

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.

Index Terms— CBM, Manutenção Baseada em Condição, Manutenção Preditiva, Transformada de Wavelet, Análise de Séries Temporais, Máquinas Rotativas, Motores de Indução, Diagnóstico Automatizado.

I. 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. 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 [?].

Entre os equipamentos industriais, as máquinas rotativas ocupam posição de destaque, pela sua importância e ubiquidade. Entre as técnicas de diagnóstico, as wavelets se destacam pela sua capacidade de manter alta resolução em ampla faixa de frequências de análise.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

[?] é uma obra bastante abrangente e muito citada, mas não trata especificamente da Transformada de Wavelet nem de máquinas rotativas. Tal foco está presente tanto em [?] quanto em [?], que por esse motivo foram mais consultados na pesquisa; pode-se, até certo ponto, entender este último artigo como uma atualização do anterior. [?] relata vários desenvolvimentos recentes na teoria de wavelets.

III. WAVELETS

A Transformada de Wavelets é uma ferramenta matemática que converte um sinal do domínio do tempo para um domínio misto tempo/frequência, ou tempo/escala-de-tempo, como também se diz. Para tanto, o sinal é decomposto em uma série de wavelets, cada uma delas com uma amplitude e uma frequência determinadas, mas com a mesma forma geral; tal forma geral é frequentemente chamada de wavelet-mãe, e

as wavelets geradas a partir dela, wavelets-filhas ou família de wavelets. A wavelet-mãe deve ser selecionada de acordo com a aplicação. Para que uma função matemática possa servir como wavelet, ela deve possuir caráter oscilatório e concentrar sua energia em um curto período de tempo.

As Transformadas de Wavelets podem ser categorizadas como:

- a) Transformada de Wavelet Contínua (CWT: *Continuous Wavelet Transform*)
- b) Transformada de Wavelet Discreta (DWT: *Discrete Wavelet Transform*)
- c) Transformada de Wavelet Empacotada (WPT: *Wavelet Packet Transform*)

A CWT de um sinal $x(t)$, aqui denotada por $\chi(s, \tau)$, é dada pela convolução do sinal com a família de wavelets $\Psi^*\left(\frac{t}{s}\right)$ geradas a partir da wavelet-mãe $\psi(t)$

$$\chi(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi^*\left(\frac{t - \tau}{s}\right) dt \quad (1)$$

onde * indica conjugado complexo. Em 1, s pode ser entendido como um fator de escala e τ , como um deslocamento no tempo.

A Transformada de Wavelets é similar à Transformada de Fourier, ao representar um sinal como uma soma de componentes, apenas com a família de wavelets substituindo as funções senoidais no papel de bases ortonormais.

A Transformada de Fourier de $\chi(s, \tau)$, que projeta a CWT no domínio da frequência real, é dada por:

$$\begin{aligned} \hat{\chi}(s, f) &= \mathcal{F}\{\chi(s, \tau)\} \\ &= \frac{1}{2\pi\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi^*\left(\frac{t - \tau}{s}\right) dt \right] e^{-2\pi i f \tau} d\tau \\ &= \sqrt{s} \hat{\chi}(f) \hat{\Psi}^*(sf) \end{aligned} \quad (2)$$

$$(3)$$

onde $\hat{\chi}$ denotada a Transformada de Fourier. A partir de 2, é possível obter a transforma-

ção inversa, projetando a CWT no domínio do tempo:

$$\begin{aligned} \chi(s, \tau) &= \mathcal{F}^{-1}\{\hat{\chi}(s, f)\} \\ &= \mathcal{F}^{-1}\{\sqrt{s} \hat{\chi}(f) \hat{\Psi}^*(sf)\} \\ &= \sqrt{s} x(t) * \mathcal{F}^{-1}\{\Psi^*(sf)\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$(5)$$

IV. METODOLOGIA DA PESQUISA

Na primeira fase do trabalho, particularizou-se o tema da pesquisa. Para tanto, dado o tema principal, uso da Transformada de Wavelet para análise de séries temporais, selecionou-se um grupo de 5 artigos técnicos de alto nível para constar da bibliografia de referência. O processo de pre-seleção encontra-se detalhado no item IV-A1. A partir desse conjunto de artigos, optou-se por limitar a pesquisa às aplicações de diagnóstico de falhas em motores de indução, pelos seguintes motivos:

1. A disponibilidade de referências bibliográficas de alto nível.
2. A existência de interesse econômico no tema por parte da indústria.
3. A possibilidade e facilidade de aplicação prática do investigado, a ser explorada em trabalhos futuros.
4. A possibilidade de expandir o estudo, em trabalhos futuros, de forma a abarcar outros tipos de máquinas rotativas.

A. Bibliografia de referência

A bibliografia de referência foi organizada a partir de uma pre-seleção de artigos técnicos relevantes e de alto nível. O processo está descrito no item IV-A1. Durante a pesquisa, material adicional foi incluído conforme a necessidade.

1) *Artigos*: Os artigos técnicos foram pre-selecionados de acordo com os seguintes critérios:

1. Ano de publicação: publicações mais recentes receberam prioridade.

2. Número de citações: artigos mais frequentemente citados receberam prioridade.
3. Propósito: procurou-se mesclar artigos de naturezas diversas.

Para tanto, foi necessário analisar apenas os metadados de cada um. Ao final do processo, os escolhidos foram os seguintes¹:

- a) 4: Trata-se de uma revisão do assunto, e também é o artigo mais citado da lista. Com a sua escolha, o artigo 3, que também é uma revisão, foi descartado, apesar de também ostentar muitas citações.
- b) 7: Trata-se de outra revisão, mas muito mais recente, e que ainda assim possui bom número de citações. Sua inclusão teve o propósito de obter-se uma visão mais recente do tema tratado pelo anterior.
- c) 9: Trata-se de um artigo com bom número de citações e específico para diagnóstico de falhas em motores de indução.
- d) 19: Trata-se de um artigo pouco citado, mas bastante recente, e também específico para falhas em motores de indução. Sua inclusão teve o propósito de obter-se uma visão mais recente do tema tratado pelo anterior.
- e) 17: Trata-se de um artigo muito citado, não específico para motores de indução e sim para máquinas rotativas em geral. Sua inclusão teve o propósito de obter-se uma visão mais geral do assunto.

O conjunto de artigos pre-selecionado atende bem aos critérios de relevância e atualidade.

Para fins de documentação, o V-A apresenta todos os artigos cujos metadados foram examinados para a pre-seleção.

¹A lista completa de arquivos encontra-se no anexo ??

V. ANEXOS

A. Lista completa de artigos

A tabela e a lista que seguem apresentam os artigos cujos metadados foram analisados na fase de pre-seleção. Os artigos pre-selecionados estão realçados. O número de citações foi obtido no Google Scholar.

Número	Ano	Disponibilidade	Citações
1	2015	Gratuito	2
2	2013	ResearchGate	4
3	2004	ResearchGate	698
4	2006	Elsevier	1776
5	2005	Gratuito	10
6	2010	Gratuito	20
7	2014	ResearchGate	160
8	2008	Gratuito	56
9	2004	IEEE	134
10	2011	Gratuito	4
11	2007	ResearchGate	36
12	2011	Gratuito	25
13	2013	Gratuito	2
14	2015	ResearchGate	5
15	2013	Gratuito	2
16	2005	Gratuito	107
17	2007	Elsevier	244
18	2011	Gratuito	2
19	2014	Gratuito	5
20	2007	Gratuito	40
21	2001	Gratuito	5
22	2011	Gratuito	22
23	2009	ResearchGate	45
24	2005	Gratuito	15
25	2004	Gratuito	10
26	2002	Gratuito	28
27	2012	Gratuito	21
28	2004	Gratuito	169

1. Ruqiang Yan, Mengxiao Shan, Jianwei Cui e Yahui Wu - Mutual Information-Assisted Wavelet Function Selection for Enhanced Rolling Bearing Fault Diagnosis - Shock and Vibration, Vol. 2015, Article ID 794921.
2. Zhenyou Zhang, Yi Wang e Kesheng Wang - Intelligent fault diagnosis and prognosis approach for rotating machinery integrating wavelet transform, principal component analysis, and artificial neural networks - Journal of Advanced Manufacturing Technology, Sep. 2013.
3. Z.K. Peng, F.L. Chu - 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.
4. **Andrew K.S. Jardine, Daming Lin e Dragan Banjevic - A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance - Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 20, Issue 7, Oct. 2006, pp. 1483 a 1510**
 5. Hongyu Yang - Automatic Fault Diagnosis of Rolling Element Bearings Using Wavelet Based Pursuit Features - School of Mechanical, Manufacturing and Medical Engineering, Queensland University of Technology, Oct. 2004
 6. Lixin Gao, Zhiqiang Ren, Wenliang Tang, Huaqing Wang e Peng Chen - Intelligent gearbox diagnosis methods based on SVM, wavelet lifting and RBR - Sensors 2010, 10, pp. 4602 a 4621.
 7. **Ruqiang Yan, Robert X. Gao, Xuefeng Chen - Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications - Signal Processing, Vol. 96, Part A, Mar. 2014, pp. 1 a 15**
 8. Pratesh Jayaswal, A. K. Wadhwani e K. B. Mulchandani - Machine Fault Signature Analysis - International Journal of Rotating Machinery, Vol. 2008, Article ID 58398.
 9. **T. W. S. Chow, Shi Hai - Induction machine fault diagnostic analysis with wavelet technique - IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 51, Issue 3, Jun. 2004, pp. 558 a 565**
 10. Derek Kanneg, Wilson Wang - A Wavelet Spectrum Technique for Machinery Fault Diagnosis - Journal of Signal and Information Processing, 2011, 2, pp. 322 a 329.
 11. Li Li, Liangsheng Qu, Xianghui Liao - Haar wavelet for machine fault diagnosis - Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, Issue 4, May 2007, pp. 1773 a 1786.
 12. Khalaf Salloum Gaeid e Hew Wooi Ping - Wavelet fault diagnosis and tolerant of induction motor: A review - International Journal of the Physical Sciences Vol. 6(3), pp. 358-376, Feb. 2011
 13. Pu Shi, Zheng Chen e Yuriy Vagapov - Wavelet Transform based Broken Rotor-bar Fault detection and Diagnosis Performance Evaluations - International Journal of Computer Applications, Vol. 69, No. 14, May 2013.
 14. M. Kang, J. Kim e J. M. Kim - An FPGA-Based Multicore System for Real-Time Bearing Fault Diagnosis Using Ultra-sampling Rate AE Signals - IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, Issue 4, Oct. 2014, pp. 2319 a 2329.
 15. A. Santhana Raj e N. Murali - Morlet Wavelet UDWT Denoising and EMD based Bearing Fault Diagnosis - Electronics, Vol. 17, No. 1, Jun. 2013.
 16. Ruqiang Yan e Robert X. Gao - An efficient approach to machine health diagnosis based on harmonic wavelet packet transform - Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 21, 2005, pp. 291 a 301.
 17. **Qiao Hu, Zhengjia He, Zhousuo Zhang, Yanyang Zi - Fault diagnosis of rotating machinery based on improved wavelet package transform and SVMs ensemble - Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, Issue 2, Feb. 2007, pp. 688 a 705**
 18. Andrzej Klepka - Wavelet Based Signal Demodulation Technique for Bearing Fault Detection - Mechanics and Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 4, 2011, pp. 63 a 71.
 19. **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.

20. Jie Liu, Wilson Wang, Farid Golnaraghi e Kefu Liu - Wavelet spectrum analysis for bearing fault diagnostics - Measurement Science and Technology 19, 2008.
21. H. Ahmadi, R. Tafreshi, F. Sassani e G. Dumont - On the Performance of Informative Wavelets for Classification and Diagnosis of Machine Faults - Y. Y. Tang et al. (Eds.): Berlin, Springer-Verlag, 2001, pp. 369 a 381.
22. Yun-Jie Xu, Shu-Dong Xiu - A New and Effective Method of Bearing Fault Diagnosis Using Wavelet Packet Transform Combined with Support Vector Machine -Journal of Computers, Vol. 6, No. 11, Nov. 2011.
23. N. Saravanan e K.I. Ramachandran - Fault diagnosis of spur bevel gear box using discrete wavelet features and Decision Tree classification - Expert Systems with Applications, Vol. 36, Issue 5, Jul. 2009, pp. 9564 a 9573.
24. Jiri Vass e Cristina Cristalli - Optimization of Morlet Wavelet for Mechanical Fault Diagnosis - 12th International Congress on Sound and Vibration, Jul. 2005.
25. Loránd Szabó, Jeno Barna Dobai, Károly Ágoston Biró - Discrete Wavelet Transform Based Rotor Faults Detection Method for Induction Machines - International Journal of Engineering Research and Applications, Special Issue *International Conference on Industrial Automation and Computing*, Apr. 2014.
26. Howard A. Gaberson - The Use of Wavelets for Analyzing Transient Machinery Vibration - Sound and Vibration, Sep. 2002.
27. Hocine Bendjama, Salah Bouhouche e Mohamed Seghir Boucherit - Application of Wavelet Transform for Fault Diagnosis in Rotating Machinery - International Journal of Machine Learning and Computing, Vol. 2, No. 1, Feb. 2012.
28. Peter W. Tse, Wen-xian Yang e H.Y. Tam - Machine fault diagnosis through an effective exact wavelet analysis - Journal of Sound and Vibration 277, 2004, pp. 1005 a 1024.