

ANÁLISE UTILIZANDO TRANSFORMADA DE WAVELET PARA DETECÇÃO DE FALHAS DE BARRAS ROMPIDAS DE ROTORES EM MÁQUINAS ELÉTRICAS DE INDUÇÃO

Efraim F. Silva
Pós-Graduando em Automação e Controle IFSP/ Campus São Paulo

Cesar da Costa
Pós – Doutor em Engenharia Mecânica/ UNESP
Docente do Departamento de Elétrica
IFSP/Campus São Paulo

RESUMO

Atualmente as máquinas elétricas rotativas de indução estão presentes em grande parte da nossa rotina, podendo evidenciar-se nos carros elétricos, trens, elevadores, ar-condicionado, aquecedores, geradores de energia etc. O motor de indução trifásico também conhecido pela sigla MIT é o principal componente de uma máquina elétrica rotativa de indução. Por meio de rotinas de monitoramento *on-line*, é possível analisar falhas incipientes de barras de rotor rompidas no início e, dessa forma, o desgaste completo da máquina rotativa de indução pode ser evitado. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia de análise de harmônicas do sinal de corrente do estator, em regime transiente na partida do motor, utilizando-se a Transformada Wavelet Discreta (DWT) para análise das condições de funcionamento do motor trifásico de indução. A Transformada Wavelet Discreta possibilita representar o sinal de corrente do estator em diferentes resoluções de tempo e frequência, criando um conteúdo espectral que se modifica com o tempo. O método é validado por meio de testes de laboratório. Os resultados demonstram que a Transformada Wavelet Discreta pode constituir uma ferramenta útil para o monitoramento de falhas incipientes de barras de rotor rompidas em máquinas elétricas de indução, em regime não estacionário.

Palavras Chaves: Máquinas elétricas; motor trifásico de indução; transformada de Wavelet; diagnóstico de falhas.

ANALYSIS USING WAVELET TRANSFORM FOR DETECTING FAULTS IN BROKEN ROTOR BARS IN INDUCTION ELECTRIC MACHINES

ABSTRACT

Nowadays, induction rotary electric machines are present in a large part of our daily lives, and can be seen in electric cars, trains, elevators, air conditioners, heaters, power generators, etc.

The three-phase induction motor, also known by the acronym MIT, is the main component of a rotating induction electric machine. Through online monitoring routines, it is possible to analyze incipient failures of rotor bars broken at the beginning and, in this way, the complete wear of the rotating induction machine can be avoided. This work presents the development of a methodology for analyzing harmonics of the stator current signal, in transient regime at motor start-up, using the Discrete Wavelet Transform (DWT) to analyze the operating conditions of the three-phase induction motor. The Discrete Wavelet Transform makes it possible to represent the stator current signal in different time and frequency resolutions, creating a spectral content that changes over time. The method is validated through laboratory tests. The results demonstrate that the Discrete Wavelet Transform can be a useful tool for monitoring incipient faults of broken rotor bars in induction electric machines, in non-steady state.

Keywords: Electric machines; three-phase induction motor; Wavelet transform; fault diagnosis.

INTRODUÇÃO

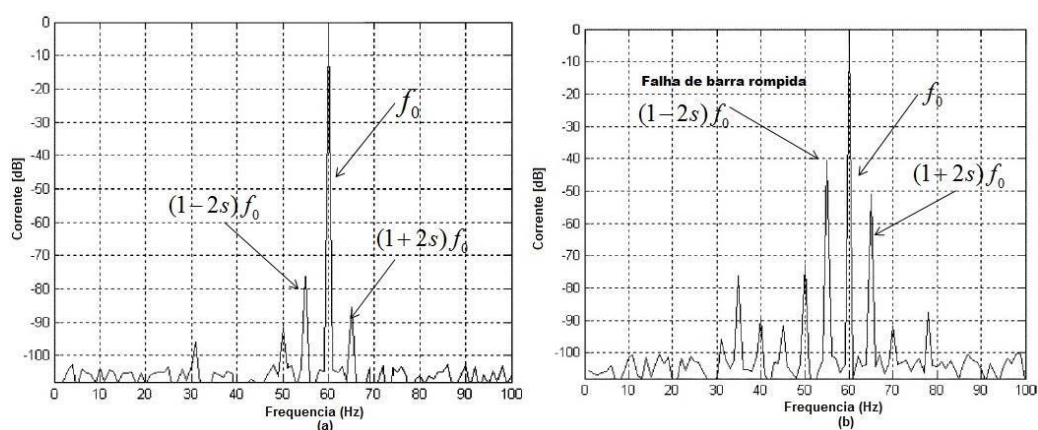
Os motores de indução tipo gaiola de esquilo são robustos, confiáveis, baratos e, portanto, amplamente utilizados em máquinas elétricas de indução industriais e de manufatura. No entanto, as suas falhas elétricas e mecânicas representam um desafio especial para a produção industrial, que muitas vezes interrompem a produtividade e requerem manutenção. Tradicionalmente, o método MCSA (*Motor Current Signal Analysis*) tem sido utilizado para diagnóstico de falhas de barras rompidas em motores de indução (M. Riera-Guasp et al., 2008). Entretanto, apresenta capacidade computacional limitada e dependência de outras variáveis como, por exemplo, o escorregamento do motor e a carga que ele está submetido (Da Costa et al., 2015). A Transformada Wavelet Discreta (DWT), atualmente é a solução mais recente, para superar os problemas de processamento de sinais apresentados pela Transformada Rápida de Fourier (FFT) (Talhaoui et al., 2022; Tran et al., 2022).

A base do método MCSA pode ser encontrada em Da Costa et al. 2015. A assimetria do rotor introduz frequências harmônicas com características no espectro da corrente do estator. As mais importantes são conhecidas como harmônicas das bandas laterais esquerda e direita (f_{brb}), cuja frequência é dada pelo Equação 1. Onde s é o escorregamento do motor e f_0 é a frequência de alimentação do motor.

$$f_{brb} = (1 \pm 2s) f_0 \tag{1}$$

O diagnóstico de falhas de barras rompidas do rotor pode ser feito pela determinação das bandas laterais, de duas vezes a frequência de escorregamento ($2sf_0$), em torno da frequência fundamental de alimentação do motor (f_0), a partir do espectro de corrente do estator. À medida que aumenta o número de barras rompidas, a diferença em dB das amplitudes das bandas laterais em torno da frequência (f_0) diminui. Quanto menor for a diferença, maior será o número de barras rompidas ou trincadas do rotor. Isto ocorre devido a alteração da uniformidade do fluxo magnético (Rouaibia et al., 2024). A Figura 1 ilustra o espectro de frequência de um motor sem defeito, com carga (Figura 1a) e um motor com duas barras rompidas, com carga (Figura 1b) obtidos pelo método MCSA (Da Costa et al., 2015).

Figura 1 – Espectro de frequência de um motor sem defeito, com carga (a). Motor com duas barras rompidas, com carga (b) obtidos pelo método MCSA.



Fonte: Da Costa et al., 2015.

As principais desvantagens deste método são a dependência da carga do motor, pois a abordagem não é válida para máquinas descarregadas ou com cargas leves, bem como a possibilidade de um diagnóstico errôneo quando harmônicas com frequências semelhantes às das harmônicas das bandas laterais estão presentes, devido a outras causas, como flutuações de tensão ou carga (Halder et al., 2022). Para evitar essas desvantagens, alguns novos métodos baseados na detecção das componentes harmônicas da banda lateral, durante o transiente de partida da máquina elétrica foram propostos. Deve-se observar que, ao usar abordagens baseadas na análise do transiente de partida do motor, a condição de carga do motor de indução não é importante (Halder et al., 2022). A frequência da banda lateral varia dentro de uma ampla faixa durante o processo de partida do motor, e sua amplitude atinge valores que são várias vezes maiores do que aqueles em

um regime estacionário, e isso é verdade para qualquer condição de carga. Esse fato torna a detecção desses componentes mais fácil. Por outro lado, esses métodos precisam de um fator de inércia mínimo do sistema ou um tempo de inicialização mínimo (Elder et al., 1989). Isso é necessário para evitar a influência da corrente transiente eletromagnética, que mascara completamente a componente harmônica da banda lateral durante os estágios iniciais da partida do motor.

Outra limitação do método MCSA deve-se ao fato de que ele é inadequado para diagnosticar máquinas elétricas alimentadas por inversores de frequência; nesse caso, em comparação com a partida direta, o escorregamento permanece baixo durante o processo de aceleração da máquina e, portanto, a frequência da banda lateral permanece muito próxima da frequência fundamental, enquanto sua amplitude permanece baixa. Portanto, abordagens baseadas em análise transitória são particularmente adequadas em aplicações de máquinas elétricas com cargas pesadas de partida direta, com alto fator de inércia e longo tempo de inicialização. Na verdade, esses são os casos em que uma quebra de barra de rotor é mais provável de ocorrer. De qualquer forma, as limitações e o escopo de aplicação das abordagens transitória e de estado não estacionário são claramente diferentes e, de certa forma, complementares (M. Riera-Guasp et al., 2008).

Uma nova técnica para diagnosticar barras de rotor quebradas na máquina elétrica de indução de baixa carga foi descrita por Abu Ibaid et al., 2023. A técnica é usada para abordar o problema de usar as técnicas tradicionais, analisando a corrente do estator. O método sugerido é baseado no uso da transformada wavelet discreta e da transformada wavelet contínua. Defdaf et al., 2021, introduziram uma técnica baseada na transformada wavelet discreta (DWT) para detectar as frequências harmônicas, que permitiu a análise transitória, incluindo o efeito de barras quebradas. Talhaoui et al., 2022, propuseram uma técnica baseada principalmente na transformada wavelet discreta (DWT) e no escorregamento associado a uma rede neural (NN) para classificação e detecção de falhas de barras de rotor rompidas em uma máquina de indução. A energia calculada em cada nível de decomposição obtido pela análise DWT e o escorregamento do motor são usados como entrada para o classificador a fim de diagnosticar as classes saudáveis e com falhas. Sakhara et al., 2023, apresentaram um banco de dados usado para a ANN baseado em indicadores, que são obtidos da análise wavelet da corrente do estator de uma das fases da máquina elétrica. O modelo neural desenvolvido permitiu levar em consideração desequilíbrios que são gerados por curtos-circuitos no estator da máquina. Kechida et al., 2013, abordaram dois sinais para diagnóstico de falhas de barra de rotor quebrada. Um é

baseado na análise de espectro, com a transformada rápida de Fourier, que utiliza os componentes espectrais de estado estacionário das correntes do estator. A precisão desta técnica depende das condições de carga e da velocidade constante da máquina. A segunda abordagem é baseada na transformada wavelet discreta, que foi considerada uma ferramenta ideal para esta finalidade devido à sua adequação para a análise de sinais, no estado não estacionário, cujo espectro de frequência é variável no tempo.

A transformada wavelet discreta (DWT) é um método de análise para sinais não estacionários ou que variam no tempo e usa uma descrição da decomposição espectral por meio do conceito de escala. Uma de suas características é a análise de sinais multirresolução com uma função de localização de tempo e frequência. Este método é eficaz para processamento de sinais não estacionários (M. Riera-Guasp et al., 2008; Da Costa et al., 2015).

O objetivo deste artigo é propor um método para o diagnóstico de falhas de barra de rotor rompido com base na transformada wavelet discreta (DWT), em regime transiente, na partida do motor. Vários experimentos práticos são realizados para um rotor saudável, duas barras e três barras de rotor rompidas artificialmente. Além disso, o uso de sinais wavelet resultantes da transformada wavelet discreta (DWT), possibilita a extração das componentes harmônicas causadas pela falha de barras rompidas do rotor.

TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

A transformada contínua wavelet requer equações analíticas que do ponto de vista prático não são adequadas ao processamento digital de sinais através de sistemas computacionais, portanto para que o processamento das wavelets sejam obtidos na forma digital é necessário utilizar a versão discreta da transformada de wavelet (Korkmaz et al., 2018; Ebrahimi et al., 2016). O uso da transformada discreta de wavelet (DWT) proporciona informações suficiente tanto para a análise como para a síntese do sinal original, com uma redução significativa no tempo de processamento (Priyadarshini et al., 2024).

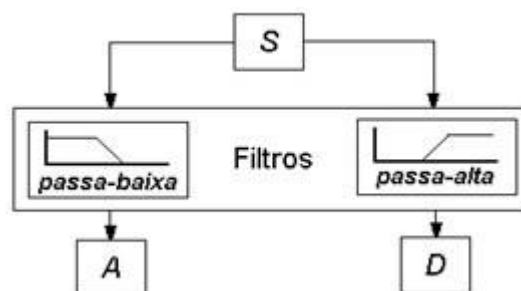
A transformada wavelet discreta (DWT) é uma técnica, que fornece a representação de tempo e frequência de um sinal não estacionário, com melhor resolução de tempo do que a transformada de Fourier. É uma extensão da transformada de Fourier de tempo curto (STFT), que têm um comprimento de janela constante. A DWT permite que os componentes de alta frequência sejam analisados com intervalos de tempo curtos

e componentes de baixa frequência sejam analisados com intervalos de tempo longos (Priyadarshini et al., 2024).

ANÁLISE MULTI RESOLUÇÃO (MRA)

A análise multi resolução ou aproximação multiescala, baseia-se no uso de uma sequência de aproximações de uma determinada função ou sinal $f(t)$, em diferentes níveis de resolução. A teoria da decomposição de sinal multirresolução foi proposta por Stephan Mallat, 1989. Segundo Mallat, a análise de multi resolução (MRA) de uma wavelet, mostra que um sinal pode ser decomposto e reconstruído por meio de duas componentes denominadas aproximação e detalhe, através de um banco de filtros. Este algoritmo utiliza um processo especial de filtragem para decompor o sinal original (S). Este processo de filtragem decompõe o sinal original em aproximações (A) e detalhes (D), respectivamente, como mostra a Figura 2 (Da Costa, 2018).

Figura 2 – Decomposição do sinal em aproximação (A) e detalhe (D).

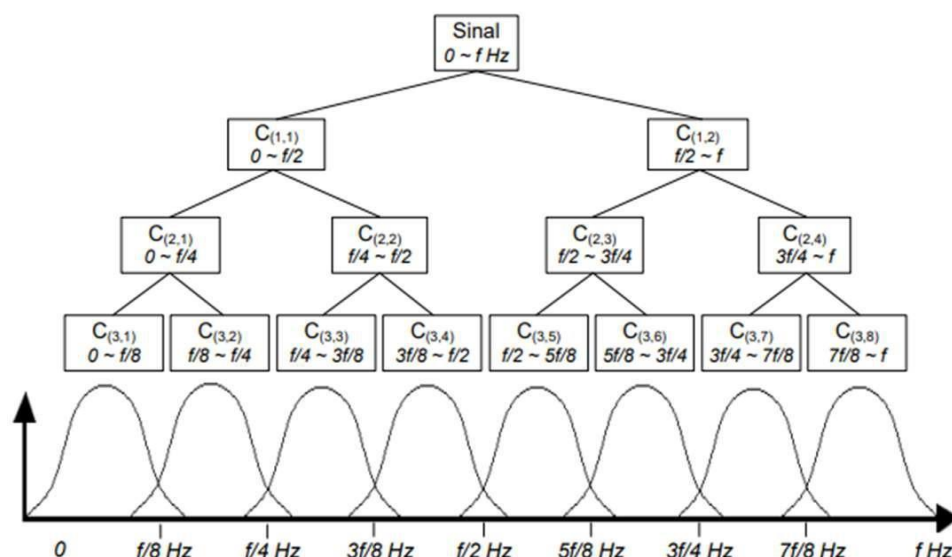


Fonte: Autor.

A aproximação (A) pode ser interpretada como um filtro passa baixas, e o detalhe (D), como um filtro passa altas. Isto significa que a aproximação contém informações de baixa frequência do sinal (S) original e o detalhe contém informações de alta frequência desse sinal. O processo de decomposição ocorre de forma hierárquica, inicialmente dividindo o sinal em níveis de aproximação e detalhe. O refinamento iterativo continua, aprofundando-se progressivamente nas nuances do sinal, até que um nível de informação suficiente seja capturado (Priyadarshini et al., 2024). A teoria de multirresolução permite decompor um sinal da seguinte forma: primeiro, um sinal original discreto é decomposto no primeiro nível em duas componentes por um filtro passa baixas e um filtro passa altas, respectivamente em coeficiente de aproximação do sinal e coeficiente de detalhe do sinal.

Para o segundo nível, a aproximação é agora decomposta em uma nova aproximação e um detalhe. Este procedimento pode ser repetido para o terceiro nível. A Figura 3 ilustra a árvore de decomposição de um sinal (S) em três níveis (aproximação cA1, cA2 e cA3 e detalhes cD1, cD2 e cD3) (Da Costa , 2018).

Figura 3 – Árvore de decomposição MRA de um sinal em três níveis.



Fonte: Da Costa , 2018.

METODOLOGIA

Na Figura 4 tem-se a bancada experimental, que foi montada no Laboratório de Análise Dinâmica de Máquinas Elétricas (ADMEE) do Instituto Federal de São Paulo, IFSP, Campus São Paulo.

A bancada é constituída por um motor de indução trifásico ABB, 3kW, 11,2 A, 220 Vac, velocidade de 1150 rpm; um softstart marca Weg modelo SSW-04, um transdutor de corrente, tipo garra, com transformador de efeito Hall, um condicionador de sinais, modelo DAQ NI USB-6009, da empresa National Instruments e como carga um exaustor de 2 kW.

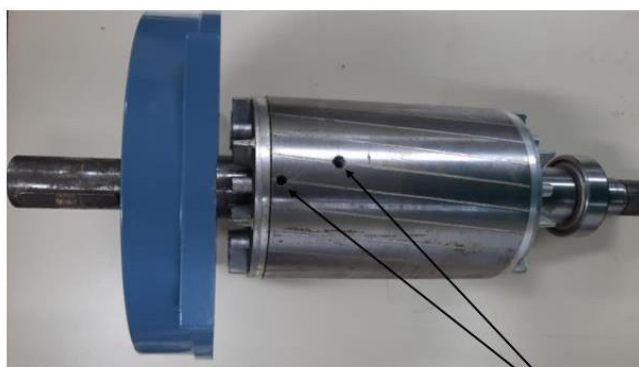
Figura 4 – Bancada de testes experimentais.



Fonte: Autor.

Para demonstrar a aplicação da detecção de falhas pelo método DWT pela análise de multi resolução (MRA), realizou-se uma análise de diferentes sinais coletados de barras rompidas do rotor. As barras rompidas foram criadas artificialmente em laboratório, abrindo o motor e perfurando furos em diferentes barras do rotor tipo gaiola de esquilo, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Rotor com barras rompidas artificialmente.



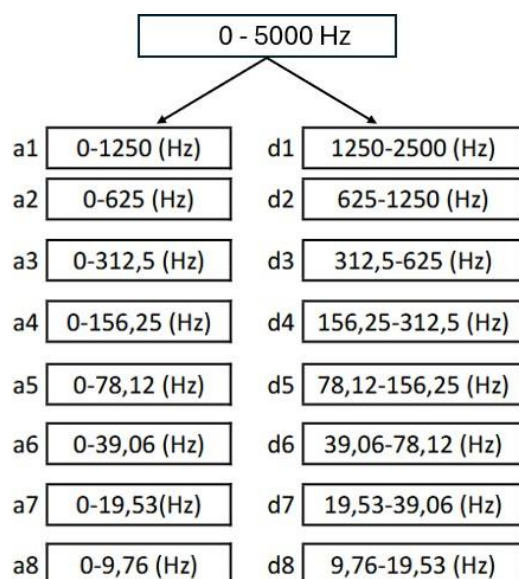
Barras rompidas artificialmente

Fonte:Autor.

A leitura dos dados da corrente do estator é realizada pelo sensor de corrente, que transmite até o sistema de aquisição de dados. Estes dados são digitalizados e processados pelo algoritmo baseado em transformada discreta de wavelet (DWT – Discrete Wavelet Transform) do Toolbox de wavelet do software MATLAB® instalado no PC, possibilitando a aquisição e análise *on-line* do estado do rotor. Segundo (Da Costa et al., 2015) durante a partida do motor, cuja velocidade varia de zero até próximo da velocidade síncrona, as harmônicas correspondentes as falhas de barras rompidas do rotor variam de acordo com a fórmula $f(1-2s)$. Onde f é a frequência da rede e s é o escorregamento do motor. Assim sendo, foram avaliadas as frequências harmônicas da corrente do estator no transitório das bandas de frequência entre 0 Hz e pouco acima da frequência da rede.

As correntes do motor de indução foram medidas nos transitórios de partida do motor para diferentes casos (motor sadio, duas barras rompidas e três barras rompidas). A frequência de amostragem utilizada foi de 5000 amostras por segundo. A transformada discreta de wavelet (DWT) da corrente foi realizada usando a wavelet mãe, Daubechies 44 (dB44). A Figura 6 apresenta as bandas de frequência correspondentes as componentes harmônicas reconstruídas do sinal de corrente do estator que são avaliadas, decomposta por DWT em oito níveis, resultantes da análise de acordo com a taxa de amostragem utilizada para os testes. Observa-se que os níveis da decomposição em 8 níveis contém as frequências harmônicas $f(1-2s)$, pela escolha de 5000 amostras por segundo.

Figura 6 - Bandas de frequências das componentes harmônicas reconstruídas do sinal para avaliação.

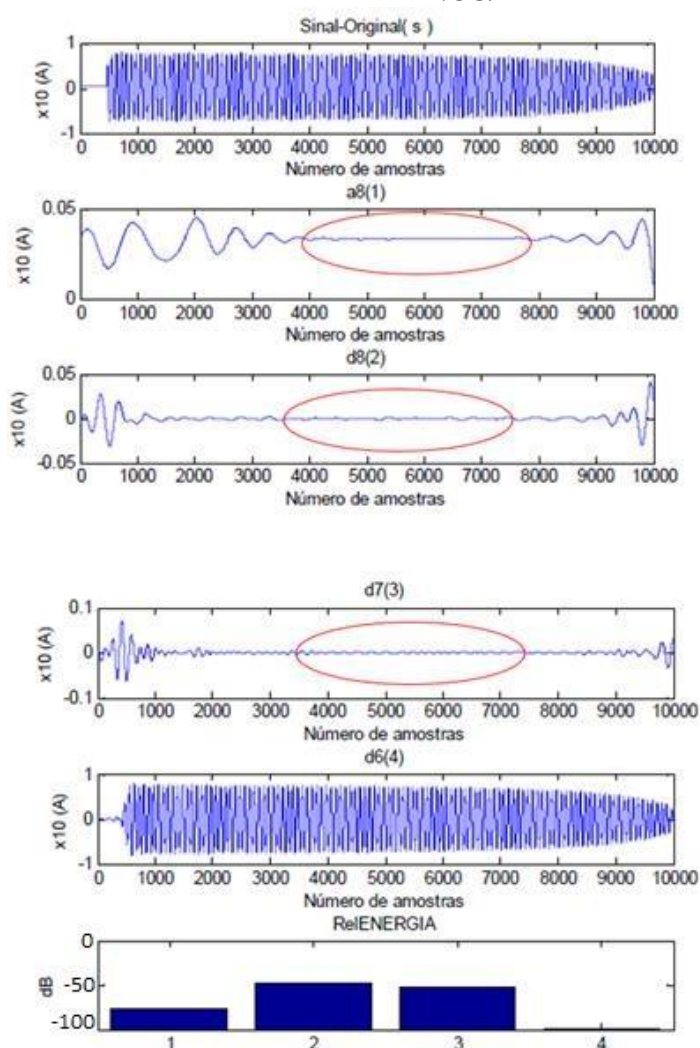


Fonte: Autor.

ANÁLISES E RESULTADOS

A DWT da corrente do estator foi obtida usando a toolbox wavelet do MATLAB. O wavelet mãe Daubechies-44 foi usado para análise do sinal de corrente. A Fig. 7 apresenta a corrente do estator associada a DWT de 8 níveis da corrente de partida de um motor saudável. Pode-se observar que o sinal de nível superior a8 (aproximação), d8 e d7 (detalhes) não mostram nenhuma variação significativa, além das oscilações iniciais que duram apenas alguns ciclos. A partir disso, pode-se concluir que os harmônicos associados as barras rompidas não estão presentes nesta situação.

Figura 7 - DWT do sinal da corrente de partida (s), para o motor saudável, com 8 níveis.

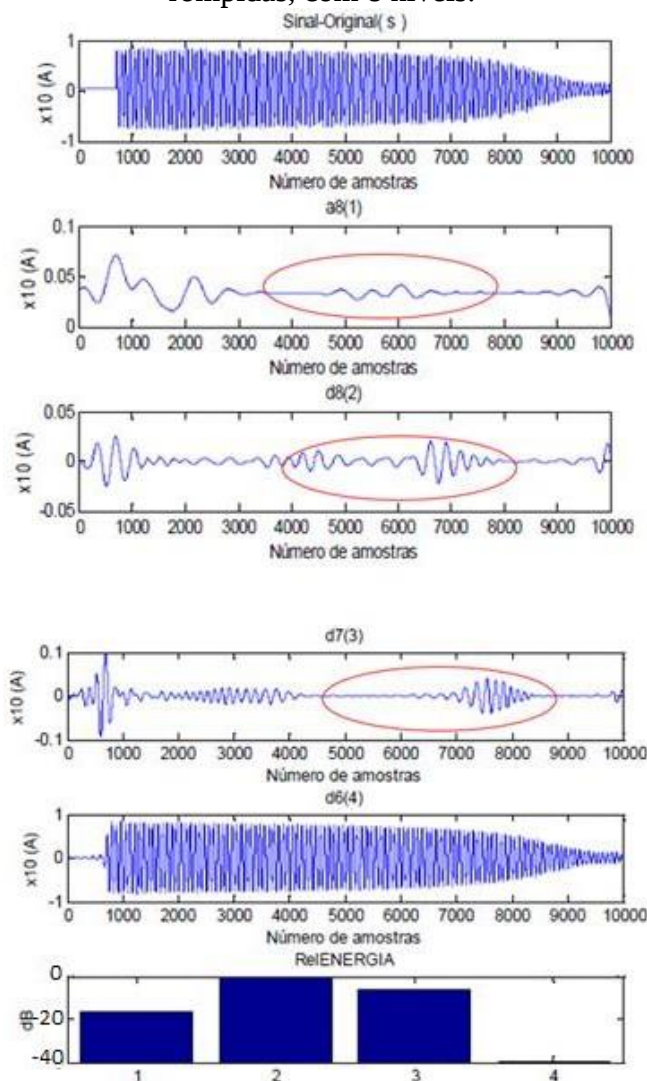


Fonte: Autor.

A Fig. 8 apresenta o gráfico da DWT da corrente do motor, com duas barras de rotor rompidas. Conforme apresentado no gráfico, ocorre um aumento significativo de harmônicos, em relação ao gráfico do motor saudável, nos níveis d8 e d7 (detalhes). Os

harmônicos nesses níveis são devido à evolução dos componente harmônicos de falhas $f(1-2s)$, durante o transiente. Essas oscilações seguem um padrão, que estão de acordo com a evolução das frequências harmônicas $f(1-2s)$, obtidas pelo método MCSA (Figura 1) baseado em FFT. Pode-se observar também na Figura um aumento de energia ocasionado pelos harmônicos de falhas. A partir disso, pode-se concluir que ambos os métodos informam sobre a presença de barras de rotor rompidas em máquinas elétricas.

Figura 8 - DWT do sinal da corrente de partida (s), para o motor com 2 barras rompidas, com 8 níveis.

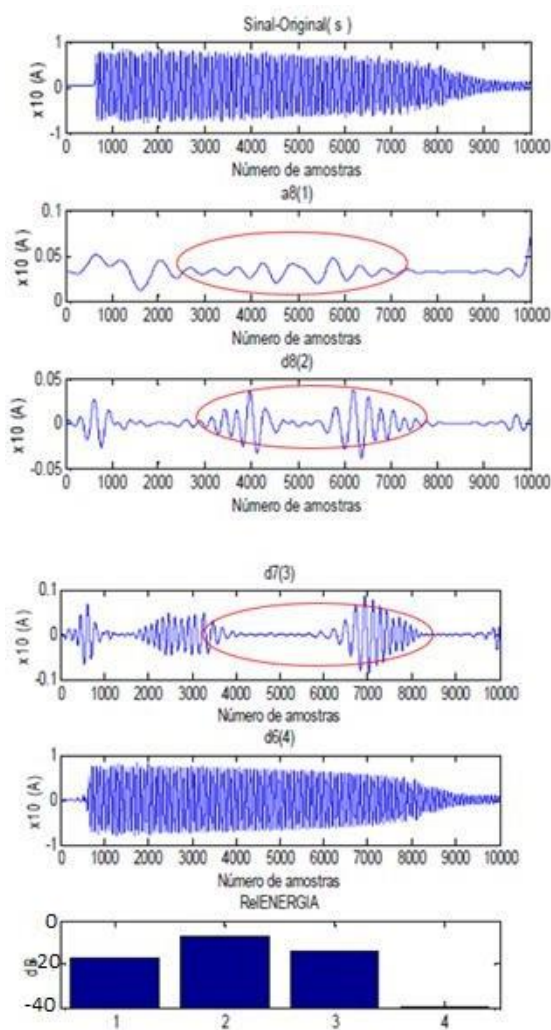


Fonte: Autor.

A Fig. 9 exibe o gráfico da DWT da corrente de um motor com três barras de rotores rompidas. Neste caso, a aplicação do método clássico, baseado na análise FFT, não seria válida, pois o escorregamento (s) do motor é muito baixo e os harmônicos da banda lateral se sobrepõem a componente da frequência fundamental f (frequência da rede de alimentação). Isso torna muito difícil a detecção da falha. No entanto, os detalhes dos

sinais wavelet de níveis d8 e d7 resultantes da análise DWT da corrente de partida, mostram um aumento em sua energia, se comparados com o motor saudável (Figura 6). Além disso, suas oscilações encaixam-se bem com a evolução $f(1-2s)$ (banda lateral inferior). Assim, neste caso, as informações fornecidas pelo método DWT podem complementar aquelas fornecidas pela abordagem clássica para atingir uma detecção mais precisa. Este caso é um exemplo da validade da abordagem em um caso em que o método FFT clássico não é adequado para ser aplicado.

Figura 9 - DWT do sinal da corrente de partida (s), para o motor com 3 barras rompidas, com 8 níveis.



Fonte: Autor.

CONCLUSÃO

A transformada DWT, na maioria das vezes, mostra melhor o sinal de falha de barras rompidas, usando a análise de multi resolução (MRA). A transformada é sensível

à variação causada na amplitude da frequência de falha em função do número de barras rompidas, no estado transitório, podendo ser observados, desde o nível mais baixo defeito incipiente, até o nível mais elevado, que pode ser considerado altamente prejudicial ao bom funcionamento do motor de indução. O método usando a transformada wavelet pode ser aplicado em um caso em que o método clássico MCSA não é adequado, ou seja, diagnóstico de barras rompidas em motores de indução sem carga.

Os testes experimentais utilizando o método DWT, mostraram que mesmo o motor em vazio apresenta qualitativamente as variações significativas nos componentes d8 e d7, indicação de falha de barras rompidas. Em termos quantitativos, a relação de energia do sinal com componente d7, mostra que quando não há defeito está acima de - 40 dB, e na condição de defeito está abaixo de - 35 DB.

Nas Figuras 8 e 9, a transformada *wavelet* do motor com defeito de 02 barras rompidas e 03 barras rompidas, podem ser observados (círculo vermelho) nos sinais d7 (detalhe), banda de frequência 19,53 a 39,06 Hz e d8 (detalhe), banda de frequência 9,77 a 19,53 Hz. Observe que a medida que as barras vão sendo rompidas, aumentam as amplitudes das harmônicas correspondentes no regime transitório do motor. Os gráficos apresentam variações significativas relativas às frequências de falhas das bandas laterais em função da variação do escorregamento s do rotor, além das oscilações iniciais que duram apenas alguns ciclos, e a relação de energia do sinal nos níveis d8 e d7 são respectivamente -33,1 dB e -34,2 dB (<-35dB), indicando defeito de barras rompidas.

REFERÊNCIA

ABU IBAD, O.Z.I., BELHAMDI, S., ABID, M., CHAKROUNE, S., MOUASSA, S., AL-SAGAR, Z.S. **Wavelet packet analysis for rotor bar breakage in an inverter induction motor**. *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 3, pp. 3-11, 2023.

DA COSTA, C. **Processamento de sinais para engenheiros**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Bonecker, 422 p., ISBN: 8593479316, 2018.

DA COSTA, C.; KASHIWAGI, M.; MATHIAS, M. H. **Rotor failure detection of induction motors by wavelet transform and Fourier transform in non-stationary condition**. *Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 1, pp. 15-26, July 2015.

DEFDAF, M., BERRABAH, F., CHEBABHI, A., CHERIF, B.D.E. **A new transform discrete wavelet technique based on artificial neural network for induction motor broken rotor bar faults diagnosis.** *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 4, art. no. e12807, 2021.

EBRAHIMI, B. M.; FAIZ, J.; LOTFI-FARD, S.; PILLAY, P. **Novel indices for broken rotor bars fault diagnosis in induction motors using wavelet transform.** *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 30, pp. 131 – 145. 2012.

ELDER, S.; WATSON, J. F.; and THOMSON, W. T. **Fault detection in induction motors as a result of transient analysis.** *In Proc. 4th IEEE Int. Conf. Electr. Mach. Drives*, London, U.K., pp. 182–186, Sep. 1989.

HALDER, S., BHAT, S., ZYCHMA, D., SOWA, P. **Broken Rotor Bar Fault Diagnosis Techniques Based on Motor Current Signature Analysis for Induction Motor – A Review.** *Energies*, vol. 15, no. 22, 2022.

KECHIDA, R., MENACER, A., TALHAOU, H. **Approach Signal for Rotor Fault Detection in Induction Motors.** *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 13, no. 3, pp. 346- 352, 2013.

KORKMAZ, S. A.; ESMERAY, F. **Quality lignite coal detection with discrete wavelet transform, discrete Fourier transform, and ANN based on k-means clustering method.** *In 2018 6th International Symposium on Digital Forensic and Security (ISDFS)*, Antalya, Turkey, pp.1–6, 2018.

MALLAT, S. G. **A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation.** *In IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, no. 7, pp. 674-693, July 1989.

RIERA-GUASP, M., ANTONINO- DAVIU, J. A.; ROGER-FOLCH, J., and MOLINA PALOMARES, M. P. **The Use of the Wavelet Approximation Signal as a Tool for the Diagnosis of Rotor Bar Failures.** *In IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 3, pp. 716-726, doi: 10.1109/TIA.2008.921432, May-june 2008.

PRIYADARSHINI, M. S., BAJAJ, M., PROKOP, L. et al. **Perception of power quality disturbances using Fourier, Short-Time Fourier, Continuous and discrete wavelet transforms.** *Sci Rep* 14, 3443 (2024), 2024.

ROUAIBIA, R., DJEGHADER, Y., and MOUSSAOUI, L. **Artificial neural network and discrete wavelet transform for inter-turn short circuit and broken rotor bars faults diagnosis under various operating conditions.** *Electrical Engineering & Electromechanics*, (3), 31–37, 2024.

SAKHARA, S., BRAHIMI, M., NAICIB, L., LAYADI, T.M. **Application of a wavelet neural network approach to detect stator winding short circuits in asynchronous machines.** *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 3, pp. 21-27, 2023.

TALHAOUI, H., AMEID, T., KESSAL, A. **Energy eigenvalues and neural network analysis for broken bars fault diagnosis in induction machine under variable load: experimental study.** *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 13, no. 5, pp. 2651-2665, 2022.

TALHAOUI, H.; AMEID, T.; AISSA, O. et al. **Wavelet packet and fuzzy logic theory for automatic fault detection in induction motor.** *Soft Comput* 26, pp. 11935–11949, 2022.

TRAN, M. Q., LIU, M. K., TRAN, Q. V., NGUYEN, T. K. **Effective Fault Diagnosis Based on Wavelet and Convolutional Attention Neural Network for Induction Motors.** *In IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, pp. 1-13, 2022.