sentido de rotação detectado. A determinação do sentido de rotação depende da defasagem entre os sinais A e B: se B apresentar uma defasagem de 90° em relação a A, considera-se o sentido horário; caso B tenha uma defasagem de -90° , o sentido é anti-horário. Por fim, após o tratamento de cada rotina de interrupção, a unidade de processamento retorna à rotina principal.

A interface com o usuário foi realizada em Node-RED, conforme apresentado na Figura 10. À esquerda há os nodes com funcionalidades para o desenvolvimento das aplicações. No centro há a criação realizada contendo os fluxos de informações e as conexões dos nodes utilizados. À direita aparece as configurações de propriedades de um determinado selecionado.

Figura 10 – Página de desenvolvimento do Node-RED.



Fonte: Autores (2024).

O resultado final da *dashboard* elaborada como interface visual com o usuário é mostrado na Figura 11. Essa *dashboard* possibilita o monitoramento das variáveis dinâmicas do motor como corrente elétrica, tensão e velocidade, além de botões para controle e acionamento do motor.

Além disso, para a implementação do *broker* MQTT foi utilizado o Eclipse Mosquitto,

que é um *broker* MQTT de código aberto e oferece algumas vantagens como: o funcionamento em diferentes plataformas de sistemas operacionais, a possibilidade de conexões de ponte entre diferentes *brokers* MQTT, o armazenamento de mensagens quando os destinatários não estão conectados, entre outros.

Figura 11 – *Dashboard* para visualização dos dados e interação com o usuário.



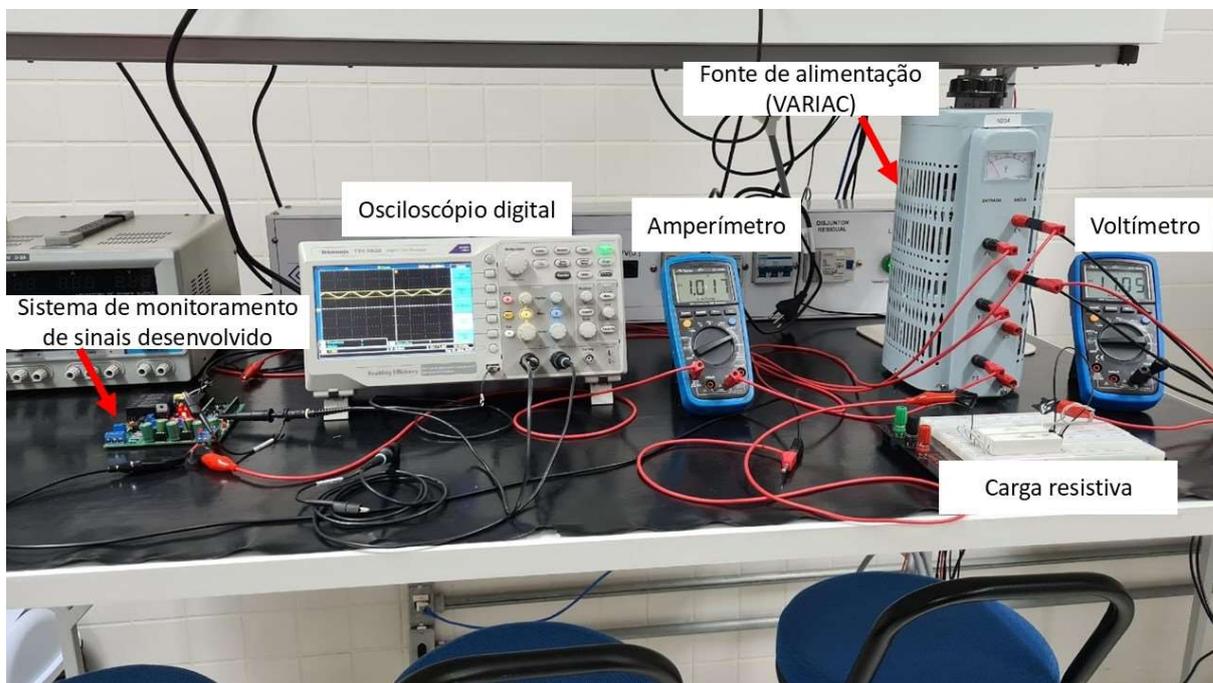
Fonte: Autores (2024).

A primeira etapa de validação experimental foi realizada em uma bancada, conforme ilustrado na Figura 12. Por meio de uma fonte de alimentação trifásica ajustada em um valor eficaz de 220 V, testou-se o circuito de condicionamento de sinais de tensão, enquanto a aquisição dos sinais foi feita com um osciloscópio. O circuito de condicionamento de corrente, por sua vez, foi avaliado a partir da aquisição de um sinal de 1 A proveniente de uma carga resistiva.

Após a calibração do circuito de condicionamento no ensaio anterior, procedeu-se à validação experimental com o motor de indução de 1/4 CV, tensão de alimentação 220 V, corrente nominal de 1,072 A, 4 polos, conforme apresentado na Figura 13.

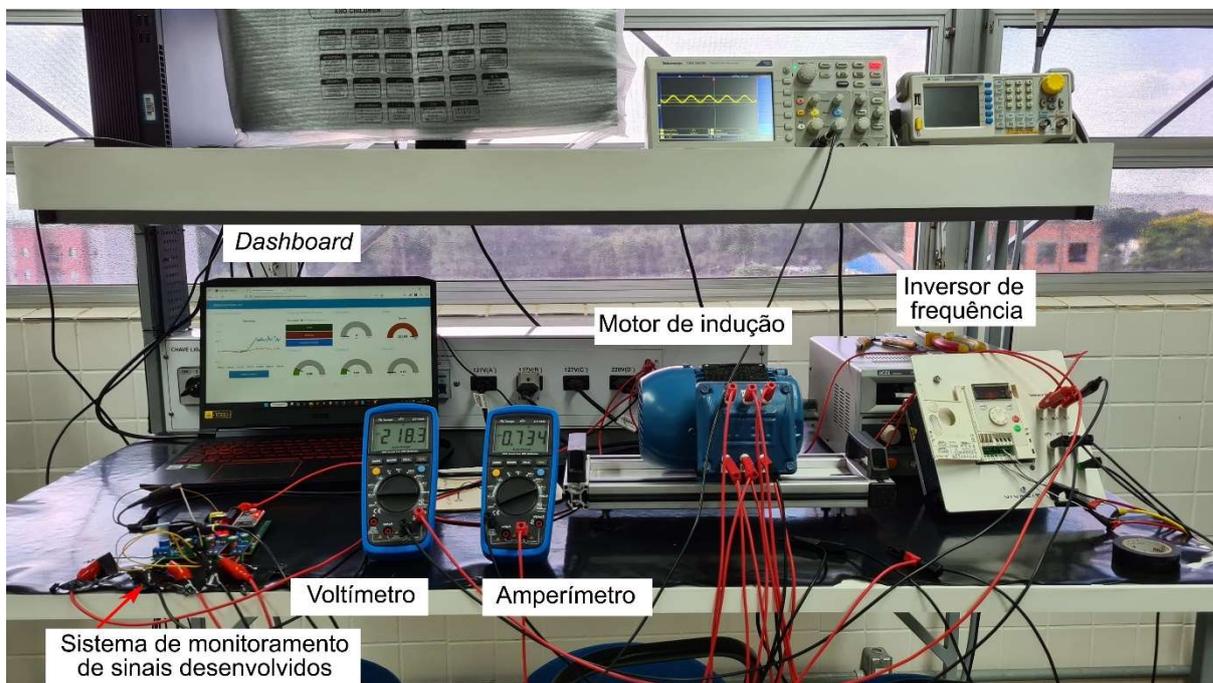
O motor foi controlado por um inversor de frequência, modelo ATV12 da Schneider Electric, conectado a um controlador lógico programável (CLP) XP325 da Altus. A corrente de duas fases do motor foi monitorada, enquanto uma terceira foi medida por um multímetro.

Figura 12 – Bancada de teste para calibração dos circuitos de condicionamento.



Fonte: Autores (2024).

Figura 13 – Bancada de teste experimental com motor de indução.

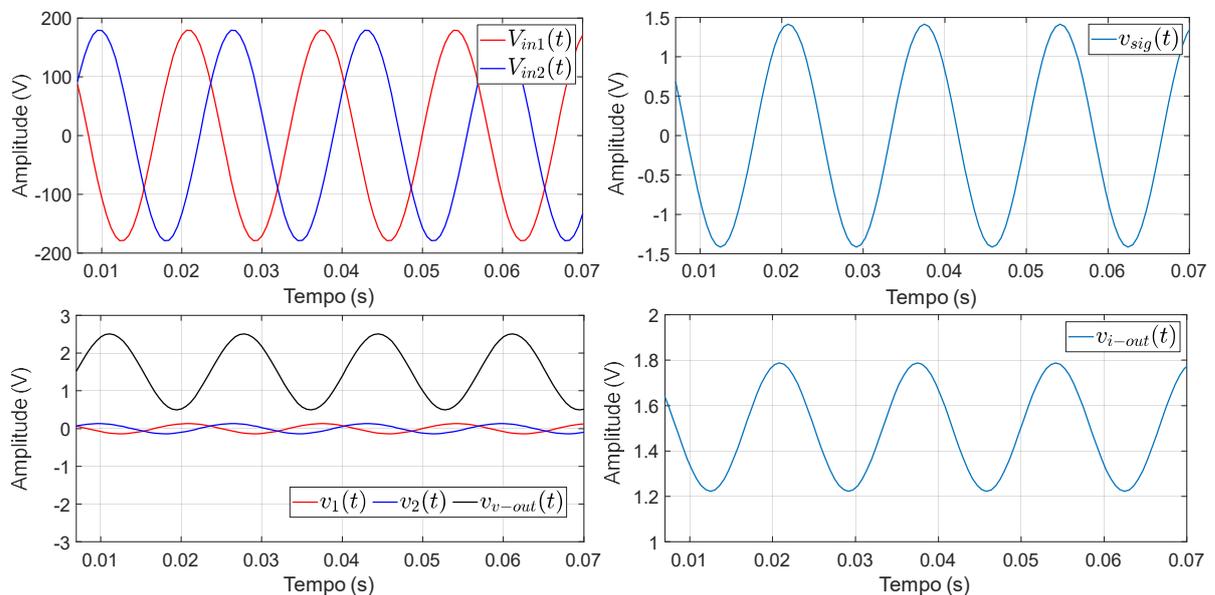


Fonte: Autores (2024).

Análise de dados e resultados

A primeira etapa do desenvolvimento do SMCM consistiu na simulação dos circuitos. Os resultados de simulação dos circuitos de condicionamento de corrente e tensão são apresentados na Figura 14. Nota-se que os sinais de tensão e corrente puderam ser ajustados para níveis de tensão que são compatíveis ao do microcontrolador.

Figura 14 – Resultado de simulação dos circuitos de condicionamento de sinais de corrente e tensão.

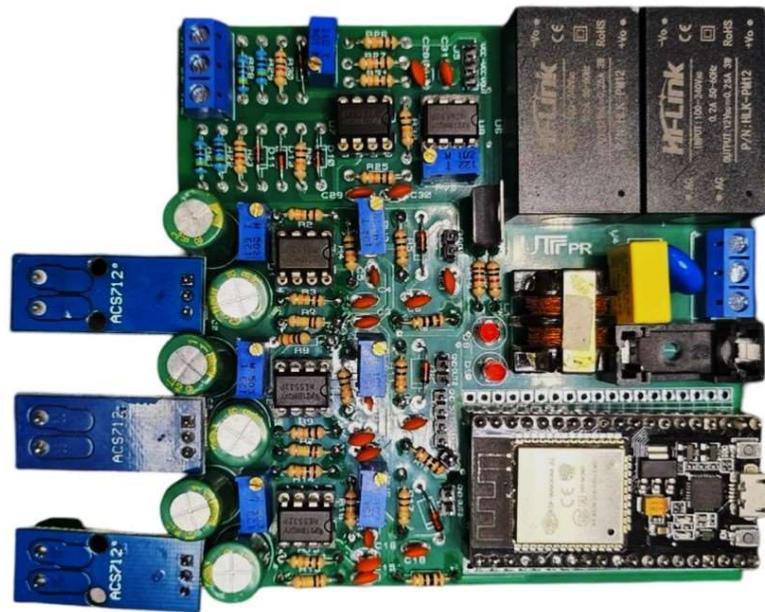


Fonte: Autores (2024).

Após o desenvolvimento do *layout* e a confecção da placa de circuito impresso realizou-se o processo de montagem do SMCM por meio de soldagem de cada componente eletrônico, cujo resultado é apresentado na Figura 15.

Com o sistema montado, foram realizados testes na bancada experimental dos circuitos de condicionamento com uma carga resistiva. A partir desse ensaio foi possível realizar os ajustes de ganhos dos amplificadores operacionais e de *offset* para adequar os níveis de tensão proveniente da medição com o microcontrolador ESP32.

Figura 15 – Placa montada para o SMCM proposto.



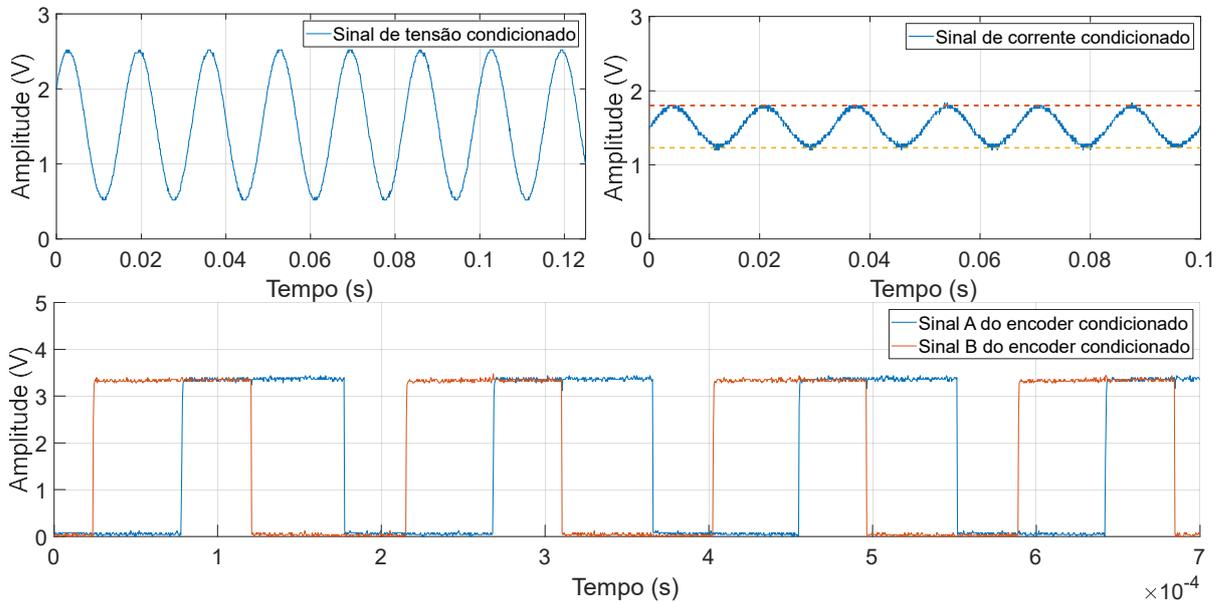
Fonte: Autores (2024).

A Figura 16 apresenta os resultados experimentais obtidos da medição da tensão elétrica, corrente elétrica e do *encoder*. O sinal de tensão é proveniente de uma fonte trifásica com valor eficaz de 220 V. Nota-se que o resultado obtido do circuito de condicionamento foi satisfatório com a conversão do sinal de tensão de 220 V para 2 Vpp e *offset* de 1,5 V.

O sinal de corrente foi ajustado de um *offset* de 2,5 V (saída do sensor) para 1,5 V e com reajuste de amplitude de pico. A Figura 16 também contém os sinais A e B provenientes do circuito de condicionamento do *encoder* no teste experimental. Nesse caso os sinais A e B estão defasados e com amplitude de tensão de 3,3 V e 0 V, que corresponde aos níveis lógico alto e baixo, respectivamente.

A partir da bancada de teste com motor de indução foi possível realizar a validação da *dashboard*. A Figura 17 apresenta o monitoramento em tempo real do valor eficaz dos sinais de corrente, valor eficaz de tensão de linha do motor e a velocidade. Além disso, o usuário pode realizar comandos de partida, desligamento e inversão do sentido de rotação do motor por meio dessa interface.

Figura 16 – Resultado experimental do condicionamento de tensão $v_{v-out}(t)$, de corrente $v_{i-out}(t)$ e velocidade considerando uma carga resistiva conectada ao SMCM.



Fonte: Autores (2024).

Na literatura, constam alguns trabalhos que foram desenvolvidos no escopo de monitoramento dos sinais de motores elétricos. A Tabela 1 lista os trabalhos mais recentes no estado da arte, possibilitando a análise comparativa de quantidade de sinais monitorados, especificação e estrutura de *hardware* para implementação de cada um dos sistemas e as principais desvantagens entre eles.

Figura 17 – *Dashboard* em ensaio de validação experimental com motor de indução.



Fonte: Autores (2024).

Tabela 1 – Análise comparativa do sistema proposto em relação ao estado da arte.

Autores	Sinais monitorados	Hardware do sistema IoT	Desvantagens
Şen e Kul (2017)	3 correntes, 1 velocidade 1 temperatura	NXP LPC1769 + sensores	Não realiza controle de acionamento do motor. Ausente sinais de tensão e vibração.
Shukla et al., (2022)	1 vibração, 1 corrente, 1 temperatura	ESP32 + sensores	Aplicação somente para motor monofásico. Ausente sinal de vibração e velocidade.
Ichpas e Núñez (2023)	3 correntes, 1 tensão, 1 temperatura	ATMEGA2560 + ESP32 + sensores	Não comunica com dispositivos industriais. Ausente vibração e velocidade.
Demir e Korkmaz (2023)	1 corrente, 1 tensão, 1 temperatura	Raspberry Pi + VFD	Dados estimados pelo VFD e sem controle de acionamento. Ausente sinais de vibração e velocidade.
Embong, Asbollah e Hamid (2024)	1 corrente, 1 tensão, 1 velocidade	CLP + VFD	Dados estimados pelo VFD. Ausente sinais de vibração e temperatura
Este trabalho	3 correntes, 1 tensão, 1 velocidade	ESP32 + VFD + CLP + sensores	Ausente sinais de vibração e temperatura.

Fonte: Autoria própria.

No trabalho de Sen e Kul (2017), foi proposto um sistema para monitoramento de sinais de corrente, velocidade e temperatura de um motor acionado em partida direta. No entanto, os autores não previram a possibilidade de adoção de outras técnicas de controle e acionamento do motor, tampouco integraram o sistema a outros dispositivos de campo na automação, adotando o Zigbee como protocolo de comunicação.

No estudo de Shukla et al. (2022), há uma limitação no monitoramento de dados, pois o sistema foi projetado para um motor monofásico, permitindo apenas a leitura de uma variável

de tensão e uma de corrente. Além disso, o sistema não permite a integração com outros dispositivos industriais, nem oferece ao usuário a possibilidade de enviar comandos de acionamento do motor a partir de uma interface gráfica

Ichpas e Núñez (2023) desenvolveram um sistema que monitora sinais de tensão, corrente e temperatura de um motor trifásico. Contudo, a validação foi realizada apenas com partida direta, que não é ideal para aplicações industriais, pois pode gerar correntes de 6 a 8 vezes a corrente nominal do motor. Esse aumento pode causar sobrecarga na rede, desgaste mecânico, aquecimento e reduzir a vida útil da máquina. Além disso, o sistema também não permite a integração com outros dispositivos de automação para controle do motor por meio de um protocolo de comunicação.

Tanto Demir e Korkmaz (2023) quanto Embong, Asbollah e Hamid (2024) propuseram um sistema que se diferencia dos anteriores ao considerar que os VFDs modernos possuem recursos computacionais para monitorar e estimar variáveis do motor. Dessa forma, o sistema desses autores não utiliza sensores, mas sim a comunicação com o VFD para acessar os dados do motor armazenados na memória. A limitação dessa abordagem é que o sistema depende das informações disponibilizadas pelo VFD e do protocolo de comunicação específico do fabricante. Para processos industriais que não possuem VFDs com monitoramento integrado, é necessário um alto investimento para a troca desses dispositivos.

Por fim, vale a pena mencionar que todos os trabalhos apresentam limitações quanto à quantidade de variáveis monitoradas. Em geral, esses sistemas focam no monitoramento de grandezas elétricas e uma ou outra variável mecânica, excluindo outras variáveis relevantes. Em contraste, este trabalho se diferencia ao possibilitar o monitoramento, controle e integração com outros dispositivos industriais presentes no processo.

Considerações finais

O SMCM proposto neste trabalho alcançou resultados satisfatórios tanto em simulações quanto em testes experimentais. Os resultados experimentais indicam que a PCI projetada possui dimensões compactas adequadas para aplicação industrial e é capaz de condicionar os sinais de corrente, tensão e rotação do motor, possibilitando o monitoramento remoto em tempo real por meio de uma *dashboard* desenvolvida com Node-RED. Além disso, foi verificada a integração do SMCM com outros dispositivos industriais convencionais, como CLPs e VFDs.

Para viabilizar o desenvolvimento da automação de manutenção preventiva, trabalhos futuros devem incorporar novos sensores para monitoramento de outras variáveis do motor, como vibração e temperatura, aumentando ainda mais a robustez do sistema. Adicionalmente, aprimorar a interface de visualização e controle poderá otimizar a usabilidade para operadores em diversos setores da indústria.

Referências

- ABOUZEID, A. F. et al. Control strategies for induction motors in railway traction applications. **Energies**, Basileia, v. 13, n. 3, p. 700, 2020.
- AKTAS, M. et al. Direct torque control versus indirect field-oriented control of induction motors for electric vehicle applications. **Engineering Science and Technology**, Amsterdã, v. 23, n. 5, p. 1134–1143, 2020.
- CIANCETTA, F. et al. A low-cost IoT sensors network for monitoring three-phase induction motor mechanical power adopting an indirect measuring method. **Sensors**, Basileia, v. 21, n. 3, p. 754, 2021.
- EMBONG, A.; ASBOLLAH, L.; HAMID, S. A. Empowering industrial automation labs with IoT: A case study on real-time monitoring and control of induction motors using Siemens PLC and Node-RED. **Journal of Mechanical Engineering and Sciences**, Pahang, v. 18, n. 2, p. 10004–10016, 2024.
- ICHPAS, W. H.; NÚÑEZ, J. C. IoT platform-based control module for remote monitoring of low-power three-phase motors. *In: 2023 6TH ASIA CONFERENCE ON ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING (ACEEE)*, 6., 2023, Chengdu. **Anais [...]**. Piscataway: IEEE, 2023. p. 301-305
- IOANNIDES, M. G. et al. Design and operation of internet of things-based monitoring control system for induction machines. **Energies**, Basileia, v. 16, n. 7, p. 3049, 2023.
- IYER, R.; SHARMA, A. IoT based home automation system with pattern recognition. **International Journal of Recent Technology and Engineering**, Bhopal, v. 8, n. 2, p. 3925–3929, 2019.
- DEMIR, E.; KORKMAZ, H. A novel monitoring dashboard and hardware implementation simplifying the remote access in industry. *In: 2023 IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON METROLOGY FOR INDUSTRY 4.0 & IOT*, 1., 2023, Brescia. **Anais [...]**. Piscataway: IEEE, 2023. p. 399-403.

MAMATHA, G.; THEJASWI, A. H. Induction motor condition monitoring and controlling based on IoT. **International Journal of Research in Engineering, Science and Management**, Nelore, v. 4, n. 9, p. 220–225, 2021.

NUNES, W. R. B. M. et al. 3ph high efficiency induction motors with IFOC applied to a wheelchair by joystick. **IEEE Latin America Transactions**, Piscataway, v. 14, n. 5, p. 2041–2051, 2016.

OTHMAN, S. A.; MOHAMMED, J. A. K.; MOHAMMED, F. M. Variable speed drives in electric elevator systems: A review. *In*: 3RD INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE OF ENGINEERING SCIENCES AND ADVANCES TECHNOLOGIES (IICESAT), 3., 2021, Hila. **Anais [...]**. Bristol: IOP Publishing, 2021. v. 1973, n. 1, p. 012028.

PEETERS, C.; ANTONI, J.; HELSEN, J. Blind filters based on envelope spectrum sparsity indicators for bearing and gear vibration-based condition monitoring. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Amsterdã, v. 138, n. 1, p. 106556, 2020.

PRAJAPATI, A.; BECHTEL, J.; GANESAN, S. Condition based maintenance: a survey. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, Leeds, v. 18, n. 4, p. 384-400, 2012.

PRINCE et al. Development of energy efficient drive for ventilation system using recurrent neural network. **Neural Computing and Applications**, Heidelberg, v. 33, n. 14, p. 8659–8668, 2021.

RAI, P.; REHMAN, M. Esp32 based smart surveillance system. *In*: 2019 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, MATHEMATICS AND ENGINEERING TECHNOLOGIES (ICOMET), 2., 2019, Sukkur. **Anais [...]**. Piscataway: IEEE, 2019. p. 1–3.

SANTOS, J. F. dos et al. Desenvolvimento de um sistema IIoT para monitoramento de corrente e temperatura para motores elétricos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA-CBA, 24., 2022, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: SBA. 2022. v. 3, n. 1.

ŞEN, M.; KUL, B. Iot-based wireless induction motor monitoring. *In*: XXVI INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ELECTRONICS (ET), 26., 2017, Sozopol. **Anais [...]**. Sozopol: Technical University of Sofia, 2017. p. 1–5.

SHEHZAD, Z. A. et al. IoT & ML-based parameter monitoring of 3- ϕ induction motors for industrial application. *In*: 2023 INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING POWER TECHNOLOGIES (ICEPT), 2., 2023, Topi. **Anais [...]**. Piscataway: IEEE, 2023. p. 1-5.

SHUKLA, A. et al. Monitoring of single-phase induction motor through IoT using esp32 module. **Journal of Sensors**, Hoboken, v. 2022, n. 1, p. 8933442, 2022.

SHUKLA, S. et al. A new analytical MPPT-based induction motor drive for solar PV water pumping system with battery backup. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Piscataway, v. 69, n. 6, p. 5768–5781, 2021.

TOULAN, Mohamed; NAFEH, Abdelnasser; ARAFA, Shawky. Improvement of induction motors reliability in fertilizers plants using IoT and enterprise resource planning. *In: INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE (ITC-EGYPT)*, 4., 2024, Cairo. **Anais [...]**. Piscataway: IEEE, 2024. p. 487-492.

VANITHA, N.; SUTHANTHIRA, A.; KARTHIKEYAN, R.; RAMANI, T.; MEENAKSHI; SUJATHA, S. IoT enhanced induction motor drive in electric vehicle propulsion using field oriented control. *In: 2023 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS, COMMUNICATION AND AEROSPACE TECHNOLOGY (ICECA)*, 7., 2023, Coimbatore. **Anais [...]**. Piscataway: IEEE, 2023. p. 288-292.

WANG, B. et al. Recurrent convolutional neural network: A new framework for remaining useful life prediction of machinery. **Neurocomputing**, Amsterdã, v. 379, n. 1, p. 117–129, 2020.

YOUSUF, M. et al. IoT-based health monitoring and fault detection of industrial AC induction motor for efficient predictive maintenance. **Measurement and Control**, Londres, v. 57, n. 8, p. 00202940241231473, 2024.