



Monitoramento de máquinas elétricas utilizando sensores de efeito Hall e redes de Bragg em fibra ótica

Monitoring of electrical machines using Hall effect sensors and fiber optic Bragg gratings

Vinicius Rodrigues Gemin¹, Uilian José Dreyer²

RESUMO

Este estudo concentrou-se no monitoramento de parâmetros elétricos e mecânicos em um motor de indução trifásico de 15 cv com o objetivo de identificar potenciais falhas na máquina e avaliar o impacto do uso de inversores de frequência. Usando sensores de efeito Hall de tensão e corrente em uma bancada trifásica, analisaram-se os sinais de tensão e corrente do motor durante operações com e sem carga, partida direta e inversor de frequência por meio do equipamento QuantumX a uma taxa de aquisição de 9,6 kHz. Foi observado, através do *software* Matlab, um desequilíbrio significativo nas fases de tensão e frequências harmônicas, que podem causar sobreaquecimento. Além disso, foi feita a inspeção da vibração utilizando sensores de fibra ótica do tipo Redes de Bragg (FBG). Identificou-se frequências relacionadas à excentricidade rotor/estator. Os resultados sugerem que as componentes harmônicas introduzidas pelo inversor de frequência não afetam as frequências de vibração monitoradas com sensores FBG.

PALAVRAS-CHAVE: Efeito Hall; motor de indução; Redes de Bragg de fibra ótica.

ABSTRACT

This study focused on monitoring electrical and mechanical parameters in a 15 cv three-phase induction motor with the purpose of identifying potential faults in the machine and evaluating the impact of using frequency inverters. Using Hall effect voltage and current sensors on a three-phase bench, the motor's voltage and current signals were analyzed during operations with and without load, direct start and frequency inverter using QuantumX equipment at an acquisition rate of 9,6 kHz. Using Matlab software, a significant imbalance in the voltage phases and harmonic frequencies was observed, which can cause overheating. In addition, vibration inspection was carried out using fiber optic sensors of Bragg Gratings (FBG) type. Frequencies related to rotor/stator eccentricity were identified. The results suggest that the harmonic components introduced by the frequency inverter do not affect the vibration frequencies monitored with FBG sensors.

KEYWORDS: Hall Effect; induction motor; Fiber Bragg gratings.

INTRODUÇÃO

O monitoramento de parâmetros elétricos e mecânicos em sistemas industriais é essencial para garantir a eficiência, segurança, confiabilidade dos equipamentos e identificar possíveis anomalias operacionais da máquina (LOURENÇONI, 2016). Diante disso, este trabalho objetiva apresentar o uso de uma bancada trifásica de medição equipada com sensores de efeito Hall e monitoramento da vibração com sensores de fibra ótica em um motor de indução trifásico (MIT).

Os sensores de efeito Hall baseiam-se no princípio físico do efeito Hall, que permite a medição do campo magnético em um condutor quando uma corrente elétrica flui nele (LOURENÇONI,

¹ Bolsista da Fundação Araucária. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: viniciusgemin@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 8085666984512518.

² Docente no Departamento de Eletrotécnica. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: uiliandreyer@utfpr.edu.br. ID Lattes: 6015434912116988.

2016). Essa técnica permite obter corrente e tensão sem contato físico com o circuito monitorado, minimizando assim riscos de curtos-circuitos.

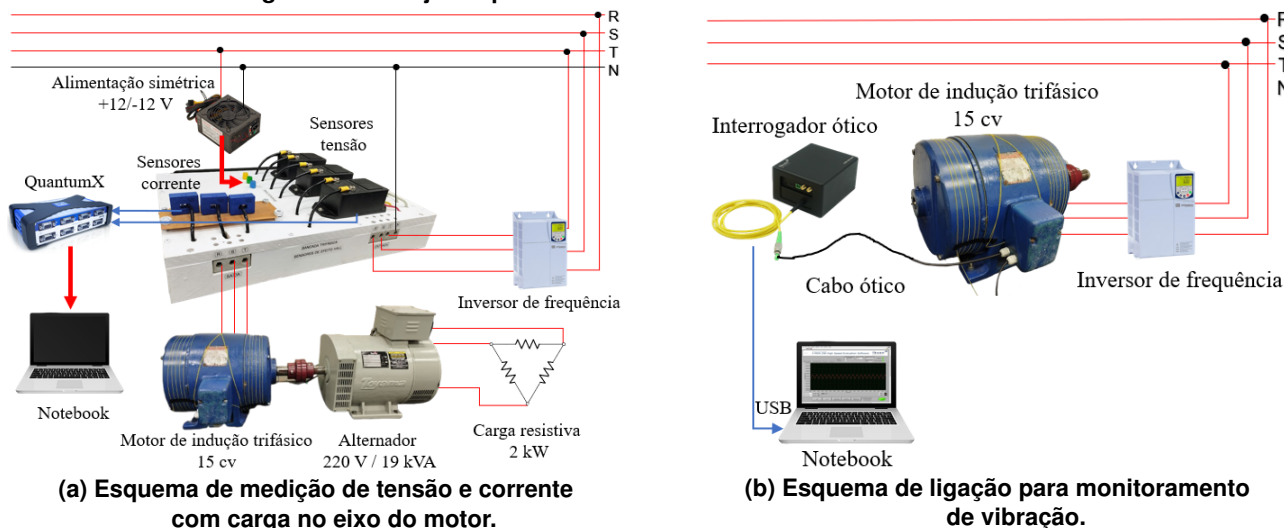
Além disso, a vibração do MIT pode ser causada por forças elétricas e mecânicas (MORAIS SOUSA et al., 2015). As elétricas são causadas devido à fonte de alimentação, e se essa possuir algum desbalanço entre as fases ou distorções harmônicas poderá aumentar a vibração, ruído e temperatura dos condutores, diminuindo a vida útil de isolamento da máquina (CORTES et al., 2014). Para analisar a vibração, foram utilizados sensores de fibra ótica chamados Redes de Bragg de fibra ótica (*Fiber Bragg Gratings* - FBG), que medem temperatura e vibração simultaneamente e são imunes a interferências eletromagnéticas (SOUSA et al., 2012). Esses sensores foram instalados no motor para medir deformações causadas pelas forças elétricas e mecânicas.

Nesse contexto, o artigo explorará os resultados dos sensores de efeito Hall e FBGs ao operar o motor com carga ou sem carga, usando inversor de frequência no acionamento ou partida direta e como as distorções harmônicas presentes na alimentação influenciam na vibração do motor.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizada uma bancada equipada com três sensores de efeito Hall LEM® LV 25-600 e três sensores LEM® LA 55-P com o objetivo de monitorar a tensão e corrente de um motor de indução trifásico (MIT), respectivamente. A aquisição dos dados foi realizada utilizando o equipamento QuantumX e o *software* Catman® Easy, com o processamento dos sinais realizado em algoritmo desenvolvido no Matlab. Os dados de tensão e corrente foram adquiridos a uma taxa de aquisição de 9,6 kHz. Para os testes com carga (Figura 1a), foi acoplado ao eixo do motor um alternador de 19,4 kVA que havia em seus terminais uma carga resistiva conectada em delta de 2 kW / 220 V. Ao mesmo tempo será feita a aquisição da vibração do MIT por meio de redes de Bragg de fibra ótica (FBG). Para adquirir os sinais das FBGs foi utilizado o interrogador ótico da Ibsen Photonics® a uma taxa de aquisição de 6 kHz. O arranjo experimental utilizado neste experimento do motor acionado com inversor de frequência CFW500 da WEG® é apresentado na Figura 1b:

Figura 1 – Arranjos experimentais utilizando sensores efeito Hall e FBGs.



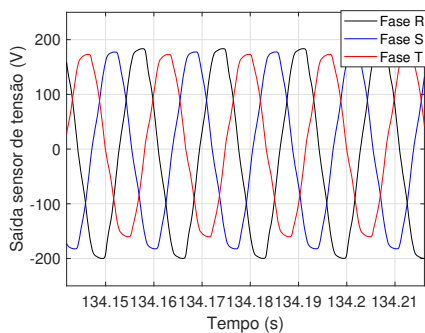
Fonte: Autoria própria (2023).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

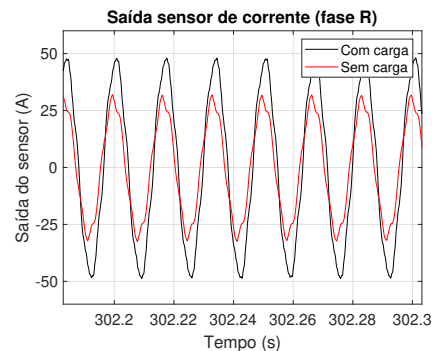
Com o objetivo de observar e investigar as diferentes condições operacionais que o motor é submetido, foram realizados quatro tipos de testes para obter as formas de onda de tensão e corrente: acionamento com inversor de frequência com e sem carga; e partida direta com e sem carga.

Na etapa de teste em Partida Direta, a tensão e corrente trifásicas podem ser visualizadas na Figura 2. Na Figura 3 pode-se observar a representação espectral do conteúdo harmônico presente no sinal de corrente.

Figura 2 – Formas de ondas de tensão e corrente com partida direta.



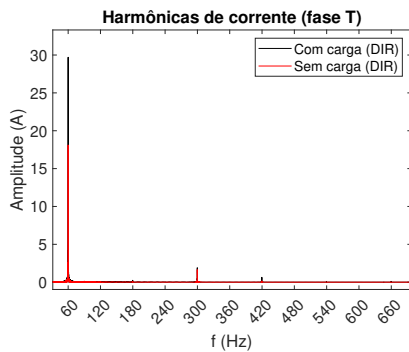
(a) Tensão trifásica rede UTFPR de 127 V.



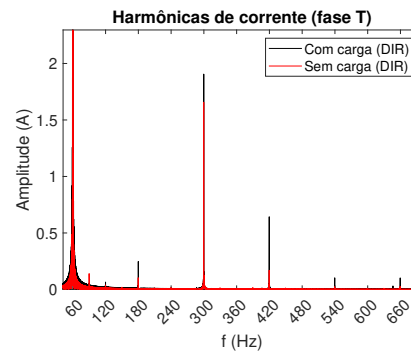
(b) Corrente monofásica com e sem carga.

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 3 – Distorção harmônica da corrente monofásica (a) sem zoom e (b) aplicando zoom vertical entre 60 e 660 Hz.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2023).

A análise da forma de onda de tensão na rede da UTFPR revela um desequilíbrio entre as fases, evidenciado pelo cálculo do valor eficaz das tensões em cada fase usando a função 'rms' do Matlab: Fase R com 139,4 V, Fase S com 129,5 V e Fase T com 120,4 V. Comparando esses valores com o esperado de 127 V, fica claro o desequilíbrio.

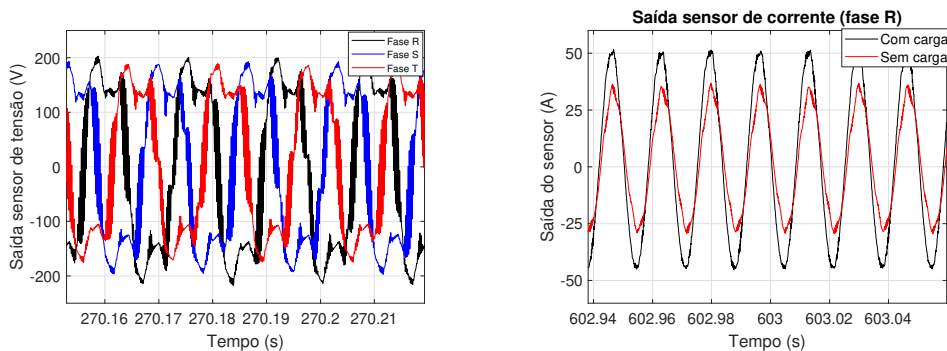
Com a função 'rms' foram obtidos 21,3 A sem carga e 33,7 A com carga de corrente. A Figura 3b mostra que a 5ª harmônica (300 Hz) é a mais presente no espectro. Para demonstrar como esses sinais estão distorcendo a fundamental, será feito o cálculo de distorção harmônica total (DHT) utilizando valores RMS, a partir da Eq. (1),

$$DHT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h}}{I_1} \cdot 100 \quad (1)$$

onde, I_h é a corrente harmônica de ordem "h" em A e I_1 é a corrente fundamental em A. O DHT obtido na operação sem carga foi 9,79% e com carga 7,64%. Há um decréscimo na amplitude das frequências harmônicas em relação à fundamental quando o motor opera com carga.

No teste de partida com o inversor de frequência, é possível verificar que a forma de onda trifásica da tensão, ilustrada na Figura 4a, perdeu sua característica senoidal devido à tensão pulsada pelo inversor (PWM - *Pulse Width Modulation*). As medidas de tensão mostraram desequilíbrio entre as fases e as correntes medidas foram de 20,8 A sem carga e 33,2 A com carga e podem ser visualizadas na Figura 4b.

Figura 4 – Formas de ondas de tensão e corrente com inversor de frequência.

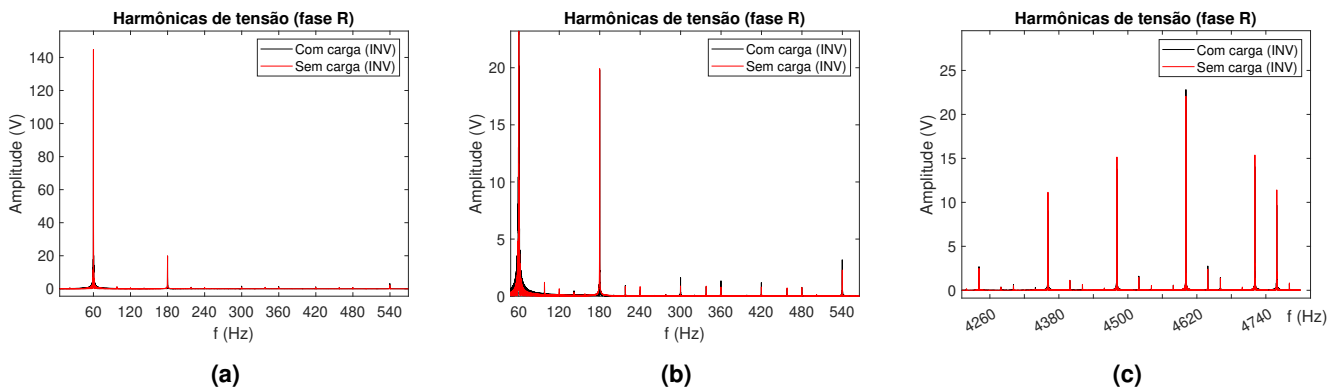


(a) Tensão trifásica do inversor de frequência. (b) Corrente monofásica com e sem carga.

Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 5 é possível analisar a representação espectral do conteúdo harmônico presente no sinal de tensão. A distorção harmônica na tensão do inversor é maior que a da rede, com a 3ª harmônica (180 Hz) sendo a mais acentuada. A análise harmônica da corrente mostrou diferenças em relação à tensão. A Figura 6b mostra a 5ª harmônica (300 Hz) dominando o espectro. Frequências na faixa dos 4 kHz também foram observadas em ambos os gráficos, mas estas não configuram

Figura 5 – Distorção harmônica da tensão de uma fase (a) sem zoom; (b) aplicando zoom vertical; (c) aplicando zoom vertical no final do espectro.



(a)

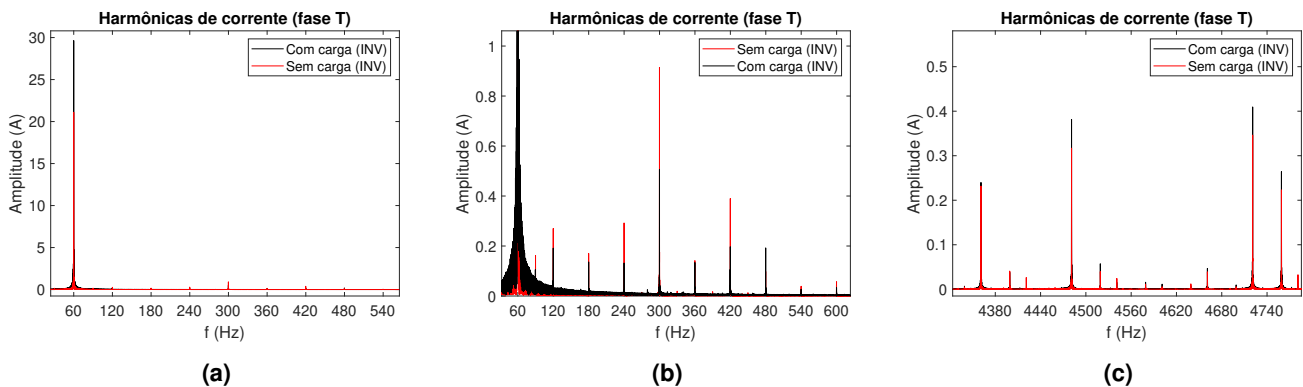
(b)

(c)

Fonte: Autoria própria (2023).

harmônicas por não serem múltiplas da frequência fundamental. Utilizando a Eq. (1) para determinar a DHT da corrente, são obtidos 11,49% sem carga e 6,47% com carga, representando a menor distorção harmônica de corrente exposta neste trabalho. A hipótese do motivo é que o motor pode funcionar como um filtro passivo devido à sua característica indutiva.

Figura 6 – Distorção harmônica da corrente de uma fase (a) sem zoom; (b) aplicando zoom vertical; (c) aplicando zoom vertical no final do espectro.

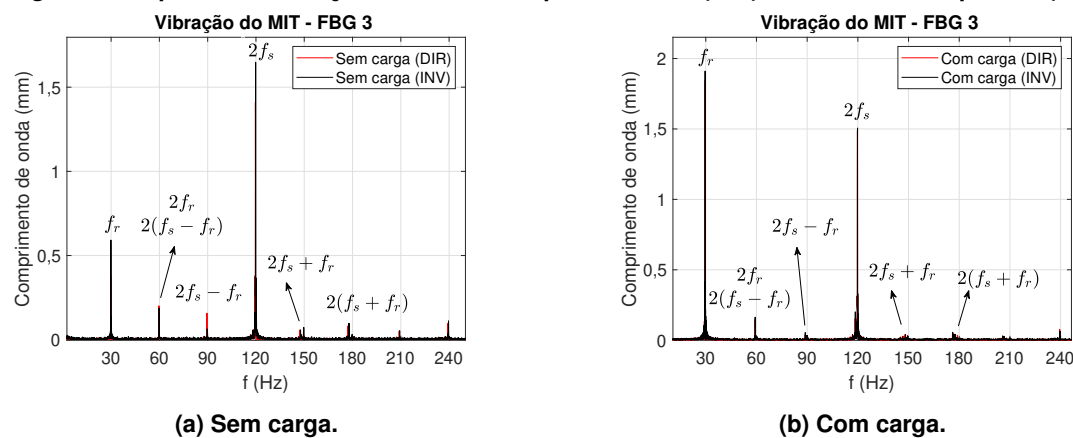


Fonte: Autoria própria (2023).

Os testes com as FBGs ocorreram com o mesmo roteiro utilizado para os sensores de efeito Hall, isto é: com inversor de frequência com e sem carga; e partida direta com e sem carga.

Segundo (MORAIS SOUSA et al., 2015), a excentricidade existente entre rotor e estator de um motor de indução é intrínseca à sua construção. Em uma máquina ideal, onde rotor e estator são concêntricos, não existiriam forças mecânicas agindo no MIT e portanto, a única vibração presente seria duas vezes a frequência de alimentação elétrica. Como na realidade essa excentricidade existe, as frequências de vibração previstas são f_r , $2f_r$, $2f_s$, $2f_s \pm f_r$ e $2(f_s \pm f_r)$ onde f_r e f_s são as frequências de velocidade do rotor (30 Hz) e alimentação elétrica (60 Hz), respectivamente, em Hz (MORAIS SOUSA et al., 2015). A Figura 7 explicita bem a existência dessas frequências de vibração.

Figura 7 – Espectro de vibração do motor com partida direta (DIR) e inversor de frequência (INV).



Fonte: Autoria própria (2023).

Essas são as frequências esperadas de acordo com (MORAIS SOUSA et al., 2015). Além destas, as frequências de 210 Hz e 240 Hz são consideradas harmônicas. Os resultados do



monitoramento de vibração com carga ficaram similares entre si, teste com e sem inversor. No entanto, sem carga, foi observado um aumento de 57,2% na amplitude da componente de 30 Hz e 16,9% em 120 Hz, e em ambos os casos, a maior amplitude foi alcançada operando com o inversor de frequência. A hipótese desse aumento se deve à poluição harmônica gerada pelo inversor. Quando uma carga é acoplada ao motor (Figura 7b), a frequência dominante muda de 120 Hz para 30 Hz devido ao aumento do torque necessário para manter a velocidade nominal.

CONCLUSÕES

Os resultados indicaram um desequilíbrio notável entre as fases na tensão. A vibração, medida com sensores FBG, mostrou frequências associadas à excentricidade rotor/estator e vibrações harmônicas. No entanto, não foi possível relacionar as harmônicas de tensão e corrente com a vibração devido à frequência máxima de aquisição de 6 kHz do equipamento ótico, dificultando a visualização do impacto que frequências na casa dos 4 kHz, geradas pelo inversor, causam na vibração. Foi observado que a amplitude das harmônicas de corrente aumentou com carga na partida direta, mas diminuiu com o inversor de frequência, resultando em uma menor taxa de DHT.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às seguintes organizações brasileiras pela bolsa do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Tecnológica (PIBIC) e pelo apoio financeiro que possibilitou a pesquisa: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação Araucária, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e UTFPR.

CONFLITO DE INTERESSE

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- CORTES, Bruno et al. Comportamento de Motores de Indução Alimentados a partir de Fontes com Tensões Distorcidas e Desequilibradas. **11th International Conference on Industry Applications, Juiz de Fora**, p. 1–7, 2014.
- LOURENÇONI, Vinícius Menezes. **Sistema de Medição Trifásico Utilizando Sensores de Efeito Hall**. Dez. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- MORAIS SOUSA, Kleiton de et al. Vibration measurement of Induction Motor under dynamic eccentricity using optical fiber Bragg grating sensors. **2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)**, 2015. DOI: [10.1109/IMOC.2015.7369059](https://doi.org/10.1109/IMOC.2015.7369059).
- SOUSA, Kleiton de Moraes et al. Determination of Temperature Dynamics and Mechanical and Stator Losses Relationships in a Three-Phase Induction Motor Using Fiber Bragg Grating Sensors. **IEEE Sensors Journal**, v. 12, n. 10, p. 3054–3061, 2012. DOI: [10.1109/JSEN.2012.2210203](https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2210203).