

ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS UTILIZANDO A TRANSFORMADA DE WAVELET. APLICAÇÕES NO DIAGNÓSTICO DE FALHAS DE MOTORES DE INDUÇÃO

SÉRGIO CORDEIRO

RESUMO. Este trabalho aborda a análise de séries temporais por meio da Transformada de Wavelet para o diagnóstico e para o prognóstico de falhas em motores de indução, que são as máquinas rotativas predominantes na área industrial.

Palavras-chave: CBM, Manutenção Baseada em Condição, Manutenção Preditiva, Transformada de Wavelet, Análise de Séries Temporais, Máquinas Rotativas, Motores de Indução, Diagnóstico Automatizado.

1. INTRODUÇÃO

Os últimos anos testemunharam uma mudança profunda na estratégia de manutenção adotada pela indústria, em favor da chamada Manutenção Preditiva, ou Manutenção Baseada em Condição (CBM: *Condition Based Maintenance*). Essa abordagem se baseia no monitoramento em tempo real do maquinário, de forma a obter-se diagnóstico preciso de tendência a falhas. Tal diagnóstico subsidia a programação e a otimização da manutenção, com o objetivo de evitar falhas imprevistas e manter os custos da manutenção em limites aceitáveis. Além do diagnóstico, que aponta falhas iminentes, é desejável que as técnicas executem também um prognóstico, que aponta as ações corretivas e os resultados esperados. Uma ampla descrição das técnicas de diagnóstico e prognóstico podem ser encontradas em [JARDINE 2006] e [AYAZ 2014]. Mais considerações sobre CBM e sua relação com outras técnicas de manutenção pode ser encontrado em [PRAKASH 2014].

A análise de sinais é uma das ferramentas mais importantes nesse contexto. Seu objetivo é extrair, sintetizar e interpretar a informação contida em sinais provenientes de sensores instalados nas máquinas. A Transformada Rápida de Fourier (FFT) é uma das técnicas mais bem estabelecidas e mais usadas. Ela oferece baixo custo computacional e permite fácil análise de sinais estacionários.

Entre os equipamentos industriais, as máquinas rotativas ocupam posição de destaque, pela sua importância e ubiquidade. E nestas, os motores de indução são de longe o tipo de motor mais empregado, pela sua simplicidade, robustez e baixo custo.

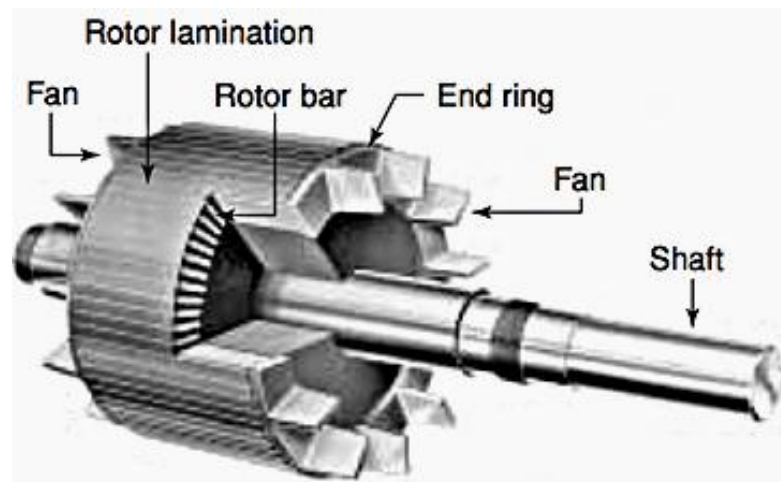
[PEZZANI 2015] lista as principais causas de defeitos em motores de indução, em função de pesquisa do *Electric Power Research Institute* (EPRI):

- Mancais: 40%
- Enrolamento: 38%
- Rotor: 10%
- Outros: 12%

O motor de indução, pela sua robustez, consegue continuar funcionando por muito tempo depois do surgimento dos defeitos mais comuns. Isso configura grande uma oportunidade para o monitoramento de condição. Entre as técnicas de diagnóstico, as wavelets se destacam pela sua capacidade de manter alta resolução em ampla faixa de frequências de análise. Com isso, prestam-se melhor que a FFT à análise de sinais não-estacionários. Componentes não-estacionários nos sinais são comuns, devido a mudanças nas condições operacionais ou como consequência dos próprios defeitos sob análise. Em vista disso, tais componentes contêm uma grande quantidade de informação, que se deve tratar com as ferramentas apropriadas.

2. DEFEITOS

As figuras abaixo mostram os elementos construtivos de um rotor de gaiola típico: barras de rotor (*rotor bar*), eixo (*shaft*), anéis de fechamento (*end ring*), aletas de ventilação (*fan*), etc.



Fonte: [EEP 2016]

A respeito da quebra de barras na gaiola, que é um dos defeitos mais comuns que incidem sobre o rotor, citamos [PEZZANI 2015]:

A detecção precoce de uma barra rompida no rotor minimiza os danos ao motor e reduz os custos de reparo. Em alguns casos, a condição de uma barra rompida começa com uma trinca na junção entre a barra do rotor e o anel da extremidade como resultado de estresse térmico e mecânico [3]¹. Esses estresses são mais significativos durante a partida de motores com cargas de alta inércia. A flexão de uma barra trincada devido a variações na temperatura provoca o rompimento da barra. Quando uma barra rompe, as barras adjacentes conduzem correntes superiores aos respectivos valores de projeto, causando mais danos se a condição de barra rompida não for imediatamente detectada. As correntes entre as barras que aparecem em função da barra rompida afetam a evolução da falta no rotor, causando danos nas laminações do núcleo do rotor [3]¹. A análise da assinatura da corrente do motor (“Motor Current Signature Analysis” – MCSA) é o método mais popular para detecção de faltas na gaiola do rotor [4]² [5]³. Este método efetua a análise do espectro de frequência das correntes do estator para determinar as condições eletromecânicas do motor e equipamentos acionados. Quando ocorre a ruptura de uma ou mais barras, bandas laterais superior e inferior aparecem em $(1 \pm 2s)f_o$, onde s é a frequência de escorregamento do motor e f_o é a frequência do sistema [6]⁴. As magnitudes dessas bandas laterais aumentam com o número de barras rompidas. Com base nisso, a Schweitzer disponibiliza um relé capaz de acusar rompimento de barras no rotor, que analisa a corrente do estator por meio da Transformada de Fourier. De acordo com [PEZZANI 2015], o algoritmo não funciona bem para cargas leves, porque o escorregamento é muito pequeno nesse caso.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

[JARDINE 2006] é uma obra bastante abrangente e muito citada, mas não trata especificamente da Transformada de Wavelet nem de máquinas rotativas. Tal foco está

¹ [BONNETT 1988].

² [PENROSE 2008].

³ [KLIMAN 1988].

⁴ [DELEROI 1984].

presente tanto em [PENG 2004] quanto em [YAN 2014], que por esse motivo foram mais consultados na pesquisa; pode-se, até certo ponto, entender este último artigo como uma atualização do anterior. [YAN 2014] relata alguns desenvolvimentos recentes na teoria de wavelets e novas aplicações da técnica em CBM surgidas no período (2004-2014). [PENG 2004] havia feito o mesmo para o período (1990-2004). Outra resenha consultada foi [PRAKASH 2014].

[AYAZ 2014] é uma resenha um pouco diferente, voltada para a exploração dos fundamentos matemáticos das técnicas de diagnóstico. A análise de wavelets é uma das investigadas.

A maioria das aplicações consolidadas, não apenas da Transformada de Wavelets, mas de todas as técnicas de análise de sinais, se refere ao diagnóstico de defeitos mecânicos. [PENG 2004] cita apenas uma aplicação referente a diagnóstico de defeitos elétricos em motores de indução; esse número cresce para 4 em [PRAKASH 2014] e 5 em [YAN 2014]. [SZABO 2004] detalha uma dessas aplicações: o emprego da DWT na análise da assinatura de corrente de motores (MCSA: *Motor Current Signature Analysis*) de indução de rotor bobinado trifásico de 3 kW. Mediram-se as correntes sob diversos regimes de carga e em condições normais e na presença da falta de uma fase no rotor. Foram escolhidos a wavelet de Daubechies e o toolbox de wavelets do MATLAB para analisar os sinais. O defeito de manifestou na faixa de frequências de 32 a 64 Hz. A manifestação é menos clara quando o motor está menos carregado. No entanto, os autores não compararam seus resultados com os da ferramenta mais tradicional, a FFT; além disso, a falha estudada foi do tipo imprevisível, que não se presta a prevenção via CBM. Por outro lado, o estudo possui a virtude de ter usado equipamentos reais, em lugar de meramente simulados.

[KAHN 2010] oferece um panorama de todas as técnicas em voga para diagnóstico de falhas em motores elétricos, e em seguida passa a focar as baseadas em wavelets, inclusive algumas que conjugam a elas ferramentas de inteligência artificial, como ANNs e SVMs. Depois descreve em detalhes uma aplicação real, que emprega a wavelet de Daubechies para analisar a corrente de estator em alguns motores elétricos; entre eles, um de gaiola de 1 hp e outro de rotor

bobinado de 1.5 hp. O trabalho mostrou que o vetor de características permite não apenas detectar defeitos, mas classificá-los entre falta de fase e curto para terra. Tanto a detecção quanto a classificação foram feitas por uma rede neural. Apesar dos méritos desse estudo, trata-se também de defeitos que não interessam ao processo de CBM.

[BOUZIDA 2013] é outro estudo bem-sucedido sobre uso de wavelets e MCSA com motores reais de 4 kW, visando diagnosticar barras ou anéis quebrados no rotor e curto-circuito no estator. Coletaram-se amostras de correntes e tensões, bem como da velocidade de rotação. Verificou-se que focar nas baixas frequências elimina qualquer influência de vibração sobre o diagnóstico.

[SHI 2013 1] compara o desempenho das wavelets de Daubechies 8, 9 e 10, e de Symlet 7 e 8 no contexto do diagnóstico de barras de rotor quebradas em motores trifásicos de 5.5 kW, por meio da análise da corrente do estator, em condições de carga variável. Em vez de um TC, foi usado um sensor de efeito Hall na aquisição de dados; a frequência de amostragem foi 1.92 kHz. Os defeitos foram diagnosticados no quinto nível de detalhe após a aplicação de técnicas estatísticas ao vetor de características; todas as wavelets testadas se comportaram satisfatoriamente, com a de Symlet 8 apresentando o melhor desempenho.

[NGOTE 2014] apresenta uma abordagem nova, que consiste em analisar não a corrente de estator, mas o que os autores chamam "corrente residual", que é a diferença entre a corrente e sua média ao longo de vários ciclos. A corrente residual apresenta a vantagem de seu espectro conter apenas componentes relacionadas com aspectos mecânicos do motor. A plataforma empregou motores de 3kW com tacômetros óptico, frequência de amostragem de 25.6 kHz, 10 níveis de decomposição e a wavelet de Daubechies 5. Não foi usado um rotor defeituoso neste caso; o defeito foi simulado por meio da adição de uma resistência de 40 mΩ em série com uma das fases. Os autores não conseguiram distinguir com segurança, usando a corrente de estator, a assinatura de um motor com defeito da de um sem defeito. Com a corrente residual, no entanto, uma detecção confiável foi possível.

A dificuldade em distinguir com segurança a assinatura de um motor defeituoso da de um motor são levou [SHI 2013 2] a associar a análise de wavelets a uma ferramenta

de inteligência computacional, a rede neural probabilística (PNN: *Probability Neural Network*), criando o que chamar de wavelets neural network. Em tal rede neural, as funções de ativação dos neurônios da camada escondida são baseadas em wavelets. O treinamento não foi feito pelo algoritmo usual de *backpropagation*, e sim pelo de cardumes (PSO: *Particle Swarm Optimization*), que é um algoritmo evolucionário. A plataforma foi montada com motores de 3.7 kW com número de barras quebradas variável, e submetidos a cargas variadas. Foi usada a wavelet de Daubechies 10, com frequência de amostragem de 1 kHz. Para composição do vetor de características, foram empregados não os valores da energia em cada banda, mas medidas estatísticas como média, média absoluta, mediana e seus respectivos desvios. Segundo os autores, o sistema de diagnóstico, além de preciso, precisava ser rápido o bastante para produzir respostas em tempo real.

[SESHADRINATH 2014] alega que as redes neurais apresentam um grande inconveniente, que é a dificuldade de sintonizarem-se os seus múltiplos parâmetros, e defende o emprego de uma estrutura otimizada por meio de algoritmos de otimização (mínimos quadrados) e genéticos, seguida de um classificador baseado em filtro Bayesiano. O problema prático estudado foi o diagnóstico de curtos entre espiras no enrolamento do estator, também por meio da análise da assinatura de corrente. As falhas em questão causam assimetria na impedância da máquina e produzem correntes de sequência negativa; mas tal condição é também causada por assimetrias na carga, o que dificulta o diagnóstico. Outra dificuldade, segundo os autores, é que a técnica de wavelets é sensível a deslocamento e insensível, em alguns casos, a oscilações do sinal; por essa razão, foi usada a DTCWT, que não apresenta esses problemas. O vetor de características usado é composto apenas pela energia espectral na 13ª decomposição. A plataforma emprega motores de 5 HP, sob condições de carga variável, a wavelet de Daubechies 10 como mãe e uma frequência de amostragem de 12.5 kHz. A DTCWT apresentou maior sensibilidade e seletividade que a DWT no caso estudado.

GLOSSÁRIO

Electric Power Research Institute: É um instituto de pesquisas relativas à geração e distribuição de energia elétrica, sediado nos Estados Unidos e mantido pelas próprias empresas do segmento..

SIGLAS

EPRI: *Electric Power Research Institute.*

Obras consultadas

- [AYAZ 2014] E. AYAZ, **A Review Study on Mathematical Methods for Fault Detection Problems in Induction Motors** : Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering, 2014, Vol.2, No.3. Disponível em <http://dergipark.ulakbim.gov.tr/bajece/article/download/5000102024/5000095108>, acesso em 26/03/2016.
- [BOUZIDA 2013] Ahcène BOUZIDA, Omar TOUHAMI e Radia ABDELLI, **Rotor Fault Diagnosis in Three Phase Induction Motors Using the Wavelet Transform** : International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT'13) Proceedings Engineering & Technology - Vol.1, pp. 186-191, 2013. Disponível em http://ipco-co.com/PET_Journal/presented/%20papers/095.pdf, acesso em 26/03/2016.
- [KAHN 2010] M. Abdesht Shafiel Kafey KHAN and M. Azizur RAHMAN, **Wavelet Based Diagnosis and Protection of Electric Motors**, in Fault Detection, Wei Zhang (Ed.), ISBN: 978-953-307-037-7, InTech, 2010.<http://www.intechopen.com/books/fault-detection/wavelet-based-diagnosis-and-protection-of-electric-motors>26/03/2016
- [NGOTE 2014] Nabil NGOTE, Said GUEDIRA, Mohamed CHERKAoui e Mohammed OUASSAID, **Diagnosis of Induction Motor Rotor Fault through Discrete Wavelet Transform Applied to Residual Current** : Jerzy Balicki (Ed.) - Advances in Applied and Pure Mathematics, ISBN: 978-960-474-380-3, pp. 390 a 396. Disponível em <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2014/Gdansk/MATH/MATH-51.pdf>, acesso em 26/03/2016.
- [PENG 2004] PENG Z. K. e CHU F. L., **Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography** : Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 18, Issue 2, March 2004, pp. 199 a 221. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S088832700300075X>, acesso em 26/03/2016.
- [PEZZANI 2015] Carlos PEZZANI et. al., **Detecção de Barras Rompidas do Rotor Através da Proteção com Zero Ajustes.**

- Disponível em http://www.selinc.com.br/art_tecnicos/6512_Deteccao-de-Barras-Rompidas-do-Rotor-Atraves-da-Protecao-com-Zero-Ajustes.pdf, acesso em 26/03/2016.
- [PRAKASH 2014] Aditya PRAKASH, Vikash Ku. AGARWAL, Amit KUMAR, Bhaskra NAND, **A review on machine condition monitoring and fault diagnostics using wavelet transform** : International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences September 2014, Volume 2 Issue 4, ISSN 2349-447684. Disponível em <http://www.ijetmas.com/admin/resources/project/paper/f201409151410798115.pdf>, acesso em 26/03/2016.
- [SESHADRINATH 2014] Jeevanand SESHADRINATH, Bhim SINGH e Bijaya Ketan PANIGRAHI, **Incipient Interturn Fault Diagnosis in Induction Machines Using an Analytic Wavelet-Based Optimized Bayesian Inference** : IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, Vol. 25, No. 5, May 2014. Disponível em <http://210.30.190.120/ckwx/yuan/mhgzzd/201408250110.pdf>, acesso em 26/03/2016.
- [SHI 2013 1] SHI Pu, CHEN Zheng, Yuriy VAGAPOV, **International Journal of Computer Applications, Volume 69, No.14, May 2013, pp. 36 a 43** : Wavelet Transform based Broken Rotor-bar Fault detection and Diagnosis Performance Evaluations. Disponível em <http://research.ijcaonline.org/volume69/number14/pxc3888033.pdf>, acesso em 26/03/2016.
- [SHI 2013 2] SHI Pu, CHEN Zheng, Yuriy VAGAPOV, **International Journal of Computer Applications, Volume 69, No.14, May 2013, pp. 44 a** : WFault Detection and Diagnosis of Induction Machines based on Wavelet and Probabilistic Neural Network. Disponível em <http://research.ijcaonline.org/volume69/number14/pxc3888034.pdf>, acesso em 26/03/2016.
- [SZABO 2004] Loránd SZABÓ, Károly Ágoston BIRÓ, Jenő Barna DOBAI, Dénes FODOR e József VASS, **Wavelet Transform Approach to Rotor Faults Detection in Induction Motors** : INES 2004. Disponível em http://www.ines-conf.org/ines-conf/75_INES2004.pdf, acesso em 26/03/2016.
- [YAN 2014] YAN Ruqiang, Robert X. GAO e CHEN Xuefeng, **Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications** : Signal Processing Vol. 96, Part A, Mar. 2014, pp. 1 a 15. Disponível em http://www.researchgate.net/profile/Ruqiang_Yan/publication/259098512_Wavelets_for_fault_diagnosis_of_rotary_machines_A_review_with_applications/links/5508e5380cf2d7a2812b5ade.pdf, acesso em 26/03/2016.

Figuras

- [EEP 2016] . Disponível em <http://electrical-engineering-portal.com/download-center/books-and-guides/electrical-engineering/squirrel-cage-rotor-testing-methods>, acesso em 26/03/2016.

Obras complementares

- [BONNETT 1988] A. H. BONNETT e G. C. SOUKUP, **Analysis of Rotor Failures in Squirrel-Cage Induction Motors**, in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 24, no. 6, pp. 1124 a 1130, novembro/dezembro 1988.
- [CLAYPOOLE 1999] R. CLAYPOOLE, **Adaptive Wavelet Transform via Lifting**, in Thesis, Computer Engineering, Rice University, 1999..
- [COIFMAN 1992] R. R. COIFMAN, M. V. WICKERHAUSER, **Entropy-based algorithms for best basis selection**, in IEEE Transactions on Information Theory 38, 2, 1992, pp. 713 a 718.
- [DELEROI 1984] W. DELEROI, **Der Stabbruch im Käfigläufer eines Asynchronmotors Teil 1: Beschreibung mittels Überlagerung eines Störfeldes**, in Archiv Für Elektrotechnik, vol. 67, pp. 91–99, 1984.
- [HAMID 2002] E. Y. HAMID e KAWASAKI Z. I., **Wavelet based data compression of power system disturbances using the minimum description length data**, in IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, 2002, pp. 460 a 466.
- [JARDINE 2006] Andrew K.S. JARDINE, Daming LIN ,Dragan BANJEVIC, **A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance**, in Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 20, Issue 7, October 2006, pp. 1483 a 1510.
- [KIM 2007] B. S. KIM, S. H. LEE, M. G. LEE, J. NI, J.Y. SONG e C.W. LEE, **A comparative study on damage detection in speed-up and coast-down process of grinding spindle-typed rotor-bearing system**, in Journal of Materials Processing Technology, 187–188, 2007, pp. 30 a 36.
- [KLIMAN 1988] G. B. KLIMAN, R. A. KOEGL, J. STEIN, R. D. ENDICOTT e M. W. MADDEN, **Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors**, in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 3, no. 4, pp. 873 a 879, dezembro de 1988.
- [MALLAT 1989] S. MALLAT, **A theory of multiresolution signal decomposition: the wavelet representation**, in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 11, 7, 1989, pp. 674 a 693.
- [PENROSE 2008] H. PENROSE, **Electrical Motor Diagnostics**, 2nd ed. Success by Design, maio de 2008.
- [SWELDENS 1998] W. SWELDENS, **The lifting scheme: a construction of second generation wavelets**, in SIAM Journal on Mathematical Analysis, 29, 2, 1998, pp. 511 a 546.