

Sistema de proteção microcontrolado para motores elétricos de indução trifásicos

Gabriel Gutierrez Pereira Soares ^[1], Kaic Bezerra Torres ^[2], Arthur Aprígio de Melo ^[3], Marcos Cavalcante Meira ^[4], Thiago Carvalho Batista ^[5], Alvaro de Medeiros Maciel ^[6]

[1] gutierrez@eng.ci.ufpb.br. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Unidade Acadêmica de Indústria.

[2] kaicbtjp@gmail.com. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. [3] arthur.aprigio@ee.ufcg.edu.br. Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Elétrica. [4] mcmeira2017@gmail.com. [5] thiagoc.ifpb@gmail.com.

[6] alvaro.maciel@ifpb.edu.br. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus João Pessoa.

RESUMO

Este artigo apresenta um protótipo cujo objetivo é detectar falhas e proteger motores assíncronos trifásicos na ocorrência de perturbações produzidas por inversão de fases, falta de fases ou sobrecorrentes. Detectar e diagnosticar essas falhas evita danos, elimina a necessidade de paradas para manutenções corretivas, reduz os custos de manutenções, melhora a vida útil e o rendimento dessas máquinas. Com essa finalidade, o sistema desenvolvido utiliza o microcontrolador ATmega328p e o algoritmo elaborado para monitorar a atuação do sistema proposto. Para os três tipos de falhas, o sistema desenvolvido atende às especificações exigidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) – normas NBR 17094-3/2018 e NBR 5410. Durante os ensaios, a inversão e a ausência de fases que alimentam o motor de indução são realizadas manualmente no kit didático da empresa italiana De Lorenzo, e as ocorrências de sobrecorrentes nas três fases são produzidas pela frenagem do motor utilizado quando submetido à ação de um freio de Foucault. Resultados experimentais demonstram a viabilidade e a eficácia do sistema proposto.

Palavras-chave: Motor de Indução Trifásico. Qualidade de Energia. Protótipo de Proteção de Motores Elétricos. Microcontrolador. Arduino.

ABSTRACT

This paper presents a prototype whose objective is detecting faults and protecting three-phase asynchronous motors in case there are disturbances caused by phase inversions, phase failures or overcurrents. Detecting and diagnosing these faults prevents damage, eliminates the need for corrective maintenance downtime, reduces maintenance costs and improves the life and performance of these machines. In order to do so, the developed system uses the ATmega328p microcontroller and an algorithm developed to monitor the performance of the proposed system. For the three types of failures, the developed system meets the specifications required by the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT) – standards NBR 17094-3/2018 and NBR 5410. During the tests, the inversion and the absence of phases that supply the induction motor are carried out manually in the didactic kit of the De Lorenzo, Italian manufacturer, and the occurrences of overcurrents in the three phases are produced by breaking of the motor used when subjected to action of a Foucault brake. Experimental results demonstrate the viability and effectiveness of the proposed system.

Keywords: *Three-phase Induction Motor. Power quality. Electric Motor Protection Prototype. Microcontroller. Arduino.*

1 Introdução

Os motores elétricos de indução trifásicos (MIT) são comumente utilizados em diversos equipamentos, processos de fabricação e aplicações industriais. Estima-se que sejam responsáveis pelo consumo de aproximadamente 53% da energia elétrica gerada em países industrializados da atualidade (MOHAN, 2014). No setor industrial brasileiro, os MITs são responsáveis por aproximadamente 30% do consumo de toda energia produzida (AGARELLI, 2015). As falhas nos motores podem ocasionar a interrupção de uma linha de produção ou até mesmo de todo o processo de fabricação, resultando em grandes perdas financeiras para a indústria. Sendo assim, é importante manter o bom funcionamento dos motores, de modo a garantir a continuidade dos processos industriais.

As falhas nos motores de indução são de natureza mecânica ou elétrica. Quanto à origem, tais falhas são classificadas como interna, externa ou ainda relacionada ao ambiente. No que se refere à localização, são identificadas como falhas elétricas que ocorrem nos enrolamentos do estator ou do rotor. Nesse último caso, é possível o surgimento de problemas no mancal e na refrigeração (AL KAZZAZ; SINGH, 2003). Há ainda a chance de ocorrerem, nos MITs, avarias decorrentes de desequilíbrios de tensão, curtos-circuitos, desgaste de origem térmica, sobrecorrente ou sobrecargas mecânicas (GARCIA-RAMIREZ *et al.*, 2014). Tais avarias, uma vez estabelecidas, implicam o aumento da vibração, aumento de temperatura e ruídos, com impactos negativos na vida útil e, em alguns casos, no rendimento dessas máquinas. Para identificar e revelar a existência de tais defeitos são utilizados métodos de diagnósticos e detecção, por exemplo, da vibração dos motores (SU; XI; CHONG, 2007), das emissões acústicas (GLOWACZ *et al.*, 2018), das correntes de estator (UKIL; CHEN; ANDENNA, 2011) ou da temperatura (GLOWACZ; GLOWACZ, 2017).

Outra alternativa para detecção das irregularidades que prejudicam o adequado funcionamento dos MITs é empregar técnicas de inteligência artificial, como a utilização de redes neurais (BAZAN *et al.*, 2017), ou a técnica de análise de sinais que utiliza transformada *wavelet* (NÓBREGA SOBRINHO *et al.*, 2018). Detectar anomalias no funcionamento dos motores por meio do monitoramento adequado de suas características, com o consequente diagnóstico do tipo de falha, possibilita o planejamento de manutenções preventivas,

evitando danos aos motores de indução quando expostos a condições anormais, bem como adiando ou eliminando a necessidade de paradas na produção para manutenções corretivas.

Nesse sentido, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de proteção para o motor de indução trifásico, rotor tipo gaiola de esquilo, que está disponível no laboratório em que foram realizados os ensaios do protótipo, visando à detecção de sobrecorrente, falta e inversão de sentido das fases que os alimentam. Para isso, foi implementado um algoritmo que detecta a passagem por zero dos sinais de tensão e que, quando o motor está ligado, monitora o comportamento das correntes de cada fase.

A eficiência do sistema é demonstrada por meio dos resultados experimentais obtidos pelas leituras da tensão e da corrente e por meio da interpretação correta dos pulsos oriundos das leituras desses sinais, gerados no *hardware* do protótipo implementado. Já em outros trabalhos que tratam do mesmo tema, a exemplo de Waswani *et al.* (2017), as medições da tensão, corrente, velocidade e temperatura são utilizadas para comparação com valores de referência considerados seguros. Esses autores apresentam como resultados da sua pesquisa a simulação do controle da velocidade de um determinado MIT.

Ademais, a partir do protótipo desenvolvido, os resultados contra a falta e a inversão de fases para a proteção do MIT são apresentados, diferentemente do que ocorre no último trabalho citado, cujos autores afirmam ser possível detectar tais situações, mas sem apresentar resultados para essas falhas. Portanto, os dois tipos de trabalhos abordam o mesmo tema de modo distinto, ou seja, o presente trabalho é voltado para o desenvolvimento de um protótipo, enquanto o outro tipo produz resultados a partir de simulações.

Este trabalho está dividido do seguinte modo: na seção 2 são tratados, de modo sucinto, os aspectos sobre qualidade de energia elétrica e motores de indução; na seção 3 é apresentada a descrição do sistema proposto; na seção 4 está indicada a metodologia utilizada neste trabalho; na seção 5 são apresentados os resultados e discussões e, por fim, as considerações finais estão assentadas na seção 6.

2 Qualidade de energia elétrica e motores de indução

Nas últimas décadas, o termo “qualidade de energia elétrica” tem sido empregado para expressar as mais variadas características da energia elétrica

entregue pelas concessionárias aos consumidores (BEAULIEU *et al.*, 2003). A qualidade da energia abrange características de continuidade de suprimento e de conformidade com parâmetros para operação segura do sistema elétrico e das cargas elétricas (MARTINEZ *et al.*, 2013).

Na essência, o termo “qualidade de energia” está relacionado à alteração do padrão do sinal da energia elétrica da concessionária, ou seja, à alteração do sinal senoidal de frequência constante (60 Hz no Brasil), que, por diversos motivos, é modificada. Há a possibilidade de essa mudança ocorrer na amplitude e na frequência em decorrência de pelo menos um dos seguintes tipos de distúrbios (DUGAN *et al.*, 2002): afundamento de tensão (SAG); elevação de tensão (SWELL); interrupção instantânea, temporária ou de longa duração; ruído; cintilação (*flicker*); microvariações que surgem no sinal senoidal das fases que alimentam as instalações ou equipamentos (*notching*); transientes que surgem em alterações súbitas nas condições nominais de um sistema de energia elétrica; desequilíbrio de tensão; redução de fator de potência; harmônicos, entre outros.

São fontes geradoras desses distúrbios, com destaque para os harmônicos (ISONI, 2012): sistemas de retificação e acionamento de Corrente Contínua (CC); fontes chaveadas; reatores eletrônicos para iluminação; controladores de tensão para iluminação e aquecimento; inversores de frequência; fornos a arco, soldas a arco, lâmpadas de descarga e dispositivos de núcleos magnéticos saturáveis (transformadores e motores elétricos).

A presença de um desses distúrbios prejudica a produtividade e a segurança das pessoas; afeta a economia de energia; majora os custos dos produtos; possibilita a desprogramação de microcomputadores e de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs); gera desligamentos inadequados de cargas e equipamentos; aquece os equipamentos conectados à rede elétrica, danificando-os ou diminuindo suas vidas úteis; provoca falhas no envio de dados; causa interferência eletromagnética em equipamentos sem blindagem adequada; reduz o rendimento e produz oscilação no torque e na potência de motores elétricos; contribui para o mau funcionamento de dispositivos de comando, de controle e de proteção, causando acionamento acidental de, por exemplo, sensores de temperatura; entre outros fatores (MARTINHO, 2009).

Para minimizar ou, se possível, evitar que os fenômenos mencionados ocorram, é imperativo que a qualidade de energia esteja sob controle constante,

com o objetivo de não causar insegurança às pessoas e animais, perdas por aquecimentos, paradas longas no fornecimento de energia elétrica nem prejuízos e estragos financeiros perante os consumidores dos segmentos industriais, comerciais e residenciais. Os parâmetros de controle da qualidade de energia estão especificados em recomendações emitidas por órgãos nacionais e internacionais que criaram, ao longo dos últimos 20 anos, diferentes normas e dispositivos, a exemplo do PRODIST módulo 08 (ANEEL, 2010), IEC 61000-3-4 (IEC, 1998), IEC 61000-3-11 (IEC, 2000), NBR 5410-Anexo F (ABNT, 2004), IEEE 1159-2009, (IEEE, 2009), IEEE 519-2014 (IEEE, 2014), IEC 61000-3-3 (IEC, 2017) e IEC 61000-3-2 (IEC, 2018), com o objetivo de proteger os mais diversos componentes dos sistemas de energia que se opõem aos distúrbios que afetam a qualidade de energia elétrica.

Insere-se nesse contexto a importância de estudar os equipamentos elétricos sujeitos ou que provoquem alterações na rede elétrica em que estão conectados, como, por exemplo, os motores de indução trifásicos. Esses equipamentos são motores de corrente alternada, bastante utilizados devido à sua simplicidade construtiva, robustez e facilidade de operação (CHAPMAN, 2013).

Deve ser destacado que os MITs, quando submetidos a operações que exigem o funcionamento além de suas características nominais de serviço, possuem proteção baseada no uso de relés, fusíveis e disjuntores (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2011). Atualmente, relés de proteção microprocessados têm sido desenvolvidos para proporcionar uma proteção adequada de motores em regime de funcionamento crítico, independentemente de sua potência. Além disso, os avanços das facilidades de proteção, controle e monitoramento proporcionados pelas redes de comunicação de dados possibilitam, aos funcionários de operação e de manutenção, uma melhor avaliação do comportamento dos motores durante o desempenho, bem como o desenvolvimento de estratégias de manutenção preditiva (BULGARELLI, 2006). Seguindo essa tendência, neste trabalho é desenvolvido um sistema protetivo de multifunção, objetivando o monitoramento de proteção de MITs contra as seguintes falhas: sobrecorrente, falta de fase e inversão de fase.

3 Descrição do sistema

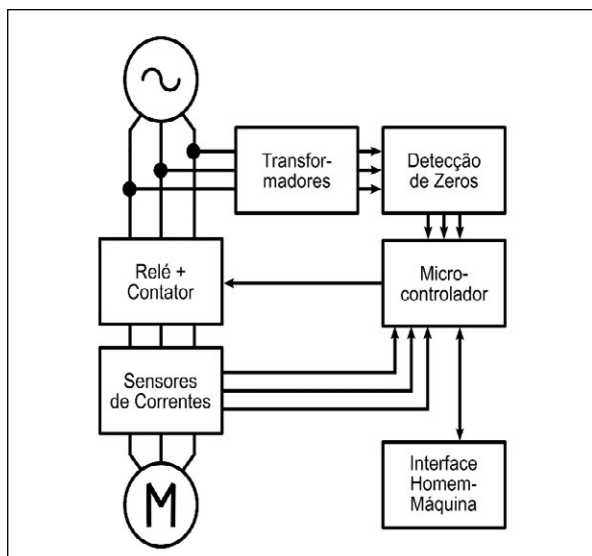
Com a constante evolução tecnológica, diversos estudos para o desenvolvimento de dispositivos rápidos

e precisos são apresentados na literatura científica com a finalidade de obter melhores resultados na proteção contra faltas em motores de indução trifásicos (MITs). Considerando esses fatos, um sistema de aquisição de dados e proteção de motores foi desenvolvido, constituído de transformadores, circuito detector de passagem por zero, microcontrolador, sensores de correntes, *display* LCD para interface homem-máquina e conjunto relé-contator que atua no MIT.

Esse sistema tem como objetivo verificar a inversão de fase e a falta de fase e obter os valores de sobrecorrentes no motor trifásico utilizado. O microcontrolador realiza a leitura periódica de valores de tensão e corrente e, na ocorrência de uma das falhas mencionadas, atua no conjunto relé-contator de forma a desligar e, simultaneamente, proteger o motor de avarias que possam ocorrer.

Na Figura 1 está ilustrado o diagrama de blocos do sistema proposto. A descrição de cada bloco ou de cada etapa é apresentada nas subseções posteriores.

Figura 1 – Diagrama de blocos do sistema proposto



Fonte: Elaborada pelos autores

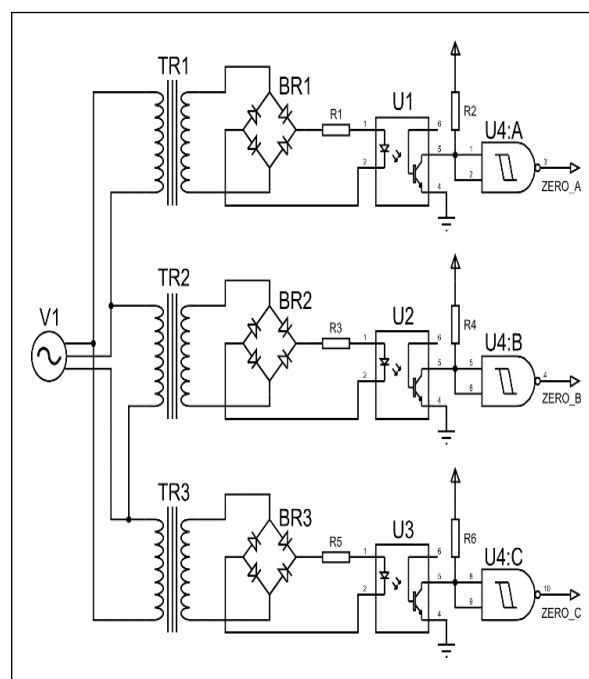
3.1 Aquisição de sinais de tensão

Para o desenvolvimento do sistema proposto, é considerada uma fonte de energia alternada trifásica a três fios, com tensão de fase de 127 V. Com o objetivo de isolar a fonte de alimentação do sistema de proteção e rebaixar o valor de tensão, foram utilizados três transformadores monofásicos, cada um deles com valor de tensão no secundário de 12 V (bloco Transformadores na Figura 1).

Na saída de cada transformador (TR1, TR2 e TR3), uma ponte de diodos (BR1, BR2 e BR3) é conectada para retificar o sinal de tensão do secundário de cada transformador. Nos terminais de saída de cada ponte são obtidas as formas de ondas retificadas com os pontos de valores nulos. O sinal retificado de cada fase é aplicado em um optoacoplador (U1, U2 e U3), modelo 4N35, configurado de modo a gerar um pulso no instante em que o sinal retificado de tensão atinge os valores nulos mencionados. Além de auxiliar na detecção da passagem por zero, os optoacopladores isolam com segurança a estrutura de potência, formada pelos transformadores TR1, TR2 e TR3, da que integra o microcontrolador e os circuitos eletrônicos, sem prejuízo da comunicação entre essas duas etapas. À saída de cada optoacoplador é conectada uma porta lógica NAND do tipo *Schmitt-Trigger*, disponibilizada pelo circuito integrado CMOS 4093 (U4:A, U4:B e U4:C), cuja função é condicionar o sinal de saída de cada optoacoplador, convertendo-o em um sinal digital.

Na Figura 2 são identificadas as partes que integram o sistema detector de passagem por zero.

Figura 2 – Esquema elétrico dos transformadores e dos detectores de passagem por zero



Fonte: Elaborada pelos autores

Nas três saídas das portas NANDs, os sinais digitais obtidos são fornecidos ao microcontrolador.

3.2 Microcontrolador

Para o processamento do sinal digital e para o controle dos parâmetros do MIT, é utilizada, no protótipo desenvolvido, a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino Nano. Essa plataforma é de *hardware* livre e de placa única, projetada com um microcontrolador Atmel AVR com circuitos de entrada e saída embutidos; pode ser conectada em computador e programada em um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (*Integrated Development Environment – IDE*), aplicando linguagem baseada em C/C++; e utiliza um único cabo mini-USB. Essa placa disponibiliza ferramentas acessíveis com baixo custo, é fácil de programar e, por adotar o conceito de *hardware* livre, permite que o projetista monte, modifique, melhore e personalize o Arduino, partindo do mesmo *hardware* básico.

O microcontrolador utilizado na plataforma Arduino Nano é o ATmega328, que dispõe de 14 pinos de entrada/saída digitais, 8 entradas analógicas, uma UART (porta serial de *hardware*), um oscilador de cristal de 16 MHz, uma conexão mini-USB, uma entrada de alimentação e um botão de *reset*. A abrangência de ferramentas, a versatilidade na programação do microcontrolador, a reduzida dimensão (1,85 cm x 4,32 cm) e o baixo custo foram fatores determinantes para a escolha dessa plataforma para o sistema de controle do MIT utilizado.

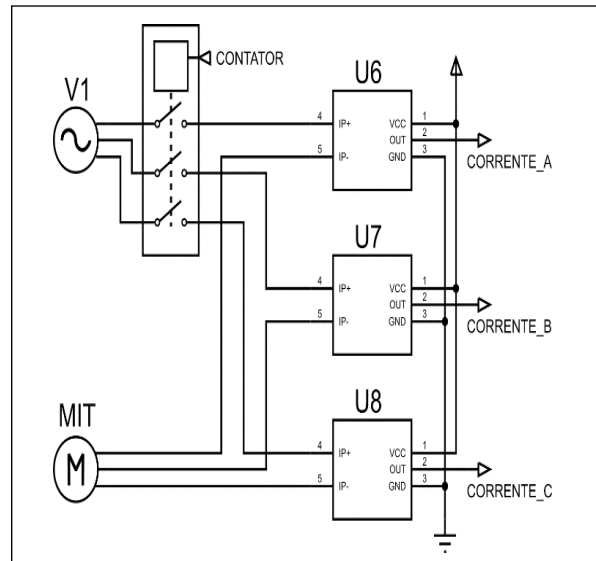
3.3 Aquisição de correntes e atuador

Com a finalidade de medir as correntes das fases A, B e C durante a operação do motor, os módulos sensores de correntes de efeito Hall ACS712-30A foram utilizados. O tamanho reduzido (32 mm x 13 mm x 14 mm), a capacidade de medir corrente alternada e contínua, a compatibilidade com o Arduino utilizado neste trabalho, a rapidez no tempo de resposta (5 microssegundos), o reduzido peso (3,2 g) e a elevada impedância dos bornes de saída que são interligados ao microcontrolador serviram de parâmetros na escolha desses sensores. Esses módulos fornecem aos pinos de saída, *pin out*, valores de tensões proporcionais aos valores das correntes de acordo com os parâmetros de sensibilidade de 66 mV/A, suportam correntes máximas de 30 A e são alimentados com tensões de 5 V.

Na Figura 3 está indicado o diagrama esquemático da interligação da rede elétrica de 220 V com o contator e com os três blocos (U6, U7 e U8) que representam

os módulos sensores de corrente ASC712-30A mencionados.

Figura 3 – Diagrama esquemático dos sensores de corrente e do contator



Fonte: Elaborada pelos autores

No sistema proposto, o valor da corrente para desligar e, conseqüentemente, proteger o MIT utilizado é de aproximadamente 7A, podendo ser ajustada, no *software* implementado, para outro valor de acordo com as características do MIT utilizado.

Para o acionamento do motor de indução, no sistema desenvolvido foi implementado um contator trifásico, modelo AZCW07-10-30V25 do fabricante WEG, controlado pelo microcontrolador ATmega328p e acionado por um relé eletromecânico de referência JQC-3FF-S-Z-5V, para energização ou desenergização da bobina do contator citado.

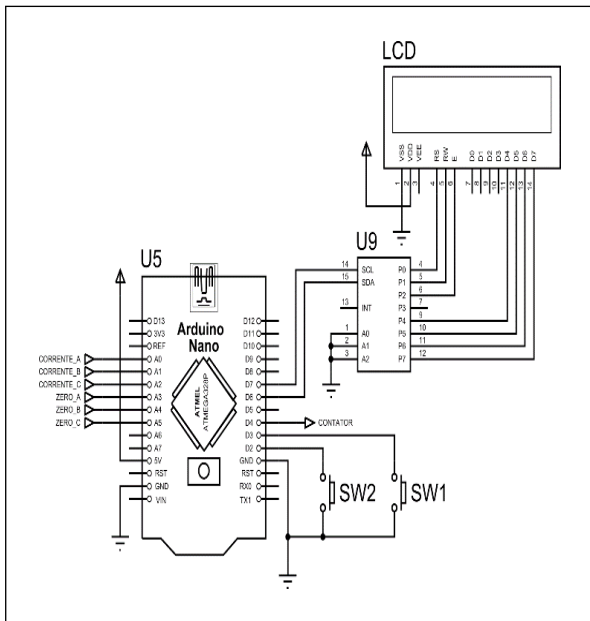
3.4 Interface homem-máquina

No protótipo desenvolvido, foi utilizada uma interface homem-máquina (IHM) composta por um *display* de LCD (*Liquid Crystal Display*) e por botões de interação (SW1 e SW2). O LCD exibe as informações de monitoramento, tanto para comunicação do usuário com o sistema quanto para o acionamento do motor. Nesse *display* são registrados a presença das tensões de cada fase, a sequência das fases, o estado ligado ou desligado do MIT, os valores das correntes das três fases quando o MIT está ligado e as mensagens de falhas (sobrecorrente, falta de fase, sequência invertida).

O *display* LCD empregado no sistema proposto é constituído de 16 colunas e 2 linhas, cor azul no fundo do visor e escrita branca. Apresenta na sua estrutura o controlador de *display* HD44780, utilizado nas indústrias de LCDs como base de interface (THOMSEN, 2011).

Interconectado entre o Arduino e o LCD, foi utilizado o circuito integrado (CI) PCF8574 (U9). Esse CI é um expensor que permite o controle de até oito portas de entrada e saída (I/O) utilizando apenas dois pinos do microcontrolador incorporado ao Arduino Nano inserido no protótipo deste trabalho. Na Figura 4 está indicada a estrutura implementada para a etapa IHM.

Figura 4 – Esquema elétrico do Arduino Nano e da interface homem-máquina (IHM)



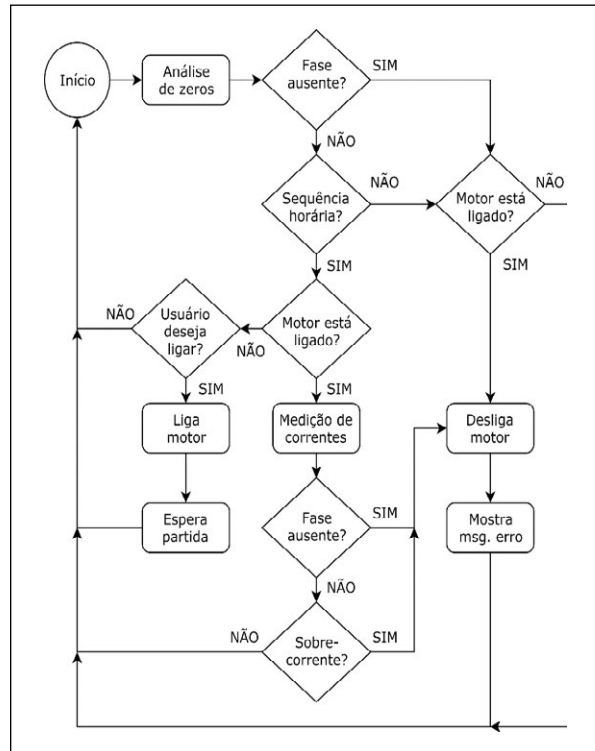
Fonte: Elaborada pelos autores

Visando à atuação adequada do controle do sistema proposto, o algoritmo no microcontrolador foi implementado de modo que, nas ocorrências de falta de fase, inversão de fase e sobrecorrente, o MIT seja parado, evitando, assim, avarias decorrentes de tais situações anômalas.

3.5 Algoritmo implementado

No microcontrolador, foi implementado o algoritmo responsável pelo processamento dos sinais de tensão de cada fase da fonte e dos sinais obtidos dos sensores de correntes instalados nas três fases que alimentam o MIT e também pela detecção de falhas. O fluxograma do algoritmo implementado é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma do algoritmo implementado



Fonte: Elaborada pelos autores

O *software* de controle atua de formas distintas, de acordo com o estado do motor. Caso o motor esteja desligado, seu acionamento só é possível se todos os parâmetros relacionados à inversão ou falta de fase estiverem dentro da normalidade. Quando o motor estiver ligado, o sistema monitora continuamente os parâmetros relacionados às ocorrências de falhas e executa seu desligamento em caso de anormalidade.

O primeiro parâmetro monitorado é a presença de tensão nas três fases. Estando o motor desligado, é realizada a análise dos pulsos que são gerados durante a passagem pelos zeros da forma de onda retificada. Havendo interseção entre os pulsos, o algoritmo detecta a ausência de uma das três fases e registra esse fato no LCD. Nesse caso, o MIT não é acionado. Não ocorrendo a interseção de pulsos, o algoritmo registra a presença das fases que alimentam o MIT. Na situação em que o motor está ligado, não é possível utilizar tal abordagem, visto que, ao retirar uma das fases, o circuito equivalente do motor gera uma corrente única, equivalente à corrente no sistema bifásico resultante.

A sequência das fases, por sua vez, é identificada pela ordem dos pulsos de detecção de zero. Quando as fases A, B e C estão conectadas na sequência horária, ABC, a ordem dos pulsos é ACB, CBA ou BAC, de

acordo com a fase adotada como referência. De forma análoga, para o caso em que as fases estejam na sequência anti-horária, CBA, a ordem dos pulsos na passagem pelos pontos de valores nulos é ABC, BCA ou CAB.

Caso o motor esteja em operação, as correntes das fases são monitoradas, comparadas com o valor limite de 7 A previamente estabelecido no *software* implementado e registradas na memória do microcontrolador. Medidas acima de 7 A indicam que há sobrecorrente. Na ocorrência da frenagem no eixo do motor, surge um valor de corrente que ultrapassa o limite de corrente projetado, e o motor é imediatamente desligado. A potência máxima do motor e o tempo do transitório são especificados no *software* no IDE do Arduino, que, no protótipo, é utilizado como entrada fornecida pelo usuário. No experimento, cargas dinâmicas foram testadas, considerando que o freio de Foucault utilizado é dinamicamente variável. Após o tempo do transitório de partida do motor, estabelecido previamente em 5 segundos, é que o monitoramento começa a ser executado.

4 Metodologia

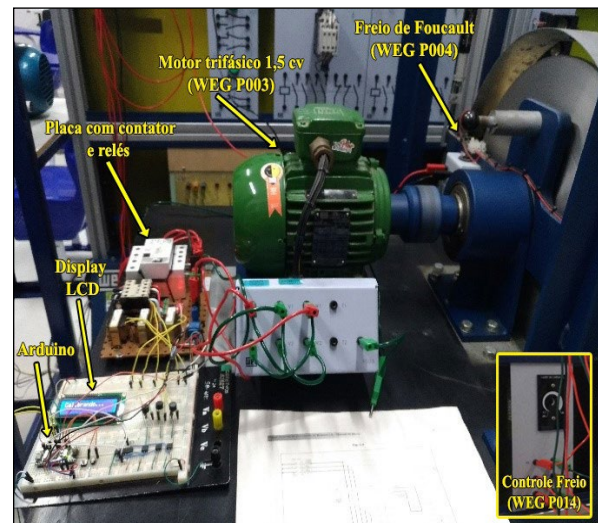
Inicialmente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica baseada em materiais publicados em livros, periódicos, *sites*, documentos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), recomendações de normalizações internacionais e revistas especializadas, com a finalidade de adquirir o embasamento teórico sobre os motores elétricos assíncronos. Além disso, foram estudadas as normas de dimensionamento dos equipamentos de proteção elétrica dessas máquinas, a plataforma de prototipagem Arduino Nano, o microcontrolador e a respectiva programação.

Na sequência, foi implementado o protótipo proposto no Laboratório de Eletrônica Industrial do Campus João Pessoa do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), onde foram realizadas as montagens, elaborada e implementada a programação no microcontrolador incorporado à plataforma Arduino Nano e extraídos os resultados experimentais com utilização de osciloscópio digital bem como do *software* MATLAB®.

A metodologia quantitativa utilizada durante o experimento está validada, considerando que os valores numéricos das formas de ondas obtidas foram quantificados, classificados, analisados e submetidos a testes de conformidade, de acordo com o que está descrito em Praça (2015). Em seguida, a atuação do

sistema na proteção de motores trifásicos na ausência de fases, na inversão de fases e na ocorrência de sobrecorrente provocada pela ação do rotor bloqueado foi testada durante o acionamento do sistema de frenagem. A estrutura do protótipo do sistema microcontrolado de proteção de um MIT é ilustrada na Figura 6.

Figura 6 – Estrutura do protótipo desenvolvido para proteção de motores trifásicos



Fonte: Elaborada pelos autores

5 Resultados e discussão

Para a verificação do funcionamento do dispositivo de proteção desenvolvido, foi utilizada a bancada de testes do fabricante italiano De Lorenzo, disponível no Laboratório de Eletrônica Industrial do IFPB – Campus João Pessoa. A estrutura utilizada para testar o sistema de proteção é constituída de uma matriz de contatos (*proto-board*) de 2420 pontos na qual estão conectados o Arduino Nano, os optoacopladores, os circuitos integrados de condicionamento de sinais, o circuito integrado expensor de portas de entrada e saída do Arduino, os sensores de correntes e o LCD.

Para a medição de corrente foram utilizadas amostras com intervalos de 100 µs, de acordo com a Equação 1:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{I_{sum}^2}{n}} \cdot \frac{I}{V_{sens}} \cdot \frac{V_{cc}}{V_{max}} \quad (1)$$

onde $V_{max} = 1023$ é o valor máximo de amostra de corrente; $V_{cc} = 5V$ é o valor da tensão de alimentação do Arduino; $V_{sens} = 0,066 V/A$ é o valor da tensão de sensibilidade do sensor de corrente (volts por ampère); e a corrente I_{sum} é calculada por meio da Equação 2:

$$I_{sum} = \sum_{i=0}^n I_i^2 \quad (2)$$

onde I_i é uma amostra de corrente, $I_i \in [0, 1023]$, $i = 0, 1, 2, \dots$; n indica a quantidade de amostras de corrente.

Próximo à matriz de contatos, onde estão situados o *display* LCD e o Arduino, há um painel de madeira perfurada no qual foi montado e interconectado o conjunto contator/relé ao motor de indução utilizado. Nessa estrutura de teste do sistema de proteção são utilizados, ainda, um motor de indução trifásico (MIT) de 1,5 CV, com corrente nominal de 4,43 A em 220 V (WEG P003), um freio de Foucault (WEG P004) e um módulo de controle de frenagem para o freio (WEG P014). Tais componentes estão indicados na Figura 6.

5.1 Teste de conformidade

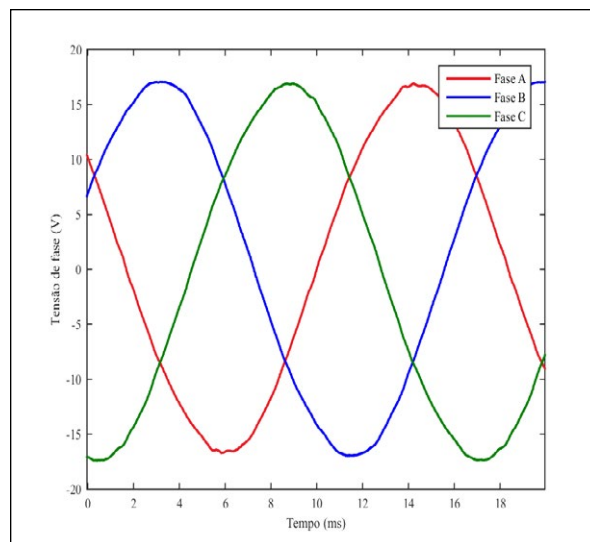
Durante o teste de conformidade, as funcionalidades básicas do sistema proposto foram verificadas para assegurar seu funcionamento antes e depois de o MIT ser submetido a distúrbios. Quando em operação, os dispositivos de proteção devem ter suas funções de proteção mantidas durante e após a exposição às situações anômalas.

Os valores dos sinais de tensão nas saídas dos transformadores, das pontes retificadoras e dos optoacopladores foram medidos e analisados para averiguar se estavam na faixa permitida para o adequado funcionamento do dispositivo de proteção desenvolvido. Para as medições e a obtenção dos resultados citados, foi utilizado o osciloscópio de quatro canais Keysight DSO-X4024A.

Na Figura 7, são exibidas as curvas de tensão nas saídas dos transformadores responsáveis por alimentar o circuito do protótipo desenvolvido e isolá-lo da rede elétrica. Nessas curvas são observados valores de tensões de pico de 16,89 V, 17,10 V e 16,90 V nos secundários dos transformadores das fases A, B e C, respectivamente. Esses valores foram obtidos

pelo osciloscópio utilizado e salvos em arquivo CSV (*Comma Separated Values*). Os dados desse arquivo foram fornecidos ao MATLAB® para gerar os gráficos indicados. Como esperado, as fases estão defasadas entre si de 120° e na sequência ABC.

Figura 7 – Tensão na saída do transformador responsável por alimentar o protótipo



Fonte: Elaborada pelos autores

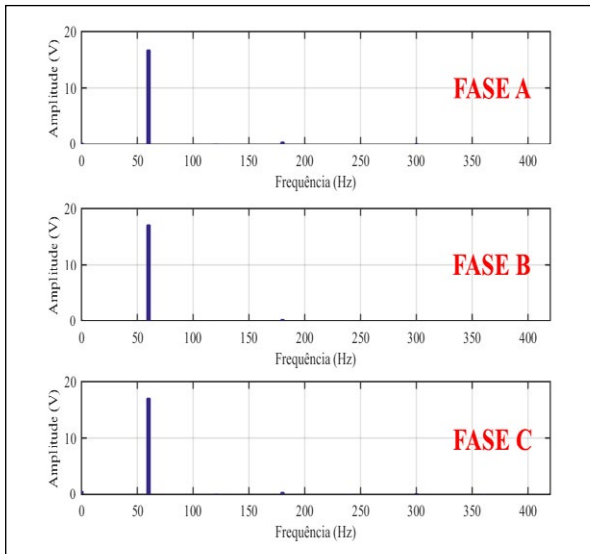
Adicionalmente, foi realizada a análise da distorção harmônica total (DHT), executada também em MATLAB®, em cada um dos sinais das fases A, B e C, em virtude de as cargas no laboratório onde foram realizados os experimentos não serem lineares, com o objetivo de verificar a capacidade de atuação do algoritmo do protótipo diante de uma rede poluída com harmônicos. Os resultados dessa análise estão exibidos na Tabela 1, e as análises espectrais dos sinais das tensões das fases A, B e C, respectivamente, estão exibidas na Figura 8.

Tabela 1 – Análise da distorção harmônica total das tensões das fases A, B e C

	DHT (%)
Tensão Fase A	2,23
Tensão Fase B	1,82
Tensão Fase C	1,99

Fonte: Dados da pesquisa

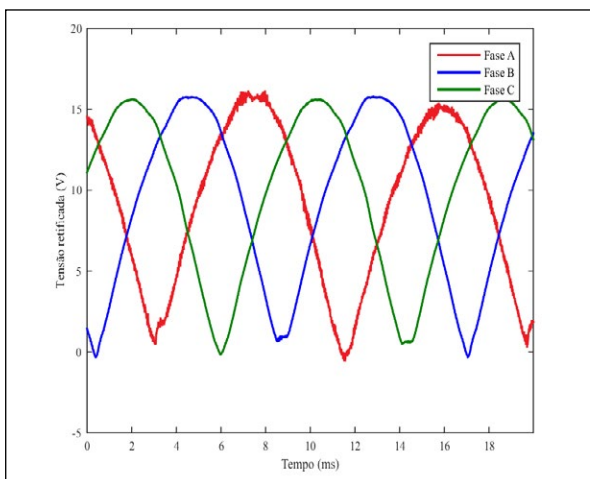
Figura 8 – Análises espectrais das curvas de tensão na saída do transformador responsável por alimentar o protótipo



Fonte: Elaborada pelos autores

Os formatos e os valores das tensões medidas nas saídas das pontes retificadoras BR1, BR2 e BR3, presentes no esquema da Figura 2, são ilustrados na Figura 9. Nessa figura, estão indicadas as tensões CC não filtradas e as características de sequência de fases da alimentação. O ruído mais acentuado na fase A (cor vermelha), se confrontado com o ruído das demais fases, é gerado pela maior quantidade de conexão de reatores eletrônicos da iluminação existente no ambiente dos ensaios e pelo desbalanceamento das cargas entre as fases.

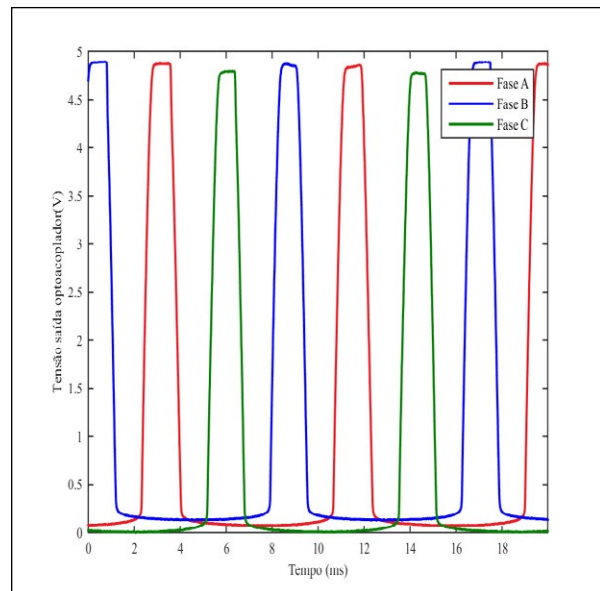
Figura 9 – Formatos e valores de tensão na saída das pontes retificadoras



Fonte: Elaborada pelos autores

Os valores dos pulsos de tensão nas saídas dos três optoacopladores, como pode ser observado na Figura 10, ocorrem quando estão presentes as tensões em cada fase e na sequência da alimentação de energia fornecida pela concessionária.

Figura 10 – Valores de tensão nas saídas dos optoacopladores

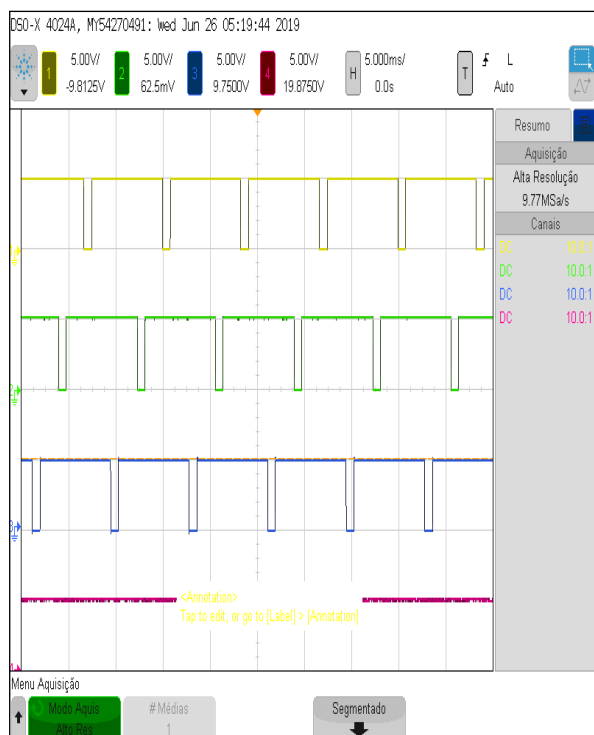


Fonte: Elaborada pelos autores

Nota-se que o valor mínimo de tensão na saída de cada ponte retificadora, observado na Figura 9, gera um pulso correspondente por fase. Cada pulso exibe duração de cerca de 1,8 ms (parte inferior) ou 0,6 ms (parte superior) e tensão máxima de 4,88 V, 4,89 V e 4,80 V para as fases A, B e C, respectivamente. Esses valores e os gráficos foram gerados pelo software MATLAB® após salvar o arquivo CSV correspondente às formas de ondas exibidas no osciloscópio utilizado.

Os pulsos ilustrados na Figura 10, ao serem aplicados nas entradas das portas NAND (U4:A, U4:B e U4:C) do sistema de detecção de passagens por zeros, mostrado na Figura 2, produzem nos pontos "Zero_A", "Zero_B" e "Zero_C" os sinais digitais. Esses sinais, obtidos diretamente do osciloscópio, estão ilustrados na Figura 11.

Figura 11 – Pulsos das saídas dos optoacopladores do sistema de detecção de fases



Fonte: Elaborada pelos autores

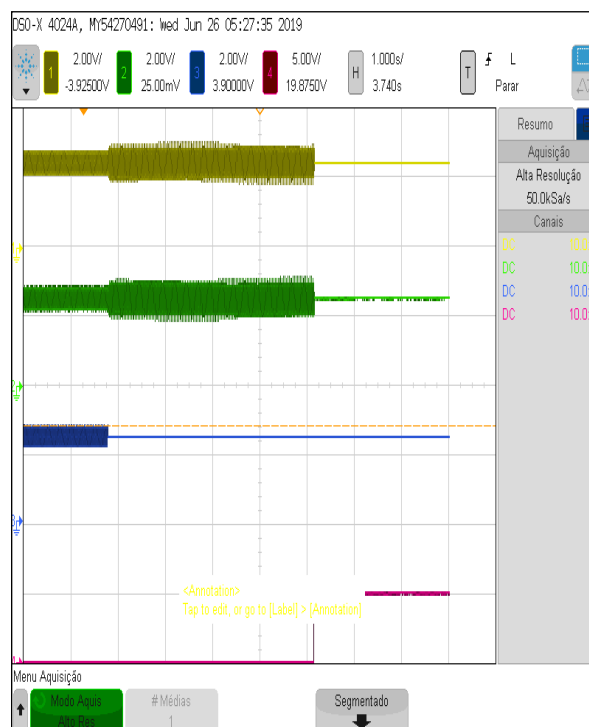
O tempo entre pulsos por fase é de cerca de 1,25 ms e o tempo de cada pulso gerado é de 7,25 ms. Portanto, considerando o tempo do pulso e o tempo para surgir o próximo na mesma fase, tem-se 8,25 ms.

Observa-se que, de uma fase para outra, os pulsos surgem a cada 6,25 ms. Esse fato é observado quando os três sinais, de cores amarela, verde e azul, são simultaneamente comparados entre si.

As características bem definidas de amplitude, largura e periodicidade dos pulsos das três fases permitem que sejam identificados e processados pelo microcontrolador sem distorções. Em consequência, os comandos existentes na programação atuam de modo que os resultados produzidos no sistema proposto estejam de acordo com as especificações de projeto.

O sistema trifásico que fornece energia ao MIT submetido aos testes de proteção está ilustrado na Figura 12. Durante os 1,8 s iniciais, as tensões das três fases A, B e C, medidas, respectivamente, nos canais 1, 2 e 3 do osciloscópio (cor amarela, cor verde e cor azul), são fornecidas pela concessionária de energia elétrica, e a tensão nula, medida no canal 4 do osciloscópio (cor magenta), indica que o sistema protetivo proposto está desativado.

Figura 12 – Fases de alimentação do motor em teste em que ocorre a falta de uma fase no canal 3, com a consequente desenergização da bobina do contator



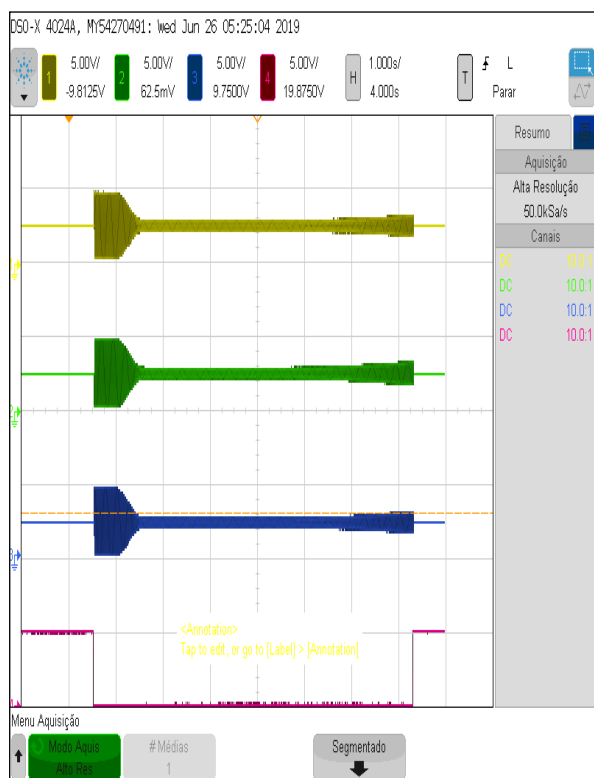
Fonte: Elaborada pelos autores

Transcorridos os 1,8 s iniciais, a fase C, que está acoplada ao canal 3 do osciloscópio (cor azul), é desconectada manualmente, simulando a falta de fase. Após os 1,8 s citados, a fase do canal 3 (cor azul) assume valor nulo de tensão, e as fases A (cor amarela) e B (cor verde) elevam seus níveis de tensões durante 4 segundos. Após esse tempo, o sistema microcontrolado (cor magenta) desenergiza a bobina do contator e desconecta o MIT da rede elétrica. Nessas condições, o sistema proposto protege o MIT utilizado e evita que sofra avarias decorrentes desse tipo de falha.

As inversões de fases são realizadas em obediência à seguinte sequência de ações: a) primeiro são invertidas as fases A e B; b) depois as fases A e C são submetidas ao processo de inversão; c) por fim, as fases B e C são invertidas. Nas três situações, 22 ms – tempo determinado previamente no *software* desenvolvido – após o motor de indução ser acionado, o sistema microcontrolado detecta as inversões mencionadas e desliga o motor, protegendo-o desse tipo de falha.

A atuação do sistema na ocorrência de sobrecorrente está exibida na Figura 13.

Figura 13 – Partida do motor com posterior imposição de sobrecarga no eixo do motor



Fonte: Elaborada pelos autores

Inicialmente, durante o intervalo de 0 a 1,7 s, as três fases, A, B e C – respectivamente, cor amarela, cor verde e cor azul –, fornecem energia para o MIT. Após o intervalo de tempo mencionado, a partida do motor é iniciada e os níveis de correntes das fases A (amarela), B (verde) e C (azul) são elevados para valores que correspondem a sete vezes os valores das correntes nominais de 4,34 A.

Esses valores das correntes de cada fase, apesar de elevados, duram pouco tempo, estando em conformidade com as especificações do fabricante. Essa situação permite que o sistema de proteção proposto (magenta) permaneça desativado, ou seja, tolere as correntes de partida sem que ocorra a interrupção do motor utilizado neste trabalho.

Cinco segundos após a partida do MIT, o freio de Foucault é ativado e o rotor do motor é frenado. Nesse instante, há um aumento de carga no eixo do motor e, conseqüentemente, elevação dos valores das correntes das fases A (amarela), B (verde) e C (azul).

Esses valores elevados, provocados pela frenagem do rotor, perduram por cerca de 1,2 s. Após esse tempo, o sistema protetivo detecta a existência de sobrecorrentes nas fases citadas e, imediatamente, o microcontrolador atua no desligamento do contator, que desconecta o motor da rede de energia elétrica. Esse desligamento protege o motor mencionado, evitando avarias resultantes das correntes de sobrecarga.

6 Considerações finais

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um sistema de proteção para motores de indução trifásicos que detecta a presença de sobrecorrente, falta e inversão da sequência de fases. Foi mostrado que os pulsos gerados pelo sistema de detecção de zeros são coincidentes com a sequência de fases que alimentam o motor. Verificou-se que, havendo discordância na sequência estabelecida como padrão, o sistema de detecção de passagem por zero de cada fase provoca o desligamento do motor trifásico utilizado da rede elétrica da concessionária.

As atuações do sistema proposto na situação de ausência de fase, bem como em sobrecargas mecânicas, foram verificadas por meio das leituras e interpretações dos valores de corrente, de modo que o sistema tolerou a partida da máquina, evitando atuações indevidas, e funcionou corretamente quando houve a detecção de correntes elevadas devido às sobrecargas mecânicas que foram produzidas pela frenagem do rotor quando o freio de Foucault foi ativado.

Deve ser destacado que o protótipo está sendo submetido a melhorias. Esse fato possibilita a abertura para trabalhos futuros, como testes em MITs de rotor bobinado, que tratem da proteção de motores assíncronos, considerando que estes são mais robustos e mais utilizados nas indústrias. A eficácia e a eficiência do sistema microcontrolado proposto foram comprovadas em função dos resultados experimentais, que se apresentaram satisfatórios.

REFERÊNCIAS

AGARELLI, C. Motores elétricos e o consumo setorial de energia. **Revista O Setor Elétrico**, ano 10, n. 112, maio 2015. Disponível em <https://www.osestoreletrico.com.br/ed-112-maio-2015/>. Acesso em: 20 set. 2019.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica**

no Sistema Elétrico Nacional – Prodist: Módulo 8. Brasília, DF: ANEEL, 2010. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisao_1_Retificacao_1.pdf. Acesso em: 16 mar. 2019.

AL KAZZAZ, S. A. S.; SINGH, G. K. Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques. **Electric Power Systems Research**, v. 65, n. 3, p. 197-221, jun. 2003. DOI: 10.1016/S0378-7796(02)00227-4. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779602002274>. Acesso em: 23 mar. 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410:2004**. Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Disponível em: https://hosting.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/normas%20e%20relat%F3rios/NRs/nbr_5410.pdf. Acesso em: 12 maio 2019.

BAZAN, G. H. *et al.* Stator fault analysis of three-phase induction motors using information measures and artificial neural networks. **Electric Power Systems Research**, v. 143, p. 347-356, fev. 2017. DOI: 10.1016/j.epr.2016.09.031. Disponível em: <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/stator-fault-analysis-of-three-phase-induction-motors-using-LGorPm5UgM>. Acesso em: 16 maio 2019.

BEAULIEU, G. *et al.* Power quality indices and objectives for MV, HV and EHV Systems. CIGRE WG 36.07/CIREP Progress. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 17., 2003, Barcelona. **Proceedings** [...]. Barcelona: CIREP, 2003. p 1-6.

BULGARELLI, R. **Proteção térmica de motores de indução trifásicos industriais**. 2006. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

DUGAN, R. C. *et al.* **Electrical power systems quality**. London: McGraw-Hill, 2002.

GARCIA-RAMIREZ, A. G. *et al.* Fault detection in induction motors and the impact on the kinematic chain through thermographic analysis. **Electric Power Systems Research**, v. 114, p. 1-9, sep. 2014. DOI: 10.1016/j.epr.2014.03.031. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779614001266>. Acesso em: 12 dez. 2019.

GLOWACZ, A. *et al.* Early fault diagnosis of bearing and stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals. **Measurement**, v. 113, p. 1-9, aug. 2018. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.08.036. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319309078_Early_fault_diagnosis_of_bearing_and_stator_faults_of_the_single-phase_induction_motor_using_acoustic_signals. Acesso em: 25 nov. 2019.

GLOWACZ, A.; GLOWACZ, Z. Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal imaging. **Infrared Physics and Technology**, v. 81, p. 7-16, 2017. DOI: 10.1016/j.infrared.2016.12.003. Disponível em: <https://isiarticles.com/bundles/Article/pre/pdf/144113.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2019.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000-3-2**: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: limits - limits for harmonic current emissions. Geneva: IEC, 2018.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000-3-3**: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-3: limits - limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current ≤ 16 A per phase and not subject to conditional connection. Geneva: IEC, 2017.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000-3-4**: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-4: limits - limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A. Geneva: IEC, 1998.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000-3-11**: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: limits - limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems - equipment with rated current ≤ 75 A and subject to conditional connection. Geneva: IEC, 2000.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **519-2014**: IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electronic power systems. New York: IEEE, 2014.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **1159-2009**: IEEE recommended practice for monitoring electric power quality. New York: IEEE, 2009.

ISONI, M. **A moderna eficiência energética e seus possíveis efeitos sobre o desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas.** [2012]. Disponível em: http://www.engeparc.com.br/cariboost_files/4-Harmonicas.pdf. Acesso em: 22 mar. 2019.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência.** Rio de Janeiro: LTC/ Grupo Gen, 2011.

MARTINEZ, M. E. M. *et al.* Mapeamento tecnológico referente aos conversores eletrônicos de potência por meio de documentos patentários depositados no Brasil. *In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA (CBQEE)*, 10., 2013, Araxá. (Brasil). **Anais [...]**. Araxá: UFU; UNIFEI, 2013.

MARTINHO, E. **Distúrbios da energia elétrica.** São Paulo: Érica, 2009.

MOHAN, N. **Eletrônica de potência: curso introdutório.** Rio de Janeiro: LTC/Grupo Gen, 2014.

NÓBREGA SOBRINHO, C. A. *et al.* Transformada Wavelet para detecção de barras quebradas em Motores de Indução Trifásicos. **Revista Principia – Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, [S.l.], n. 42, p. 72-83, ago. 2018. ISSN 2447-9187. DOI: 10.18265/1517-03062015v1n42p72-83. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/1663>. Acesso em: 16 fev. 2020.

PRAÇA, F. S. G. Metodologia da pesquisa científica: organização estrutural e os desafios para redigir o trabalho de conclusão. **Revista Eletrônica “Diálogos Acadêmicos”**, v. 8, n. 1, p. 72-87, jan./jul. 2015. Disponível em: http://uniesp.edu.br/sites/_biblioteca/revistas/20170627112856.pdf. Acesso em: 9 maio 2019.

SU, H.; XI, W.; CHONG, K. T. Vibration signal analysis for electrical fault detection of induction machine using neural networks. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INFORMATION TECHNOLOGY CONVERGENCE (ISITC)*, Joenju (South Korea), 2007. **Proceedings [...]**. Joenju: IEEE, 2007. DOI: 10.1109/ISITC.2007.54. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4410632>. Acesso em: 20 mar. 2019.

THOMSEN, A. Controlando um LCD 16x2 com Arduino. **FilipeFlop**, Florianópolis, 11 set. 2011. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/blog/controlando-um-lcd-16x2-com-arduino/>. Acesso em: 16 abr. 2019.

UKIL, A.; CHEN, S.; ANDENNA, A. Detection of stator short circuit faults in three-phase induction motors using motor current zero crossing instants. **Electric Power Systems Research**, v. 81, n. 4, p. 1036-1044, apr. 2011.

DOI: 10.1016/j.epsr.2010.12.003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779610003263>. Acesso em: 13 out. 2019.

WASWANI, R. *et al.* Induction motor fault detection, protection and speed control using Arduino. *In: 2017 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIONS IN INFORMATION, EMBEDDED AND COMMUNICATION SYSTEMS (ICIIECS)*, 2017, Coimbatore (India). **Proceedings [...]**. Coimbatore: IEEE, 2017. p. 1-5. DOI: 10.1109/ICIIECS.2017.8276071. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8276071>. Acesso em: 8 nov. 2019.