

JAIC

Journal of Applied Instrumentation and Control

A Incerteza ao Detectar Falha de Barra Quebrada em Baixo, Médio e Nomina Escorregamento

Ana C. S. Araújo, Julia F. Oliveira, João P. Carvalho e Paulo C. M. Lamim

Resumo—Os motores de indução são amplamente utilizados no setor industrial, principal razão pelo qual sua manutenção se tornou um tema relevante nas últimas décadas. Diversas técnicas de detecção de falhas foram desenvolvidas em função dessas máquinas. No presente trabalho, três técnicas de demodulação de sinais são abordadas a fim de testar, comparar e apontar as incertezas por meio da distribuição normal. Essas técnicas são a Transformada de Hilbert, a *Empirical Demodulation* e *Fault Frequency Highlighting*. Aplicando-as nos sinais de corrente a fim de detectar o defeito de barra quebrada em motores de indução foi possível analisar o comportamento das respostas obtidas e das situações de falso negativo ou positivo, principalmente em baixo escorregamento, de 0% a aproximadamente 10% de carga.

Palavras-chaves—Diagnóstico de Falha de Barra Quebrada, Baixo Escorregamento, Motor de Indução.

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, cerca de 85% dos motores utilizados no setor industrial são motores de indução, tal destaque se dá pela sua versatilidade, robustez e seu relativo baixo custo de manutenção quando comparado a outras máquinas rotativas [1]-[6]. Apesar destes atributos, estes motores estão sujeitos a estresses de várias naturezas: térmicos, elétricos, mecânicos e ambientais, que podem alterar a sua performance e resultar no surgimento de diversas falhas, acarretando, assim, na perda temporária ou até mesmo permanente da máquina [3]-[5], [7].

Ana Carolina Santos Araújo é do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, MG 36307-352, Brasil (e-mail: anacarolinasantosaújo@hotmail.com).

Julia Ferreira Oliveira é do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, MG 36307-352, Brasil (e-mail: juliafoliveira0511@gmail.com).

João Pedro Carvalho é do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, MG 36307-352, Brasil (e-mail: mcjpedro@gmail.com).

Paulo César Monteiro Lamim Filho é do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, MG 36307-352, Brasil (e-mail: lamim@ufsj.edu.br).

As falhas relacionadas ao rotor englobam um total de 5% a 10% das falhas que o motor de indução está susceptível [3]. Dentre essas anomalias, o defeito de barra quebrada é a terceira falta mais comum nessas máquinas [8]. A ocorrência dessa falha, geralmente, ocasionada por falta de manutenção, sobrecarga e estresse térmico nesses equipamentos, o que causa uma série de perturbações como flutuações de velocidade e vibrações indesejadas [9]. Além de produzirem novos componentes de frequência nas correntes do estator e do rotor [6], [10].

Por se tratar de uma falha que gera o aumento da temperatura do rotor no local do rompimento, facilita-se o colapso de barras adjacentes, o que agrava, gradativamente, a condição operativa do motor [3], [9]. A detecção prévia dessa falta torna-se, então, um instrumento importante, podendo evitar prejuízos financeiros acentuados causados por interrupções não planejadas na planta industrial [5], [8].

Várias técnicas para a detecção preditiva de falhas em motores de indução têm sido desenvolvidas nos últimos anos. É possível destacar um grande número de métodos de monitoramento e diagnóstico do comportamento da máquina com base na análise espectral de frequência, resultado da Transformada Rápida de Fourier (FFT) em sinais no domínio do tempo [7], [9], [11]-[15].

No entanto, normalmente, os componentes de falha podem não estar nitidamente visíveis neste espectro, visto que os conteúdos de frequência presentes em um determinado sinal de tempo carregam diversas informações que podem estar correlacionadas ao defeito ou não. O que dificulta, ou ainda disfarça, a identificação da frequência real da falha, durante a respectiva análise. Nesse contexto, a demodulação de sinais, tais como a Transformada de Hilbert, a *Empirical Demodulation* e *Fault Frequency Highlighting*, tornou-se uma operação fundamental em diversas situações, proporcionando uma visualização mais clara do componente de falha, pela eliminação de características indesejadas e não úteis. [8],[16]-[19].

Dentre as ferramentas de detecção de falha em motores de indução, a Análise da Assinatura da Corrente do Motor (MCSA) é a técnica mais comumente usada para o diagnóstico de barras quebradas [4], [6], [8], [19]. Esse método tem como base a verificação de assimetrias do rotor através do estudo

espectral da corrente do estator. Além de se tratar de um método não invasivo [20], a análise da corrente do estator apresenta também como vantagens o custo e a simplicidade de medição [17]. Entretanto, a MCSA tem suas limitações que podem acarretar em um diagnóstico inconclusivo ou levar a uma interpretação de falso positivo ou falso negativo.

Recentemente, várias pesquisas retratam a dificuldade de identificar a falha de barra quebrada para condições em que a máquina opera com baixo escorregamento, de 0% a aproximadamente 10% de carga. Nesse caso, a frequência de barra quebrada associada ao sinal de tempo modulado não é claramente visível no espectro do sinal, sendo uma consequência do baixo escorregamento, aproximadamente igual a zero. A modulação da frequência característica da falha será um componente sobreposto no componente da frequência fundamental da corrente do estator. Assim, o vazamento espectral, a necessidade do tempo de aquisição elevado e de uma alta taxa de amostragem são os principais inconvenientes relatados. Limitações estas que aumentam a complexidade da análise e seu custo de implementação [6], [11] - [14], [18].

Neste contexto, o presente trabalho propõe o estudo das modulações características da falha de barras quebradas no sinal de corrente do motor de indução submetido a diversas condições de carga e, conseqüentemente, a escorregamentos que variam entre zero até os seus valores nominais. Para isso, foram utilizadas e comparadas três técnicas de demodulação de sinais: Transformada de Hilbert (HT), a *Empirical Demodulation* (ED) proposta em [21] e *Fault Frequency Highlighting* (FFH) proposta em [22]. Tendo este estudo como principal objetivo identificar as possíveis regiões de incerteza ao longo de todos os níveis de carga que estas máquinas podem estar submetidas, principalmente na condição de baixo escorregamento.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A. Ferramenta de análise de falha

Ao ocorrer uma falha de barra quebrada no motor de indução, um campo eletromagnético de rotação reversa é produzido e modulações surgem na amplitude da corrente do estator. Conseqüentemente, são excitadas componentes espectrais nas frequências representadas pela Equação 1, onde $k = 0,1,2,\dots$, sendo f a frequência de alimentação e s o escorregamento [11], [14], [20].

$$f_{falha} = (1 \pm 2ks)f \quad (1)$$

O nível de carga em que opera o motor de indução interfere na análise da modulação da falha de barra quebrada [20], pois quanto menor o escorregamento em que a máquina trabalha, as frequências de banda laterais que caracterizam a presença desse defeito se aproximam da frequência fundamental, não possibilitando o diagnóstico. De acordo com Equação 1, adotando $f = 60$ Hz, $k = 1$ as frequências características da falha de barra quebrada são aproximadamente: 55,28 Hz e 64,71 Hz para o motor de indução na condição de 100% de carga ($s = 0,039$); 55,28 Hz e 64,71 Hz para 50% de carga ($s = 0,021$); 60Hz para 0% de carga ($s = 0,0083$). A Fig. 1 ilustra as frequências características de falta no espectro do sinal de corrente para as condições de 0%, 50% e 100% de carga. Os gráficos na Fig. 1 mostram que a medida em que a carga

diminui, ocorre um decréscimo da amplitude das frequências de falhas ($2sf$), paralelamente a este fato, ocorre uma aproximação da frequência portadora (60 Hz). Fato este que leva a uma sobreposição das frequências a serem analisadas.

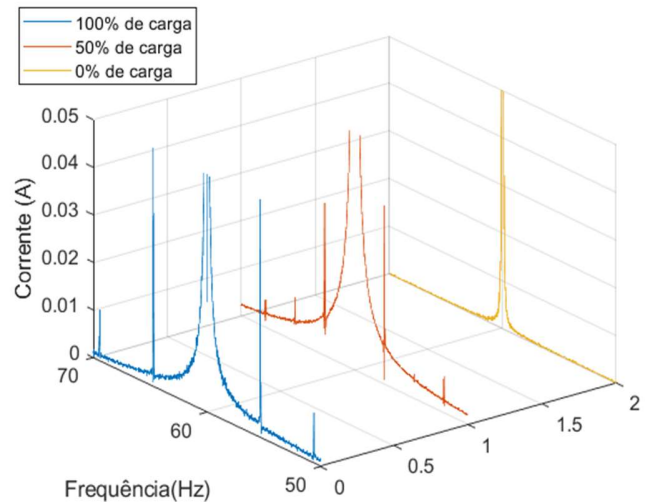


Fig. 1. Espectro do sinal de corrente para 0%, 50% e 100% de carga

Para identificar falhas em motores de indução, várias técnicas de demodulação de sinais têm sido propostas, evidenciando as principais informações a serem consideradas no processo de análise da falha.

Uma das técnicas mais usada é a Transformada de Hilbert (HT). A HT é uma ferramenta matemática descrita pela Equação 2.

$$H(x(t)) = y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \frac{1}{1-\tau} d\tau \quad (2)$$

Através desta, é possível criar um sinal analítico $z(t)$ definido pela Equação 3. Este pode ser representado pela soma de sua parte real $r(t)$ e imaginária $y(t)$, na qual a primeira parte é o próprio sinal e a segunda parte é obtida através da aplicação da HT.

$$z(t) = r(t) + jy(t) \quad (3)$$

Este sinal, $z(t)$, pode ser transcrito em sua forma polar através da Equação 4, onde $A(t)$ e $\theta(t)$ representam a amplitude e a fase instantânea do sinal analítico, respectivamente.

$$z(t) = A(t)e^{j\theta(t)} \quad (4)$$

A magnitude do sinal analítico representa o envelope de um sinal base. Este carrega as informações contidas do defeito, apresentando a frequência característica de falha no espectro de

frequência quando aplicado a Transformada Rápida de Fourier no envelope.

Outra técnica que pode ser usada como ferramenta para a detecção de falha em motores de indução, tendo como vantagem uma programação computacional de baixa complexidade é a *Empirical Demodulation* (ED). Igualmente a HT, a ED permite a identificação de barras quebradas através da obtenção do envelope do sinal, o qual representa a sequência de tempo desejada que contém os dados de falha [21]. Para uma sequência temporal modulada $x = x(t_n) = x[n]$ ($n = 1, 2, \dots, N$), sendo N o número total de amostras, as etapas da ED são descritas pelo fluxograma da Fig. 2.

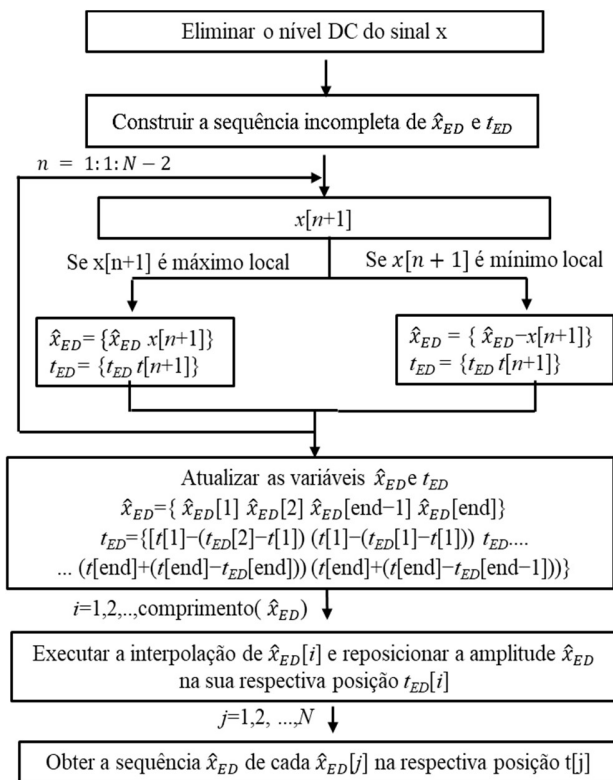


Fig. 2- Fluxograma do Algoritmo ED.

Similarmente às outras duas técnicas de demodulação de sinais, a *Fault Frequency Highlighting* (FFH) tem como objetivo obter um sinal no domínio da frequência que destaca as características das modulações de falha em relação às outras amplitudes [22]. Esta é amplamente utilizada na identificação de falhas elétricas internas e externas de sinais modulados de fluxo magnético e corrente elétrica dentro do setor da manutenção preditiva por se tratar de uma técnica computacional de fácil implementação. Para uma sequência temporal modulada $x = x(t_n) = x[n]$ ($n = 1, 2, \dots, N$), sendo N o número total de amostras, a técnica FFH compreende no fluxograma da Fig.3

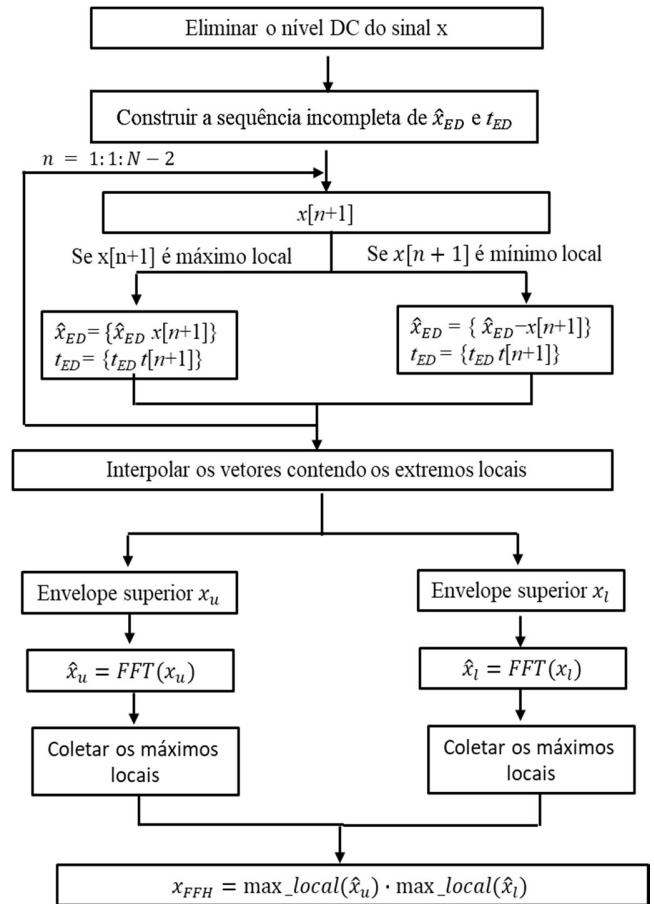


Fig. 3- Fluxograma do Algoritmo FFH

III. Ferramenta Estatística

A frequência característica da falha de barra quebrada no espectro demodulado pode ser visualizada na Equação 5. Observa-se que para o motor operando com carga nominal, 50% de carga e a vazio tem-se a frequência de falha igual à 4,71 Hz, 2,011 Hz e 0,0054 Hz, respectivamente.

$$f_{falha} = \pm 2sf \tag{5}$$

Conforme mostra a Fig. 4, com a redução da condição de carga do motor a amplitude da corrente na frequência característica diminui se aproximando de zero. Desse modo, a detecção de falha na barra do rotor operando em baixo escorregamento tem se tornado um desafio para os pesquisadores, devido à dificuldade em constatarem a presença da falha. Diante disto, vários trabalhos foram propostos [11] - [14], [18], porém nenhum deles abordam as incertezas das análises na condição de baixo escorregamento.

Neste contexto, um estudo criterioso utilizando ferramentas estatísticas será apresentado com intuito de analisar a incerteza ao detectar falha de barra quebrada empregando as três técnicas de demodulação de sinais. Será utilizado a distribuição normal mostrada na Fig. 5 como representação da distribuição normal provável de um conjunto de elementos. A distribuição normal possui dois parâmetros: a média μ onde se encontra

centralizada a curva e o desvio padrão que descreve o grau de dispersão da distribuição. Por meio da distribuição normal, limites de imprecisão serão traçados e explorados

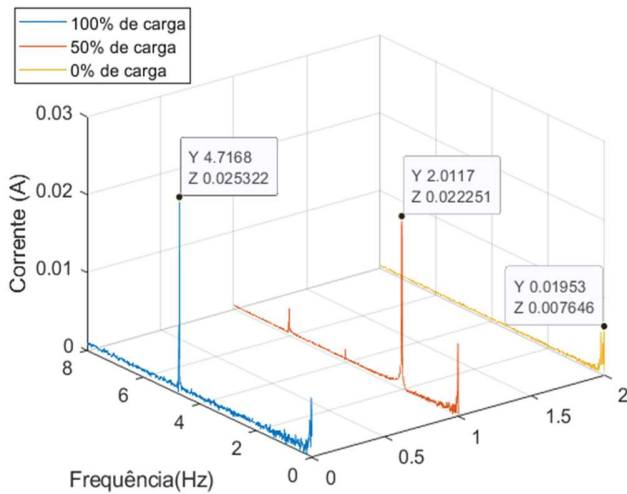


Fig. 4. Espectro do sinal de corrente demodulado para 0%, 50% e 100% de carga

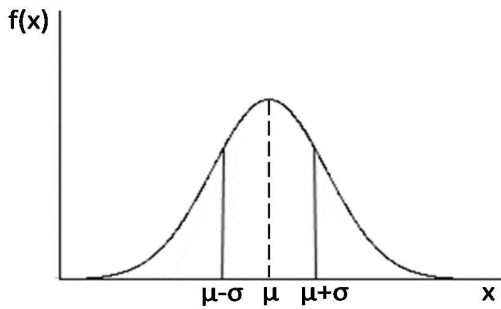


Fig. 5. Distribuição normal.

A probabilidade é a chance real de ocorrer um determinado evento, isto é, a chance de ocorrer uma medida em um determinado intervalo. Assim, a probabilidade de uma observação assumir um valor entre dois pontos quaisquer é igual à área compreendida entre esses dois pontos [23]

A Fig. 6 representa a distribuição normal associada a probabilidade de uma amostra estar contida nos limites da curva gaussiana. Observa-se que quanto mais se afasta do centro da curva normal, obtém-se mais área compreendida abaixo da mesma. Assim, 68,26% das amostras estarão contidas na área do gráfico quando o intervalo entre o ponto de inflexão e o eixo de simetria corresponde a um desvio padrão. Quando se tem dois desvios padrões de distância do centro da curva gaussiana, 95,44% dos dados estarão compreendidos na largura da distribuição normal. Finalmente, apresentando o espaçamento de três desvios padrões, tem-se 99,73% de probabilidade de uma distribuição normal estar dentro do intervalo entre o ponto de inflexão e o eixo de simetria. [23].

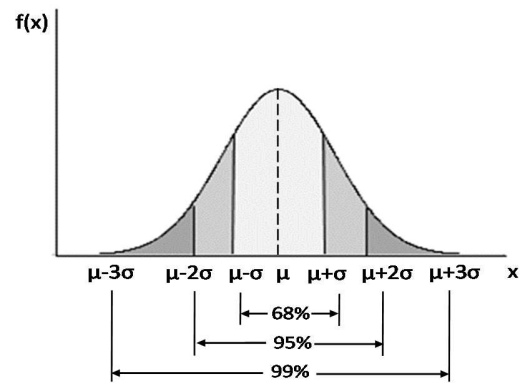


Fig. 6. Probabilidades associadas com uma distribuição normal

III. METODOLOGIA

Para uma melhor compreensão da relação falha/sinal, experimentos controlados em uma bancada experimental são indispensáveis [19]. No estudo, foram realizados testes experimentais no Laboratório de Máquinas e Transformadores (LAMET) da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Fig. 7. O arranjo experimental utilizado permitiu 9 repetições dos testes para o estado do motor sem defeito e com defeito de barra quebrada sob as mesmas condições de carga. Variou-se a porcentagem de carga de operação do motor durante os testes de 0% até 100% de carga de forma crescente de 10% em 10%. Conseqüentemente, foram obtidos 297 espectros numa série de 99 testes para cada condição da máquina.

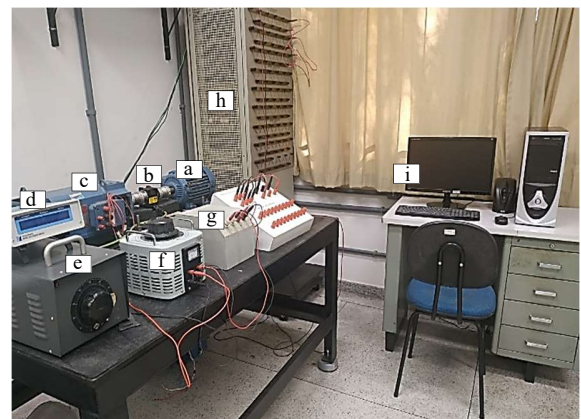


Fig. 7. Bancada experimental.

Para realização dos testes experimentais, foi utilizado um motor de indução trifásico (a) WEG 3CV, 220V, 60Hz, 4 polos, classe de isolamento N, FS 1,15, Ip/In 6,5, IP 55 e velocidade nominal de 1735 rpm. Este foi alimentado por um variômetro trifásico (e) acoplado a um gerador CC (c) conectado a um banco de resistências (h) com o objetivo de simular a carga. O torque de carga foi ajustado variando a corrente de campo da máquina CC. Um transformador de tensão variável monofásico (f) conectado a um retificador (g) fornece a energia de campo. Para garantir a precisão das condições desejadas nos testes, foi instalado entre o motor de indução e o gerador um transdutor de transferência de torque TN (b) conectado a um torquímetro

digital modelo 3410 da Magtrol (d), permitindo monitorar o torque e a velocidade do motor durante os ensaios.

Na etapa de coleta das amostras de corrente, primeiramente, foi utilizado um rotor sem falha. Posteriormente, foi utilizado um rotor com falha de barra quebrada. A fim de simular a condição de defeito deste mesmo motor de indução trifásico, inseriu-se no rotor um furo de 5 mm sobre uma de suas barras, conforme apresentado na Fig. 8.

Nos ensaios, os sinais de corrente foram coletados por meio de um alicate amperímetro (A622 AC/DC - 100Hz *Tectronix*), conectado à placa de aquisição NI PCI - 4461 da *National Instruments* situado no computador (i) com frequência de amostragem ajustada para 5,12 kHz e tempo de aquisição 102,4 s, totalizando 524288 amostras. Os resultados obtidos foram processados utilizando o software *Matlab R2017a*.



Fig. 8. Rotor com a simulação da falha de barra quebrada

Para cada condição de operação do motor, foram analisados nove sinais de corrente, totalizando 198 sinais no domínio do tempo que foram demodulados utilizando cada uma das três técnicas: ED, HT e FFH. A partir das amplitudes na frequência característica de falha de barra quebrada, localizadas entre 0,127 Hz e 4,727 Hz no espectro de corrente demodulado, foi realizada uma análise estatística, tendo-se como base a curva média das amplitudes e a curva média da gaussiana para cada valor de escorregamento.

IV. RESULTADOS

Na Fig. 9, tem os resultados das médias das amplitudes das amostras de correntes nas frequências características de falha com a operação do motor em condição normal e de defeito para diferentes condições de cargas (de 0% a 100%).

Deve-se ressaltar, na análise da Fig. 9, que a tendência das curvas não se modifica apesar das diferentes técnicas de demodulação empregadas no sinal da corrente. Assim, demonstra-se as eficiências das técnicas: HT, ED e FFH. Nota-se ainda, um comportamento linear das médias para condição de operação do motor de indução a vazio até a porcentagem de 30% da condição máxima de carga na presença da falha.

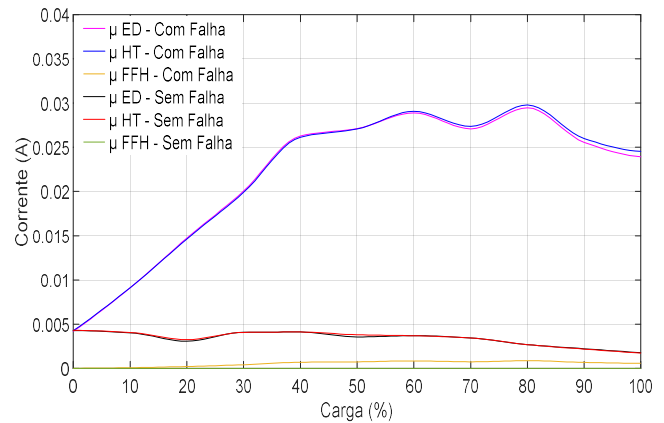


Fig. 9. Média das amplitudes das correntes na frequência característica de falha de barra quebradas.

Nas Figuras. 10 a 12, para cada técnica de demodulação, respectivamente, HT, ED e FFH, pode-se observar os desvios padrões e as médias das amplitudes de corrente para o estado do motor sem defeito e com defeito de barras quebradas dos nove testes realizados. É importante observar que, estando o motor a vazio até 4% de carga nominal, nas condições sem defeito e com defeito de barras quebradas, tanto a média quanto o desvio padrão possuem valores bem próximos em todos os gráficos, tendo uma maior possibilidade de uma detecção errônea da presença ou não da barra quebrada no motor de indução.

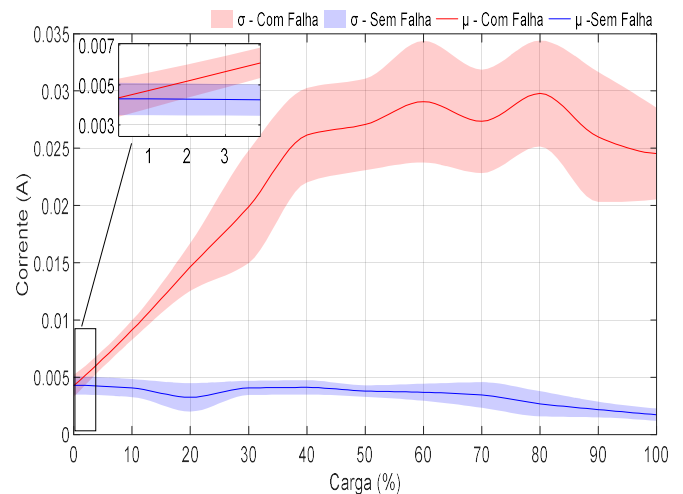


Fig. 10. Gráfico com a amplitude média para o método HT, contendo a área delimitada pelo desvio padrão.

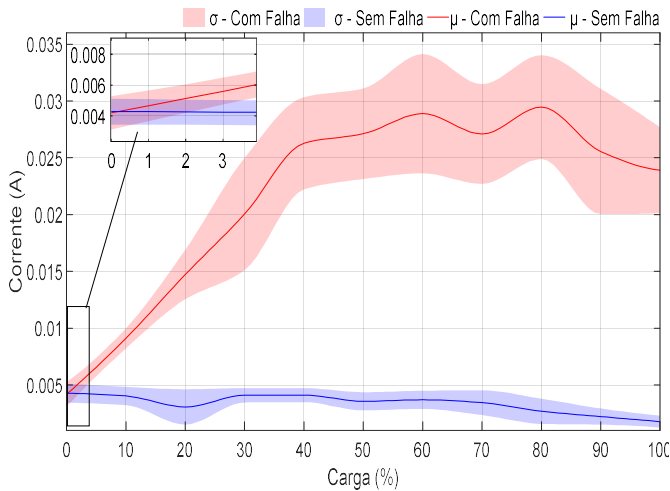


Fig. 11. Gráfico com a amplitude média para o método ED, contendo a área delimitada pelo desvio padrão

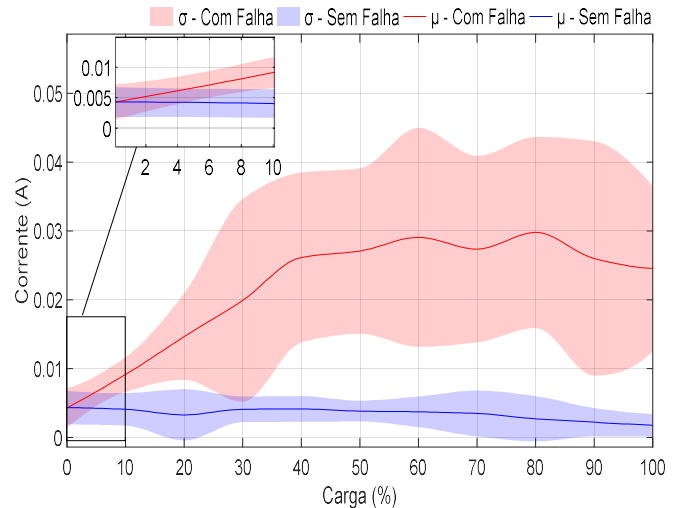


Fig. 13. Gráfico com a amplitude média para o método HT, contendo a área delimitada pelo desvio padrão com fator multiplicativo.

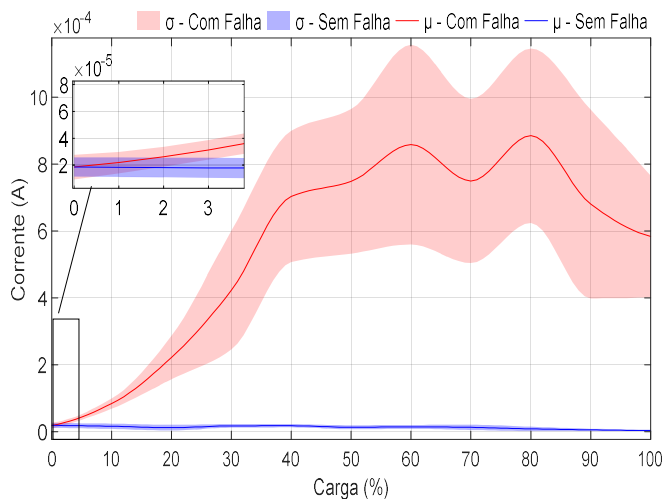


Fig. 12. Gráfico com a amplitude média para o método FFH, contendo a área delimitada pelo desvio padrão

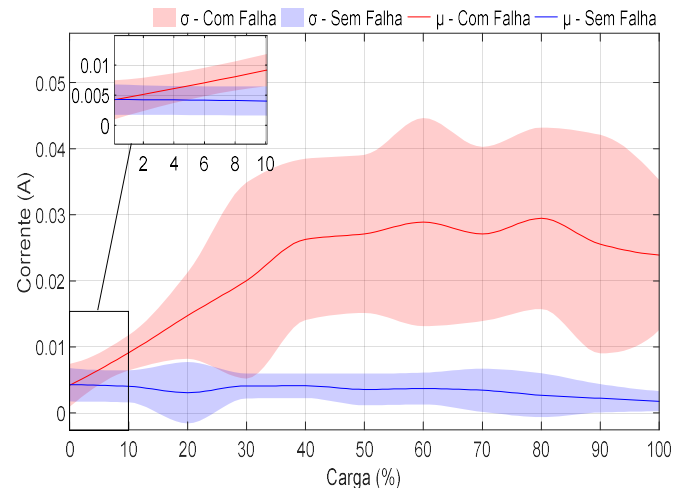


Fig. 14. Gráfico com a amplitude média para o método ED, contendo a área delimitada pelo desvio padrão com o fator multiplicativo.

Para maior confiabilidade do estudo estatístico dos dados coletados, utilizou-se um fator multiplicativo de 3 nos valores de desvio padrão. Obedecendo a distribuição gaussiana, de acordo com as literaturas esse artifício garante que 99,73% dos possíveis valores das amplitudes de interesse estarão dentro das margens obtidas pela curva de distribuição normal, um número superior aos 68,26% oferecidos na aplicação do desvio padrão sem o fator multiplicativo. Sendo assim, é possível observar as áreas de interseção entre as distribuições gaussianas dos sinais de corrente para as situações com falha e sem falha e concluir em quais pontos se tem possibilidade de falsos positivos, ou falsos negativos, no diagnóstico de falha de barra quebrada no motor de indução.

As Figuras 13 a 15 apresentam as médias das amplitudes de interesse com e sem a presença de barra quebrada, de 0% a 100% de carga e com uma área definida pelos desvios padrões das amostras, com o fator multiplicativo aplicado às curvas de desvio padrão.

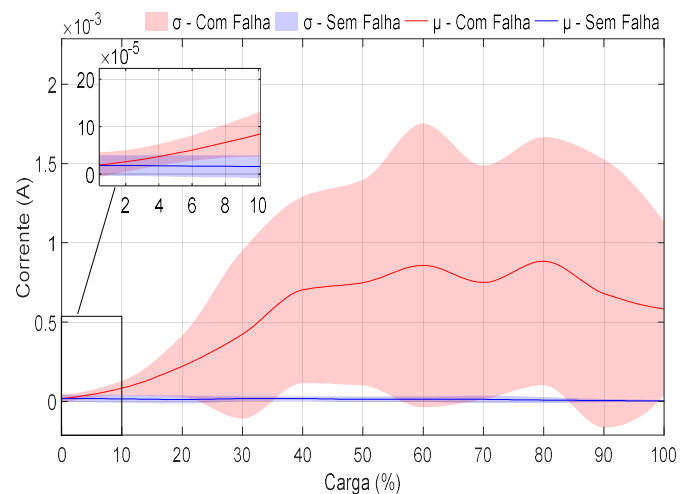


Fig. 15. Gráfico com a amplitude média para o método FFH, contendo a área delimitada pelo desvio padrão com fator multiplicativo.

Ao analisar as curvas de distribuição normal com e sem a falha de barra quebrada, é possível inferir que os métodos ED e HT possuem regiões de interseções para valores de carga inferiores a 10%, logo, ao se analisar esta faixa, as possibilidades de um falso positivo ou falso negativo existem. No intervalo de 0 até 30% da condição nominal de carga do motor de indução, a média e os desvios padrões estão próximos de apresentarem interseção, dificultando também o diagnóstico preciso. No entanto, para valores de escorregamento superiores a este intervalo, é possível observar uma margem de segurança entre as zonas de desvio padrão, contudo, conclui-se que para o diagnóstico de uma falha de barras quebradas nesta região (de 30% a 100%) é mais confiável.

Já para o método FFH, observam-se vários pontos de interseção onde as áreas de incerteza ao detectar falha de barra quebrada no motor de indução aumentam. Nota-se ao comparar as técnicas que na Fig. 15 não apresenta o mesmo comportamento das Fig. 13 e Fig. 14. Contudo, a ferramenta FFH não se mostra totalmente precisa ao apontar uma falha de barra quebrada devido a quantidade de áreas de interseção ao longo de todo o eixo de porcentagem de carga em que o motor de indução opera.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo entre três diferentes métodos de demodulação de sinais para detecção de falha de barra quebrada em motores de indução: *Empirical Demodulation*, Transformada de Hilbert e *Fault Frequency Highlighting*. O baixo custo computacional e a simplicidade de implementação de tais técnicas permitem que estas sejam aplicadas em sistemas de monitoramento e diagnóstico de falhas online e de tempo real. Desse modo, facilita-se a atividade de planejamento das intervenções de manutenção industriais, evitando, assim, a ocorrência de paradas não programadas, que normalmente resultam em prejuízos materiais, econômicos e sociais.

A ED e HT mostram-se como ferramentas de demodulação eficazes para detecção de falhas de barras quebradas e seus resultados apresentam um comportamento similar. Através dos resultados experimentais obtidos, é possível chegar à conclusão de que ambos os métodos detectam com melhor precisão essa falha em condições de maior escorregamento. No entanto, quando a carga é pequena, a obtenção de resultados conclusivos precisos fica comprometida.

Tal análise enfatiza a necessidade de desenvolver novas ferramentas para aprimorar a detecção de falha de barras quebradas para intervalos de baixo escorregamento, visto que, em aplicações industriais, nem sempre o motor estará operando com altos níveis de torque.

Os resultados para a ferramenta de demodulação FFH não se mostram confiáveis como os dos outros dois métodos estudados para detectar a falha de barra quebrada, devido à quantidade de áreas de interseção ao longo de todo o eixo de porcentagem de carga. Sendo indicado então, para a detecção da falha de barra quebrada em motores de indução a aplicação das técnicas ED e HT.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Universidade Federal de São João del-Rei, em especial ao Departamento de Engenharia Elétrica, pelo suporte técnico e financeiro no Laboratório de Máquinas e Transformadores.

REFERENCIAS

- [1] I. Martin-Diaz and D. Morinigo-Sotelo, O. Duque-Perez, R.J. Romeo-Troncoso, "Early fault detection in induction motors using Adaboost with imbalanced small data optimized sampling," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 53, no. 3, pp. 3066-3075, May- June 2017, 10.1109/TIA.2016.2618756.
- [2] G. Mirzaeva and K. I. Saad, "Advanced Diagnosis of Stator Turn-to-Turn Faults and Static Eccentricity in Induction Motors Based on Internal Flux Measurement", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 54, no. 4, pp. 3961-3970, July- Aug. 2018, 10.1109/TIA.2018.2821098.
- [3] M. Otero, P. M. de la Barrera, G. R. Bossio and R. Leidhold, "A strategy for broken bars diagnosis in induction motors drives," *IEEE Trans. Latin America*, vol. 16, no. 2, pp. 322-328, Feb. 2018, 10.1109/TLA.2018.8327382.
- [4] N. Medeiros M Nascimento, S. P. P. Silva, P. P. Reboucas Filho and C. Marques Sa Medeiros, "Higher-Order Statistics applied to machine learning as an approach to identify broken rotor bars in induction motors," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no.8, pp. 2267-2274, Aug. 2018, 10.1109/TLA.2018.8528245.
- [5] D. B. B. de Deus, C. A. N. Sobrinho, F. A. Belo, A. V. Brito, J. G. G. d. S. Ramos and A. C. L. Filho, "Density of maxima approach for broken bar fault diagnosis in low slip and variable load conditions of induction motors," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, pp.1-1, June 2020, 10.1109/TIM.2020.3003107.
- [6] B. Bessam, A. Menacer, M. Boumehraz and H. Cherif, "Detection of broken rotor bar faults in induction motor at low load using neural network," *ISA Transactions*, vol. 64, pp. 241-246, Sept 2016, 0.1016/j.isatra.2016.06.004.
- [7] M. Lopez-Ramirez, L. M. Ledesma-Carrillo, F. M. Garcia-Guevara, J. Munoz-Minjares, E. Cabal-Yepez and F. J. Villalobos-Pina, "Automatic Early Broken-Rotor-Bar Detection and Classification Using Otsu Segmentation," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 112624-112632, June 2020, 10.1109/ACCESS.2020.3002545.
- [8] P. C. M. Lamim Filho, L. M. R. Baccarini, F. B. Batista, D. A. Alves, "Broken rotor bar detection using empirical demodulation and wavelet transform: suitable for industrial application", *Electr Eng*, vol. 100, no 4, pp. 2253-2260, May 2018, <https://doi.org/10.1007/s00202-018-0700-1>.
- [9] G. Mirzaeva and K. I. Saad, "Advanced Diagnosis of Rotor Faults and Eccentricity in Induction Motors Based on Internal Flux Measurement," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 54, no. 3, pp. 2981-2991, 2018, 10.1109/TIA.2018.2805730.
- [10] R. Valles-Novo, J. de Jesus Rangel-Magdaleno, J. M. Ramirez-Cortes, H. Peregrina-Barreto and R. Morales-Caporal, "Empirical Mode Decomposition Analysis for Broken-Bar Detection on Squirrel Cage Induction Motors," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 64, no. 5, pp. 1118-1128, May 2015, 10.1109/TIM.2014.2373513
- [11] A. Naha, A. K. Samanta, A. Routray and A. K. Deb, "A method for detecting half-broken rotor bar in lightly loaded induction motors using current," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 65, no. 7, pp. 1614- 1625, July 2016, 10.1109/TIM.2016.2540941
- [12] C. G. Dias and F. H. Pereira, "Broken Rotor Bars Detection in Induction Motors Running at Very Low Slip Using a Hall Effect Sensor," *IEEE Sensor J.*, vol. 18, no. 11, pp. 4602 - 4613, June 2018, 10.1109/JSEN.2018.2827204.
- [13] I. Martin-Diaz, D. Morini go-Sotelo, O. Duque-Perez, and R. de J. Romero-Troncoso, "An experimental comparative evaluation of machine learning techniques for motor fault diagnosis under various operating conditions," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 3, pp. 2215-2224, May-June 2018, 10.1109/TIA.2018.2801863.
- [14] O. E. Hassan, M. Amer, A. K. Abdelsalam and B. W. Williams, "Induction motor broken rotor bar fault detection techniques based on fault signature analysis – a review," *IET Electric Power Applications*, vol. 12, no. 7, pp. 895-907, Aug. 2018, 10.1049/iet-epa.2018.0054.
- [15] P. A. Panagiotou, I. Arvanitakis, N. Lophitis, J. A. Antonino-Daviu and K. N. Gytakis, "A New Approach for Broken Rotor Bar Detection in

- Induction Motors Using Frequency Extraction in Stray Flux Signals," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 55, no. 4, pp. 3501-3511, July-Aug. 2019, 10.1109/TIA.2019.2905803
- [16] A. Sapena-Bano, M. Pineda-Sanchez, R. Puche-Panadero, J. Martinez-Roman and Ž. Kanović, "Low-cost diagnosis of rotor asymmetries in induction machines working at a very low slip using the reduced envelope of the stator current," IEEE Trans. Energy Convers, vol. 30, no. 4, pp. 1409-1419, Dec. 2015, 10.1109/TEC.2015.2445216.
- [17] I. O. Zapparoli, L. M. Rabelo Baccarini, P. C. M. Lamim Filho, and F. B. Batista, "Transient envelope current analysis for inter-turn short-circuit detection in induction motor stator," J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng., vol. 42, no. 2, Jan. 2020, 10.1007/s40430-020-2188-7.
- [18] R. Puche-Panadero, M. Pineda-Sanchez, M. Riera-Guasp, J. Roger-Folch, E. Hurtado-Perez, and J. Perez-Cruz, "Improved Resolution of the MCSA Method Via Hilbert Transform, Enabling the Diagnosis of Rotor Asymmetries at Very Low Slip," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 24, no. 1, pp.52-59, Mar. 2009, 10.1109/TEC.2008.2003207.
- [19] K. N. Gyftakis, J. A. Antonino-Daviu, R. Garcia-Hernandez, M. D. McCulloch, D. A. Howey and A. J. Marques Cardoso, "Comparative Experimental Investigation of Broken Bar Fault Detectability in Induction Motors," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 52, no. 2, pp. 1452-1459, Mar-Apr. 2016, 10.1109/TIA.2015.2505663.
- [20] L. Saidia, F. Fnaiech, H. Henao, G-A. Capolino G. Cirrincione, "Diagnosis of broken-bars fault in induction machines using higher order spectral analysis", ISA Trans., vol. 52, no. 1, pp. 140-148, Jan. 2013, 10.1016/j.isatra.2012.08.003.
- [21] F. B. Batista, P. C. M. Lamim Filho, R. Pederiva and V. A. D. Silva, "An Empirical Demodulation for Electrical Fault Detection in Induction Motors," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 65, no. 3, pp. 559-569, Mar. 2016, 10.1109/TIM.2015.2509398.
- [22] P. C. M. Lamim Filho, F. B. Batista, R. Pederiva and V. A. D. Silva, "Electrical fault diagnosis in induction motors using local extremes analysis," Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 22 no. 3, pp.321-332, Aug. 2016, 10.1108/JQME-07-2015-0026.
- [23] D.C. Montgomery and G.C. Runger "Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros." 6. ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2003.

Received: 04 May 2021;

Accepted: 05 July 2021;

Published: 14 July 2021



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The Uncertainty of Detecting a Failure of Broken Bars in Low, Middle and Nominal Slip

Abstract – Induction motors are widely used in the industry sector, thereby their maintenance has become a relevant topic. Several techniques of detection of failures have been developed around these machines. In this paper, three techniques are approached in order to test, compare and point out the uncertainties that surround them. These techniques are the Hilbert Transform, the Empirical Demodulation and Fault Frequency Highlighting. Applying them in a broken bar defect was possible to analyze the behavior of the obtained answers and through a statistical study were traced zones of uncertainty in the detection of the defect. With the results was possible to concluded that the process of detecting broken bar fault may present false negative or positive situations, especially in low slipping.

Keywords – bar fault diagnosis, low slip. three-phase induction motor.