

Detecção de Falhas de Rolamentos em Motores de Indução Utilizando Análise do Envelope de Corrente

Alan de Araújo Rodrigues Nascimento* Josemar de Souza Moreira **
Isabela Oliveira Zaparoli***

* Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del Rei, MG, (e-mail: alan.ufsj@gmail.com).

** Instituto Federal de Minas Gerais, Ibirité, MG, (e-mail: js_moreira99@yahoo.com.br)

*** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, MG, (e-mail: oliveirazaparoli@gmail.com)

Abstract: This paper presents a study and an application of the technique for detecting defects in bearing of induction motors from the stator current signal. The theory used is based on the principle that bearing defects cause changes in the mechanical behavior of the machine. These changes reflect on the electrical behavior of the equipment and can be seen in the stator current signals. To identify the defect in the current spectrum, a linear prediction filter was used, associated with the Hilbert transform for envelope extraction, both implemented in Matlab software, allowing the treatment and analysis of collected signals. The results showed this technique as a possible alternative to the vibration analysis, with the advantage of not having to install accelerometers in the equipment casing and the possibility of application in difficult access machines, thus allowing the remote monitoring of the conditions of the bearings in motors of induction

Resumo: Este artigo apresenta um estudo e uma aplicação da técnica de detecção de defeitos em rolamentos de motores de indução a partir do sinal de corrente do estator. A teoria utilizada baseia-se no princípio de que os defeitos nos rolamentos causam alterações no comportamento mecânico da máquina. Essas alterações refletem no comportamento elétrico do equipamento e podem ser percebidas nos sinais de corrente do estator. Para identificação do defeito no espectro de corrente, foi utilizado um filtro de predição linear, associada à Transformada de Hilbert para extração do envelope, ambas implementadas no software Matlab, permitindo o tratamento e análise dos sinais coletados. Os resultados mostraram essa técnica como uma possível alternativa à análise de vibração, tendo como vantagem ser desnecessário instalar acelerômetros na carcaça do equipamento e a possibilidade de aplicação em máquinas de difícil acesso, permitindo assim o monitoramento remoto das condições dos rolamentos em motores de indução.

Keywords: Induction Motors; Bearing faults; Hilbert Transform; Diagnosis.

Palavras-chaves: Motores de Indução; Falhas em Rolamentos; Transformada de Hilbert; Diagnóstico.

1. INTRODUÇÃO

O Motor de Indução Trifásico (MIT) foi um dos pilares do aumento de produtividade vivido pelas empresas durante a segunda revolução industrial, no final do século XIX. Os MIT's são utilizados em diversas aplicações, se tornando fundamentais no processo produtivo, representando cerca de 90% dos motores elétricos instalados na indústria (Magueijo et al., 2010). Estima-se que esses equipamentos são responsáveis por aproximadamente 75% do consumo de energia das plantas industriais (Ferreira and De Almeida, 2016) e por cerca de 40% a 50% do consumo de toda a capacidade gerada em um país (Imoru et al., 2017). Visto a grande utilização desses motores nas indústrias sua confiabilidade é um fator indispensável, pois qualquer tipo de falha ou interrupção pode acarretar danos materiais, econômicas e sociais (Choi et al., 2018).

Além disso, estas máquinas estão frequentemente expostas a condições de operações hostis, como por exemplo estresses

térmicos, elétricos e mecânicos, excentricidade do motor, sobreaquecimento, vibrações mecânicas, desalinhamento no acoplamento mecânico, entre outros podem contribuir para sua degradação. Estudos mostram que as falhas nos motores de indução ocorrem da seguinte maneira: falhas relacionadas ao estator 28%, falhas de rolamento são 40%, falhas no rotor 8% e as demais somam 24% (Radecki et al., 2016).

Nesse cenário, se a falha causar uma parada não programada do equipamento, o reparo em caráter corretivo normalmente apresenta-se como uma alternativa mais cara e difícil, sobretudo na ausência de peças para reposição imediata no local (Cardoso, 1991). Portanto, técnicas que permitem o monitoramento de equipamentos para a detecção precoce de falhas são ferramentas poderosas que podem assegurar a produtividade e minimizar paradas de processos produtivos.

A técnica consolidada no meio industrial para detecção de falhas em rolamentos (desbalanceamento, desalinhamento entre motor, acoplamento, carga, entre outros) é a análise de vibração (Silva, 2015). Por outro lado, a análise da assinatura

da corrente do motor para detecção de falhas vem se desenvolvendo e ganhando espaço nos últimos anos, se tornando uma alternativa à análise de vibração, apresentando como vantagem o fato de poder ser realizado de forma remota, dispensando o acesso direto ao motor (Leite et al., 2015). Diante da perspectiva promissora da análise da corrente para a detecção de falhas, esse trabalho busca implementar e analisar a técnica para detecção de falhas a partir do sinal de corrente do estator.

Nesse contexto, a principal contribuição deste trabalho é propor um método de identificação de falhas nos rolamentos baseado na assinatura de corrente do estator, simulando um único defeito na pista externa do rolamento de um motor de indução, submetido a diferentes níveis de carga e considerando a operação em regime permanente. Para isso, foi utilizado um filtro de predição linear e a técnica da Transformada de Hilbert (TH), implementados no software Matlab, que permite realizar o processamento e análise do espectro do envelope de corrente, em busca do padrão característico associado à falha em questão.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Falhas de Rolamentos

Os rolamentos são componentes presentes em praticamente todas as máquinas (Nunes, 1989), podendo ser do tipo rolamento de esferas, roletes ou de agulha. Esse trabalho será desenvolvido com base nos rolamentos de esfera (Fig. 1), que são compostos basicamente por dois anéis de diâmetros distintos, sendo o de maior diâmetro chamado de pista externa e o de menor diâmetro conhecido como pista interna. Entre as pistas circula um conjunto de esferas presas por uma gaiola, que assegura a equidistância entre as esferas, protegidas por um escudo. Em motores elétricos, os rolamentos são presos ao eixo do rotor, sendo responsáveis por fixar o mesmo ao conjunto da máquina. Também são responsáveis por permitir o movimento rotativo do eixo, acionando a carga acoplada.

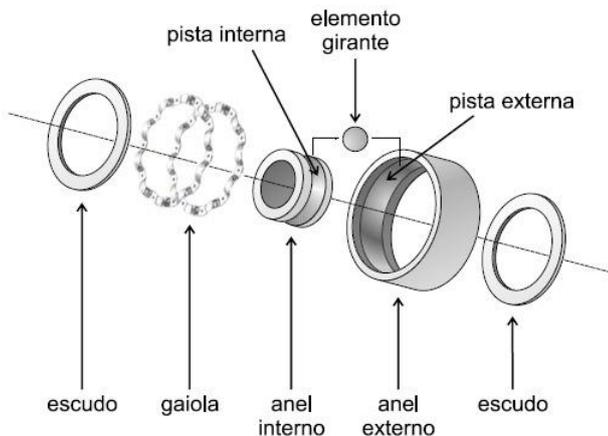


Fig. 1 Componentes de um rolamento de esferas. Fonte: (Silva, 2008).

Durante a sua utilização, os rolamentos estão sujeitos ao aparecimento de defeitos decorrentes do seu processo natural

de desgaste. Esses defeitos podem ser classificados como localizados, quando afetam apenas alguma região do elemento, ou distribuídos, quando comprometem toda a estrutura. Os defeitos distribuídos são de difícil caracterização pelo sinal de corrente. Já os defeitos localizados são mais facilmente identificados. Esses defeitos se iniciam como microfissuras, que evoluem para microtrincas conforme os elementos girantes vão percorrendo a pista e, conseqüentemente, passando pelo ponto de falha. Com o passar do tempo, o defeito vai crescendo até atingir um nível crítico, conforme ilustrado na Fig 2, podendo chegar ao ponto de acarretar uma parada não programada da máquina. (Bezerra, 2004).

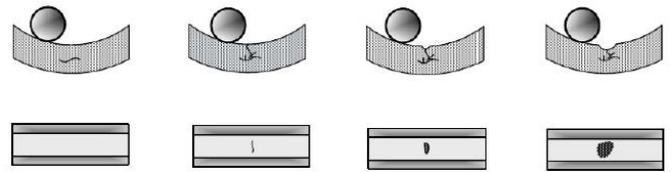


Fig. 2 Surgimento e evolução de defeitos na pista externa de um rolamento. Fonte: (Bezerra, 2004).

Além da degradação natural do rolamento, defeitos podem surgir em virtude de alguns fatores que desencadeiam a deterioração precoce desses elementos, podendo destacar os seguintes (Nepomuceno, 2014): lubrificação inadequada, montagem incorreta, retentores inadequados, desalinhamento, passagem de corrente elétrica, vibrações externas, defeitos de fabricação e fadiga.

No caso da detecção de falhas em rolamentos, o modelo para detecção pela assinatura de corrente é construído com base em duas conseqüências desse tipo de defeito no motor de indução, sendo elas: o movimento radial do rotor e a variação de torque em função da existência da falha (Blodt et al., 2008).

2.2 Frequência Característica para Falha de Rolamento

Para cada tipo de falha de rolamento, uma frequência característica pode ser associada. Essa frequência é determinada em função dos parâmetros dimensionais do rolamento e da condição de trabalho a qual a máquina está submetida (Bezerra, 2004). Os parâmetros dimensionais necessários para a determinação da frequência característica de uma falha localizada são ilustrados na Fig. 3, onde D representa o diâmetro da esfera, d representa o diâmetro primitivo e β representa o ângulo de contato entre a esfera e a pista.

A frequência característica de defeito na pista externa pode ser calculada a partir da Equação (1) (Blodt et al., 2008). Sendo N_e o número de esferas do rolamento e f_r a frequência de rotação do rotor.

$$f_{dpe} = \frac{N_e}{2} f_r \left(1 - \frac{D}{d} \cos \beta \right) = f_r BPF0 \quad (1)$$

A assinatura de corrente do estator é um fenômeno que, assim como na técnica de análise de vibrações, aparece de forma periódica, porém no espectro de corrente com uma frequência característica obtida em função da Equação (1). Portanto, a

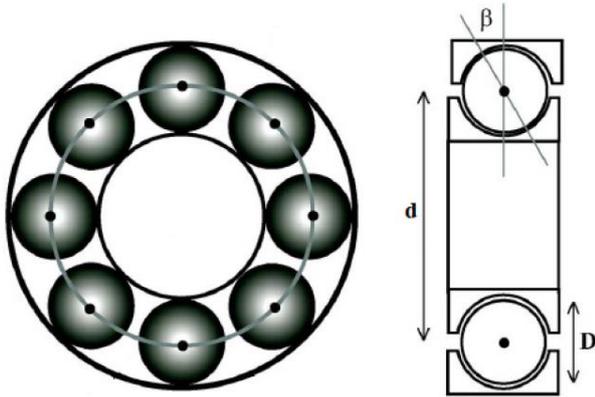


Fig. 3 Parâmetros para cálculo de frequência de falhas em rolamentos.

detecção de falhas pela análise de corrente pode ser considerada como uma forma indireta de medir vibrações, tendo como vantagem a possibilidade de aplicação na detecção de falhas em equipamentos de difícil acesso (da Silva, 2008).

2.3 Detecção de Falhas no Rolamento a Partir da Análise da Assinatura Elétrica

A análise de assinatura elétrica busca detectar a condição de funcionamento e o prognóstico de falhas em equipamentos através do monitoramento de seus sinais elétricos. Em motores de indução, essa técnica permite a detecção de barras quebradas, assimetrias do estator, variações na carga acoplada, parâmetros de qualidade de energia, entre outros problemas elétricos e mecânicos, como os defeitos de rolamento (Silva, 2015).

A técnica utilizada nesse trabalho é conhecida como Análise de Assinatura de Corrente do Motor (*Motor Current Signature Analysis - MCSA*). Essa técnica baseia-se na análise espectral da corrente de uma das fases de alimentação do motor de indução. Em geral, a componente de falha f_E se apresenta no espectro de frequência de acordo com (2), onde f_A representa a frequência de alimentação da máquina, f_C representa a frequência característica associada à falha em estudo e calculada por (1), e k é um valor inteiro que representa o número da componente harmônica associada (Schoen et al., 1995).

$$f_E = f_A \pm kf_C \quad (2)$$

3. MÉTODOS

O presente trabalho tem por objetivo a identificação de falhas de rolamentos baseada na assinatura de corrente do estator, simulando um único defeito na pista externa do rolamento de um motor de indução, submetido a diferentes níveis de carga

As etapas necessárias para implementar a técnica proposta são ilustradas na Fig 4. O sinal de corrente de alimentação do motor é coletado e passado por uma pré-filtragem dos dados composta primeiramente com a aplicação de um filtro de predição linear de 10ª ordem, seguido de uma nova filtragem

através de um filtro *Butterworth* passa-faixa de 4ª ordem, na faixa de 420 a 720 Hz, posteriormente foi aplicada a Transformada de Hilbert para extração do envelope, e por fim, aplicada a FFT para a plotagem do seu respectivo espectro.

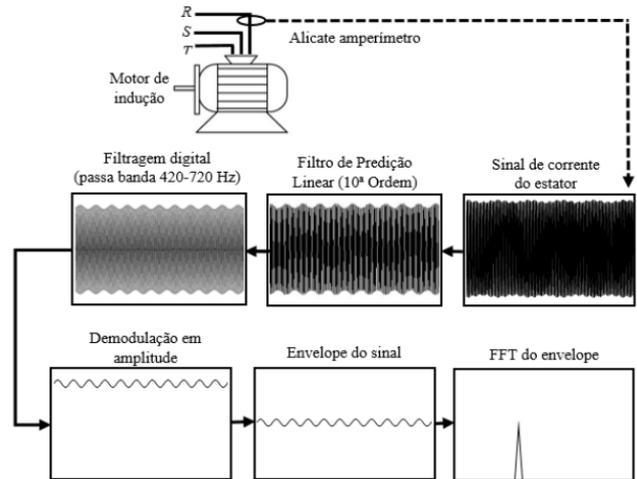


Fig. 4 Fluxograma da metodologia.

Os testes experimentais foram realizados no Laboratório de Máquinas e Transformadores (LAMET) da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), onde está localizada a bancada de testes (Fig. 5), constituída por um motor de indução trifásico [1], WEG 3 CV, 220 V, 60 Hz, 4 polos e velocidade nominal de 1735 rpm, alimentado por um varivolt trifásico [2]. O MIT é acoplado ao motor de corrente contínua [3] operando como gerador, conectado a um banco de resistores [4]. O conjunto gerador CC e banco de resistores representa um sistema de carga para o motor de indução, e o nível de carga varia conforme a corrente de campo aplicada ao gerador CC, que é controlada por meio de um varivolt monofásico [5] ligado a um retificador [6]. Entre o motor de indução e o gerador foi inserido o transdutor de torque [7] (*Magtrol*, modelo TM309/011) do torquímetro digital [8] para medir o nível de torque e garantir a repetitividade dos testes.

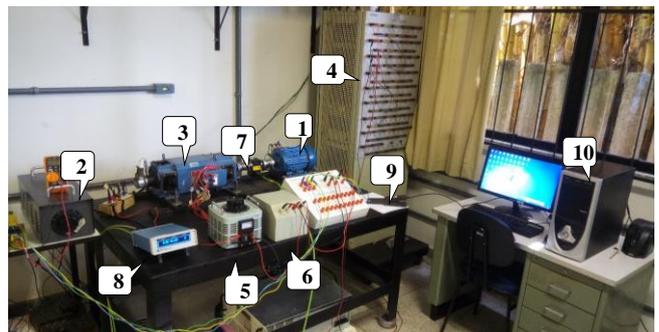


Fig. 5 Bancada Experimental.

Para a aquisição dos sinais de corrente, foi utilizada uma sonda de corrente [9] (A622 AC/DC - 100 Hz *Tectronix*), conectada a placa de aquisição [10] (NI PCI- 4461 da *National Instruments*). A placa possui duas entradas analógicas simultâneas de 24-bits (taxa de amostragem máxima de 80 kHz) e duas saídas analógicas simultâneas de 24-bits (taxa de amostragem de 204.8 kS/s) com range de entrada de ± 316 mV

até 42,4 V. Além disso, ela possui filtro *anti-aliasing* até 92 kHz.

Para a aquisição de sinais utilizada foi o *software VibSoft-80*, com uma frequência de amostragem de 5,12 kHz durante 102,4 segundos, gerando um total de 524288 amostras. O filtro *anti-aliasing* foi configurado para o tipo passa-baixa com frequência de corte de 2,5 kHz.

Para os testes experimentais foram coletados nove sinais com falha e nove sem falha para cada condição de operação: a vazio e com 50%, 80% e 100% do torque nominal. Os sinais foram filtrados utilizando um filtro *Butterworth* passa-faixa de 4ª ordem, na faixa de 420 a 720 Hz. Em seguida, foi aplicada a Transformada de *Hilbert* para extração do envelope e, por fim, foram obtidos os respectivos espectros dos envelopes da corrente.

Este trabalho se restringiu a analisar a detecção de uma falha na pista externa, de um rolamento modelo 6204 2Z, fabricado pela empresa SKF. O defeito foi simulado por um furo radial, conforme mostrado na Fig. 6.



Fig. 6 Rolamento com furo na pista externa para simulação de defeito.

4. RESULTADOS

Para o cálculo da frequência de passagem de esferas do anel externo (*Ball Pass Frequency of Outer Ring – BPFO*), considerou-se $\beta = 0^\circ$ (ângulo de contato entre as esferas e a pista externa) resultando em $BPFO = 3,05226$. A Equação (1) foi aplicada para cada frequência de rotação do rotor f_r , correspondente a um nível de carga específico (0, 50, 80 e 100%), para o defeito na pista externa. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela (1).

Tabela 1. Frequência característica para falha na pista externa para diferentes níveis de carga.

Percentual de Carga (%)	Velocidade (rpm)	Frequência (Hz)
0	1798	91,466 ± 2
50	1772	90,143 ± 2
80	1753	89,177 ± 2
100	1737	88,465 ± 2

Apresenta-se nos gráficos subsequentes a assinatura de corrente de todos os sinais coletados, sem falha e com falha, em todas as condições de carga. As Figs. 7 e 8 mostram,

respectivamente o espectro de frequência de todos os sinais, 9 com e 9 sem a presença da falha, e o espectro médio. Considerando o motor de indução operando com 100% do torque de carga.

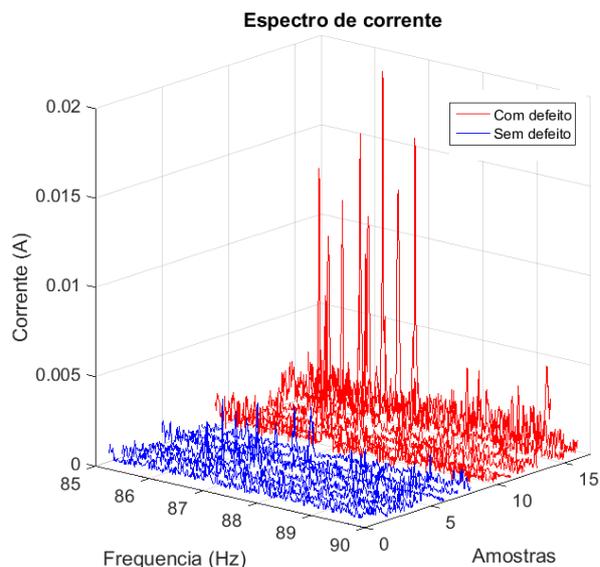


Fig. 7 Espectro de todos os sinais de corrente com e sem falha: 100% de carga.

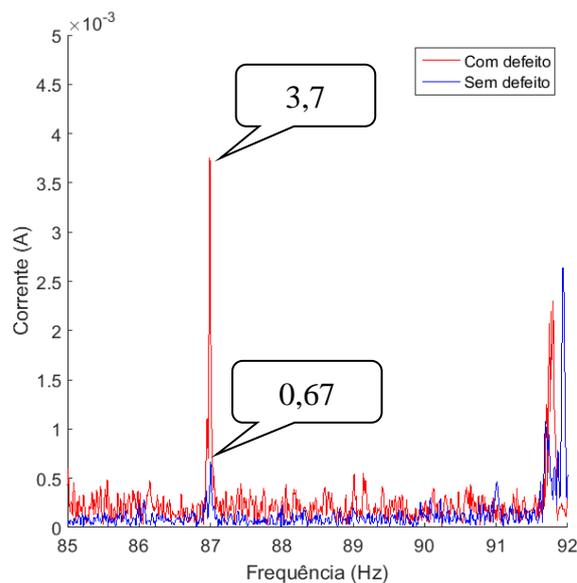


Fig. 8 Espectro médio do sinal de corrente com e sem falha: 100% de carga.

As mesmas análises serão aplicadas para o motor sob a condição de 80% do torque de carga. As Figs. 9 e 10 mostram a o espectro de todos os sinais e o espectro médio, respectivamente.

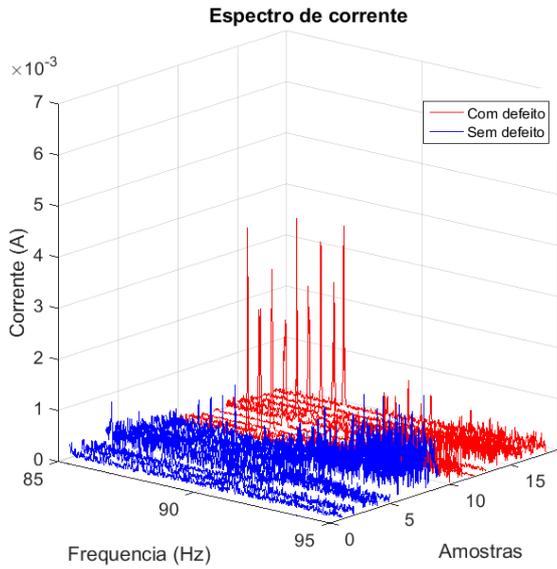


Fig. 9 Espectro de todos os sinais de corrente com e sem falha: 80% de carga.

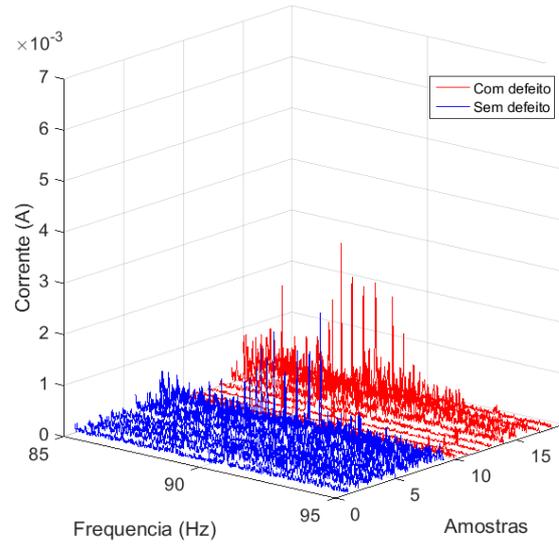


Fig. 11 Espectro de todos os sinais de corrente com e sem falha: 50% de carga.

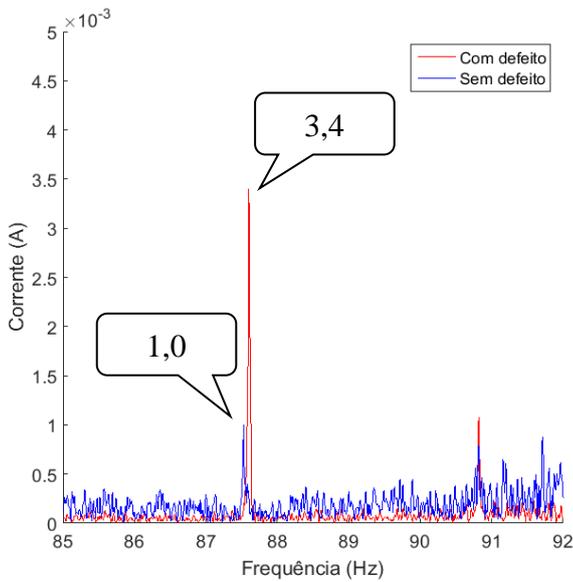


Fig. 10 Espectro médio do sinal de corrente com e sem falha: 80% de carga.

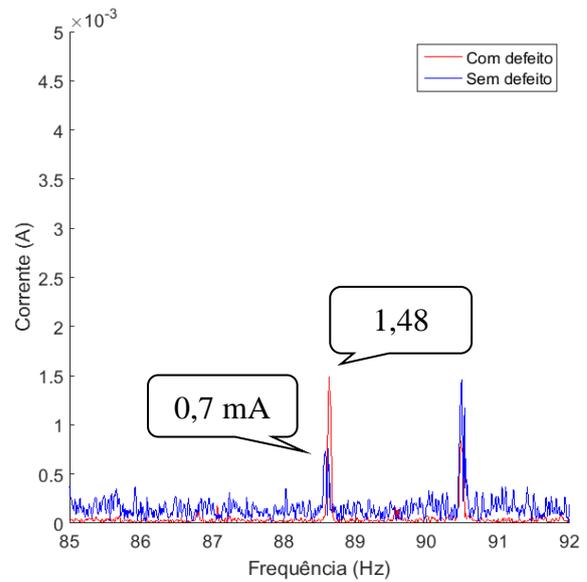


Fig. 12 Espectro médio do sinal de corrente com e sem falha: 50% de carga.

As Figs. 11 e 12 mostram, respectivamente o espectro de frequência de todos os sinais, e o espectro médio. Considerando o motor de indução operando com 50% do torque de carga.

Para o motor operando a vazio as Figs. 13 e 14 mostram a o espectro de todos os sinais, com falha e sem falha, e o espectro médio, respectivamente.

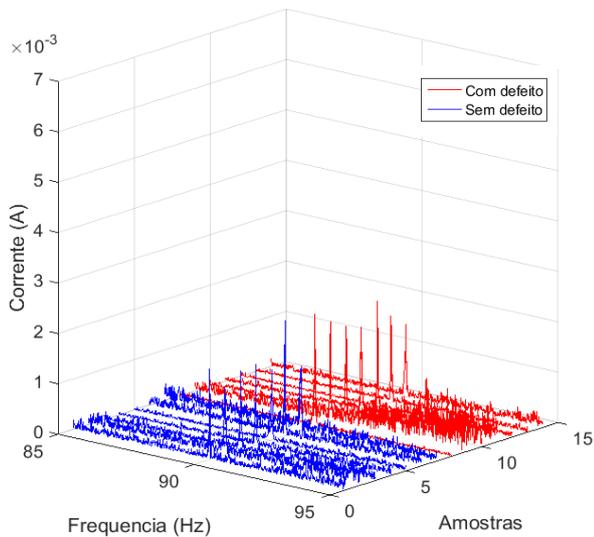


Fig. 13 Espectro de todos os sinais de corrente com e sem falha: 0% de carga.

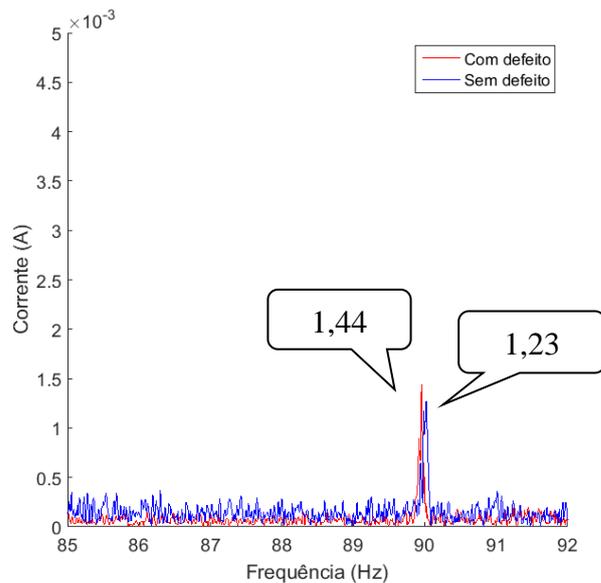


Fig. 14 Espectro médio do sinal de corrente com e sem falha: 0% de carga.

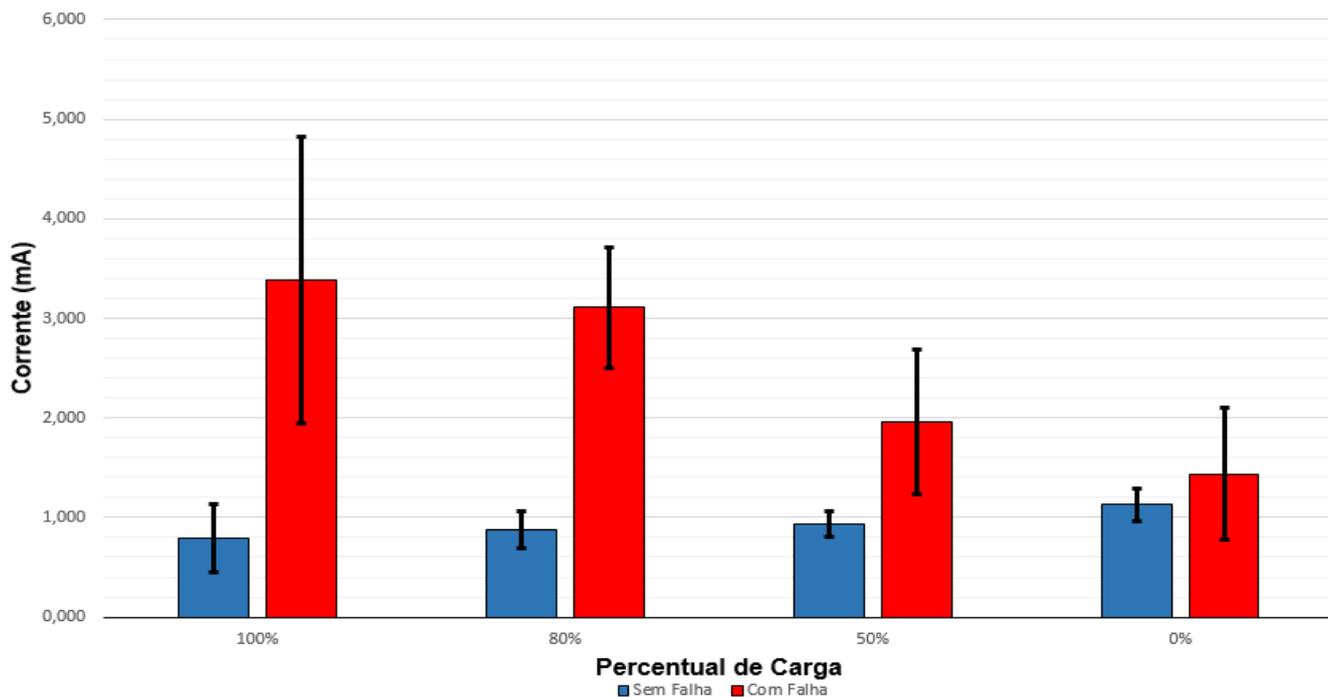


Fig. 15 Média (barras azuis e vermelhas) e desvio padrão (barras pretas) para as condições sem defeito e com defeito de rolamento.

Na Fig. 15 tem-se uma síntese dos resultados obtidos por meio de um estudo estatístico, onde é apresentado à média e o desvio padrão das amostras coletadas para cada nível de carga. É possível perceber que, apesar de as amostras apresentarem uma dispersão elevada, para os testes com 100% e 80% de carga, a menor amplitude da corrente para a condição de falha é significativamente maior que a maior amplitude de corrente para a condição sem falha. Os resultados obtidos mostram com maior clareza a possibilidade de detecção de falha na condição de plena carga e de 80% do torque do motor. Para o ensaio com 50% do torque nominal, a frequência característica, na

presença da falha também apresentou níveis de excitação superiores ao encontrado na condição sem defeito. Porém, a diferença entre valores é pequena, o que pode dificultar o diagnóstico do defeito. Para a condição a vazio, ocorre interseção entre a amplitude do sinal com falha e o sinal sem falha, impossibilitando a identificação de presença ou ausência de falha.

Segundo Silva (2015) os melhores resultados para detecção de falhas são obtidos para condições de carga acima de 70%. Para condições de baixo escorregamento, o diagnóstico por

assinatura de corrente apresenta resultados satisfatórios apenas em motores de grande porte.

Com o estudo estatístico desse artigo, é possível observar que, apesar de as amostras apresentarem uma dispersão elevada, para os testes com 100% e 80% do torque nominal, a menor amplitude da corrente para a condição de falha é significativamente maior que a maior amplitude de corrente para a condição sem falha. Para a condição de 50% de carga, as amplitudes de corrente estão próximas de apresentarem interseção, dificultando o diagnóstico. Para a condição a vazio, ocorre interseção entre a amplitude do sinal com falha e o sinal sem falha, impossibilitando a identificação de presença ou ausência de falha

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a aplicação da técnica de detecção de falhas de rolamento pela assinatura de corrente, utilizado um filtro de predição linear e a Transformada de Hilbert. Através dos resultados obtidos, observa-se que é possível detectar defeitos em rolamentos para condições de maior carregamento, com melhor desempenho. No entanto, situações onde a carga é menor dificultam a obtenção de resultados conclusivos.

Assim, a análise de corrente pode se tornar uma alternativa confiável para a detecção de falhas em rolamentos, desde que as condições de trabalho da máquina estejam controladas e conhecidas no momento da coleta de dados.

A aplicação dessa técnica pode possuir especial importância em condições onde a máquina se encontra em locais de difícil acesso ou que possam expor os profissionais de manutenção a grandes riscos. Sua natureza não invasiva e de fácil implementação pode permitir o acompanhamento remoto e em tempo integral do estado de conservação dos elementos mecânicos dos motores, facilitando a atividade de planejamento das intervenções de manutenção e evitando a ocorrência de paradas não programada. Em trabalhos futuros espera-se melhorar o algoritmo com o objetivo de identificar a falha em seu estágio inicial.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG/INERGE/CAPES pelo apoio financeiro. À Universidade Federal de São João de Rei - UFSJ e ao Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ibirité.

REFERÊNCIAS

- Bezerra, R. D. A. (2004). Detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração. *Tese de Doutorado, Estadual de Campinas*.
- Blodt, M., Granjon, P., Raison, B., & Rostaing, G. (2008). Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring. *IEEE transactions on industrial electronics*, 55(4), 1813-1822.
- Cardoso A. J. M. (1991). Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos, *Coimbra Editora*.
- Choi, D., Kang, T. J., Lee, S. B., Kim, J., & Kim, J. (2018). Stator insulation testing for appliance motors with

- aluminum windings: Applying solutions to root causes of failure. *IEEE Industry Applications Magazine*, 24(6), 14-24.
- Ferreira, F. J., & de Almeida, A. T. (2016, September). Energy savings potential associated with stator winding connection mode change in induction motors. *In 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (pp. 2775-2783). IEEE.
- Imoru, O., Bhaskar, M. A., Jimoh, A. A. G., & Hamam, Y. (2017). Early Diagnosis of Induction Machine Stator Winding Faults by Discrete Wavelet Transform. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 18(4).
- Leite, V. C., da Silva, J. G. B., Veloso, G. F. C., da Silva, L. E. B., Lambert-Torres, G., Bonaldi, E. L., & de Oliveira, L. E. D. L. (2014). Detection of localized bearing faults in induction machines by spectral kurtosis and envelope analysis of stator current. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(3), 1855-1865.
- Magueijo, V., Fernandes, M., Matos, H. A., Nunes, C. P., & Calau, J. P. (2010). Medidas de eficiência energética aplicáveis à indústria portuguesa: um enquadramento tecnológico sucinto.
- Nepomuceno, L. X. (2014). Técnicas de manutenção preditiva-vol. 1 (Vol. 1). Editora Blucher.
- Nunes, M. A. D. C. (1989). Diagnóstico de defeitos em rolamentos pela técnica do envelope. *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina*.
- Radecki, A., Dębowski, A., Wójcik, M., & Lipnicki, P. (2016, June). Evaluation of a diagnostic information on common electrical faults contained in signals of an inverter-fed AC IM drive with current-oriented control. *In 2016 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)* (pp. 286-291). IEEE.
- Silva, J. G. B. D. (2008). Aplicação da Análise de componentes Principais (PCA) no diagnóstico de defeitos de rolamentos através da assinatura elétrica de motores de indução. *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá*.
- Silva, J. G. B. D. (2015). Modelagem e Tratamento dos Sinais da Assinatura Elétrica de Máquinas para Melhoria do Diagnóstico de Falhas. *Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá*.
- Schoen, R. R., Habetler, T. G., Kamran, F., & Bartfield, R. G. (1995). Motor bearing damage detection using stator current monitoring. *IEEE transactions on industry applications*, 31(6), 1274-1279.