

DETECÇÃO DE FALHAS EM VÁLVULAS MOTO-OPERADAS UTILIZANDO TRANSFORMADA DE WAVELET

Alvaro Luiz G. Carneiro^{*}, Aucyone A. da Silva^{*}, Daniel Kao S. Ting^{*} e Belle R. Upadhyaya^{**}

^{*}Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP
São Paulo, Brasil -
carneiro@net.ipen.br

^{**}The University of Tennessee - Department of Nuclear Engineering
Knoxville, TN/USA

RESUMO

A questão da confiabilidade dos componentes, mais especificamente as válvulas moto-operadas relacionadas aos sistemas de segurança, tornou-se um dos fatores mais importantes a serem investigados nas centrais nucleares no que diz respeito a segurança e extensão da vida útil da instalação. Com isto, a necessidade de melhorias nos métodos de testes de monitoração e diagnóstico passou a ser de extrema relevância no campo da manutenção preditiva, estabelecendo como meta principal a confiabilidade da operação dos componentes. Particularmente, em plantas nucleares, a manutenção preditiva contribui principalmente para o fator segurança no sentido de diagnosticar com antecedência a ocorrência de uma possível falha em um determinado componente, evitando consequências catastróficas. Além disso, a manutenção preditiva apresenta uma contribuição sobre o ponto de vista econômico, estabelecendo uma melhor programação da manutenção, reduzindo paradas imprevistas e disponibilizando a planta para a geração de energia quase que na sua totalidade do tempo de operação previsto. Este trabalho apresenta um método de monitoração e diagnóstico das condições operacionais de válvulas moto-operadas, utilizando a Transformada de Wavelet, que durante a última década, tem sido aplicada com sucesso em muitas áreas de diagnósticos de falhas em sistemas industriais e em diversos campos da ciência e engenharia. O método está baseado na análise das assinaturas de potência do motor, levantadas através das medidas das correntes e tensões das fases de alimentação do motor, durante a operação de abertura e fechamento da válvula. Para isto, serão utilizados dados tanto em situações normais como em situações de falhas no componente. Desta maneira, com a aplicação da Transformada de Wavelet, pretende-se obter a caracterização de fenômenos transientes permitindo a localização dos eventos no tempo e frequência, correlacionando-os às situações de falhas no sistema, identificando-as ainda no estado incipiente.

Keywords: wavelet transform, motor-operated valve, signatures analysis.

I. INTRODUÇÃO

A demanda da necessidade de monitoração e diagnóstico de falhas de componentes em processos dinâmicos de instalações industriais fez com que esforços se concentrassem em desenvolver novas técnicas de análises de dados, contribuindo significativamente na segurança, programas de manutenção e extensão de vida útil da instalação[1,2]. A principal tarefa nessa evolução tecnológica consiste em obter informações mais detalhadas contidas nos dados medidos através das técnicas de processamento e análise de sinais.

Nesse aspecto, a transformada de Wavelet tem sido aplicada em várias áreas de pesquisa com bastante sucesso, entre elas: análise de impressões digitais, análise de vibrações, monitoração de equipamentos em plantas industriais[3], detecção de danos estruturais, etc. Pela versatilidade das aplicações da transformada de wavelet, percebe-se que é um campo amplo em expansão e com muitas possibilidades ainda a serem exploradas.

Neste trabalho são utilizados dados obtidos em bancadas experimentais em situações normais e em situações de falhas induzidas.

O objetivo principal da utilização desta técnica de análise de sinais nesse trabalho, consiste na obtenção de informações preliminares mais detalhadas contidas nos sinais medidos durante regimes transientes, evidenciando características transitórias tais como impulsos e mudanças abruptas ou mudanças superficiais ao longo do tempo, especificamente na região da assinatura de potência onde caracteriza a movimentação propriamente dita da haste da válvula.

Sendo assim, o objetivo está em identificar a ocorrência de uma possível falha ainda no estado incipiente evitando dessa maneira consequências mais severas.

A Fig. 1 apresenta uma válvula do tipo gaveta, evidenciando as principais partes de uma válvula moto-operada, ou seja, motor, atuador e sede.

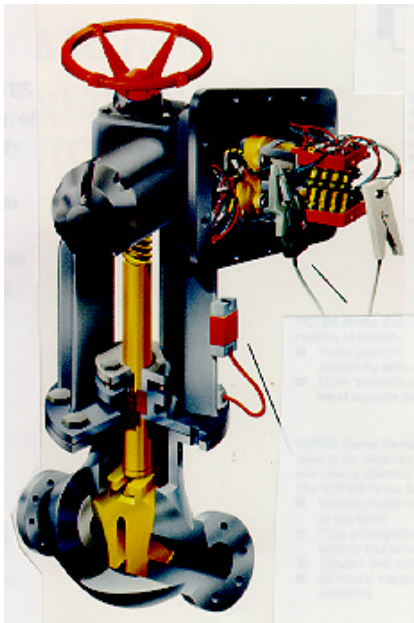


Figura 1. Válvula Moto Operada Tipo Gaveta.

As Fig. 2 e 3 apresentam as assinaturas de potência durante a movimentação de abertura e fechamento da válvula[4], evidenciando os eventos na movimentação. A movimentação da haste da válvula se dá no segundo patamar da assinatura.

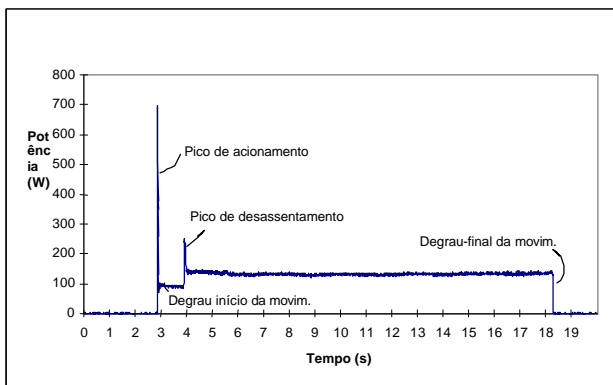


Figura 2. Assinatura de Potência Durante a Abertura.

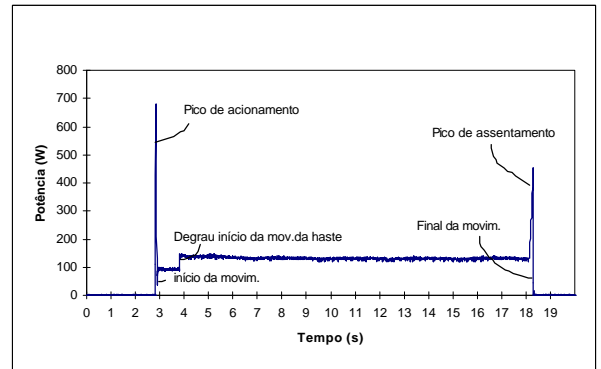


Figura 3. Assinatura de Potência Durante o Fechamento.

Este trabalho foi desenvolvido utilizando dados de válvula moto operada do tipo gaveta, de três polegadas, com atuador *Limitorque* tipo *SMB-000*, levantados em bancadas experimentais.

Os dados foram analisados utilizando plataforma MATLAB[5] juntamente com o módulo *Wavelet Toolbox* da *MathWorks Inc*[6].

II. TRANSFORMADA DE WAVELET

Transformada contínua de wavelet. A transformada contínua de wavelet[7,8] (*CWT-Continuous Wavelet Transform*), relaciona o sinal estudado $s(t)$ com a função elementar, chamada *wavelet*. Esta função é real, oscilatória, com conteúdo finito de frequência. A variação de frequência na transformada de wavelet é obtida através da sua compressão/expansão no tempo. A wavelet é definida conforme a Eq.(1):

$$y_{a,b}(t) = y\left(\frac{t-b}{a}\right); \text{ onde } a, b \in R; a \neq 0 \quad (1)$$

A transformada contínua de wavelet é definida pelo seguinte produto interno:

$$CWT_{(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int s(t)y\left(\frac{t-b}{a}\right)dt; a \neq 0 \quad (2)$$

A função $y(t)$ caracteriza a wavelet mãe e pertence ao espaço $L^2(R)$. Este espaço é definido como o espaço das funções f que satisfazem à condição de energia finita, ou seja,

$$\int |f(t)|^2 dt < \infty \quad (3)$$

Uma série de funções derivadas da wavelet mãe são geradas a partir da variação dos parâmetros “ a ” e “ b ”. O parâmetro “ a ” representa a escala e está relacionada ao recíproco da frequência e o parâmetro “ b ” define a translação no tempo. As Fig. 4 e 5 apresentam as variações da escala (dilatação) e translação no tempo (deslocamento)[9].

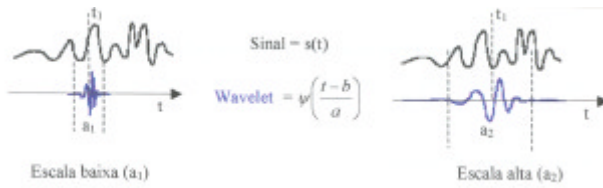


Figura 4. Variação Contínua do Valor da Escala.

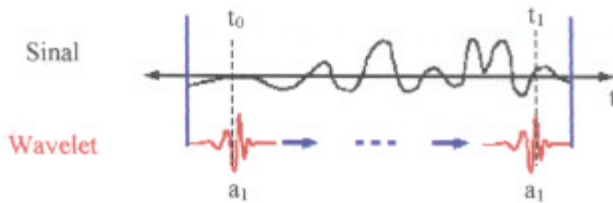


Figura 5. Deslocamento Contínuo da Wavelet no Tempo.

Transformada discreta de wavelet. A transformada contínua de wavelet é uma representação redundante, ou seja, o deslocamento da wavelet no domínio do tempo é contínuo, fazendo com que haja sobreposição parcial destas funções, gerando um cálculo computacional dispendioso.

A transformada discreta de wavelet[7,8] surge quando a transformada de wavelet contínua é amostrada escolhendo-se valores de escalas e posições no tempo (parâmetros “a” e “b”) baseados em potência de dois, variação esta denominada de “dyadic”, definida na equação a seguir.

$$a=2^j \text{ e } b=k2^j, \text{ onde } j, k \in Z \quad (4)$$

Substituindo esses valores em (2), obtêm-se os coeficientes $d_{j,k}$ da CWT e são definidos pela Eq. (5).

$$d_{j,k} = CWT(2^{-j}, k2^{-j}) = 2^{j/2} \int s(t) \mathbf{y}(2^j t - k) dt = \int s(t) \mathbf{y}_{j,k}(t) dt \quad (5)$$

onde $\mathbf{y}_{j,k}(t)$, são versões dilatadas e transladadas da wavelet mãe $\mathbf{y}(t)$, definidas por:

$$\mathbf{y}_{j,k}(t) = 2^{j/2} \mathbf{y}(2^j t - k) \quad (6)$$

A versão amostrada da CWT, é denominada de transformada discreta de wavelet (DWT) e é definida como:

$$d_{j,k} = \int s(t) \mathbf{y}_{j,k}(t) dt \quad (7)$$

A reconstituição do sinal é definido como:

$$s(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} d_{j,k} \mathbf{y}_{j,k}(t) \quad (8)$$

A Fig. 6 apresenta o processo de dilatação e deslocamento da transformada discreta de wavelet.

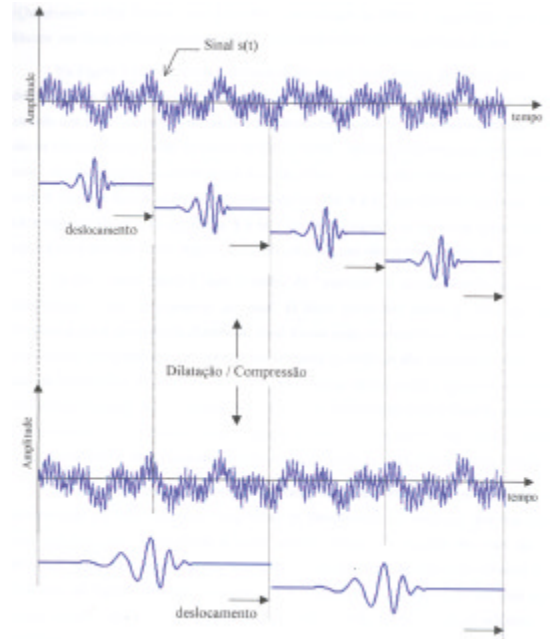


Figura 6. Processo de Dilatação e Deslocamento da DWT.

Decomposição do sinal. As Figs. 7 e 8 ilustram a decomposição de um sinal através do bloco básico de decomposição do algoritmo de Mallat[10]. Neste processo, o sinal original S passa através de filtros complementares H e L , passa alta e passa baixa respectivamente. Destes filtros emergem dois sinais com o mesmo número de amostras que S . Após a operação “downsampling”, que consiste em desprezar cada segunda amostra da sequência, dá origem aos sinais cA e cD , que são os coeficientes da DWT. O filtro passa baixa L tem o efeito de “suavizar” o sinal, gerando o que é denominado de *aproximação do sinal*. O filtro passa alta retém a parte de alta frequência que é denominada de *detalhe do sinal*.

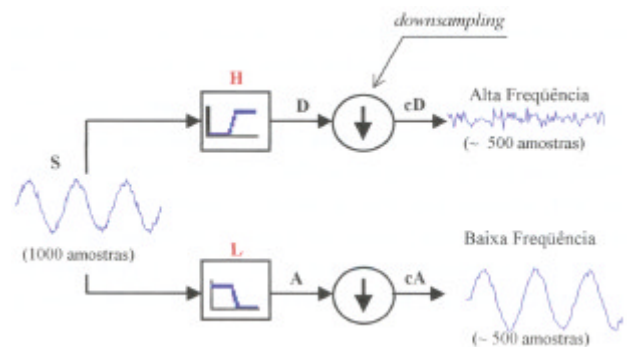


Figura 7. Bloco Básico de Decomposição do Sinal.

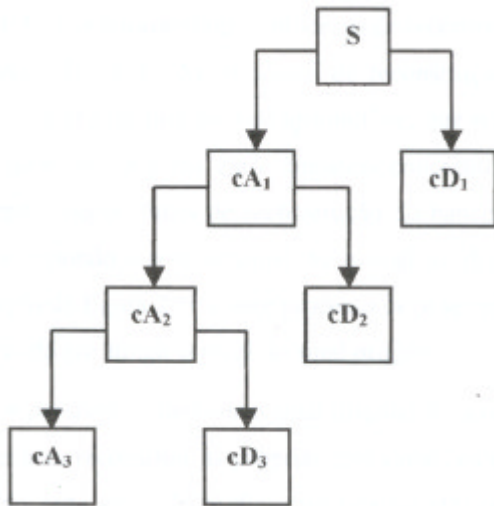


Figura 8. Decomposição do Sinal em Árvore.

III. ANÁLISE DOS SINAIS

Todos os sinais foram analisados utilizando a transformada de wavelet discreta (DWT).

Foram analisados os sinais em duas situações distintas de causas e efeitos de falhas pré estabelecidas.

Caso 1. A falha apresentada no primeiro caso consiste de uma situação de obstrução mecânica durante a movimentação de abertura da válvula. Nesse caso são apresentados 4 sinais, sendo a primeira assinatura, a situação normal sem falha, denominada de padrão. A quarta assinatura com falha de obstrução mecânica no movimento de abertura. Os sinais equivalentes às assinaturas 2 e 3, foram simulados fazendo uma regressão do sinal de falha chegando próximo da situação normal.

O objetivo da regressão está na observação e detecção da falha ainda no estado incipiente, diagnosticando uma situação inicial de falha provável.

As assinaturas de potência no domínio do tempo nos quatro estágios estão apresentadas na Fig. 9 intitulada evolução de falhas-obstrução na movimentação.

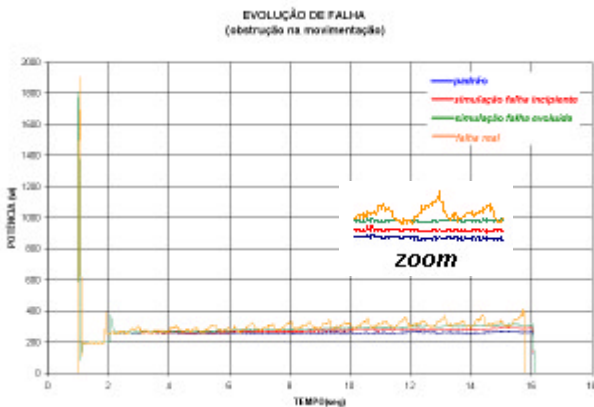


Figura 9. Evolução de Falhas-Osbtucação na Movimentação.

Para análise desses sinais, foi utilizada a wavelet tipo “Daubechies”4[11], nível de decomposição 6. A Fig. 10 apresenta as aproximações para os 6 níveis de decomposição do sinal com a falha real.

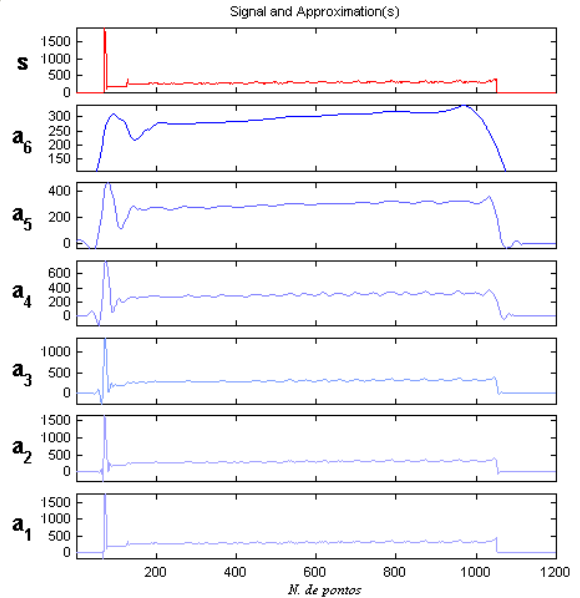


Figura 10. Sinal Original e as Decomposições.

A Fig. 11 apresenta a sobreposição dos quatro casos analisados, ou seja, situação padrão (s/ falha), simulação falha incipiente, simulação falha evoluída e a situação de falha real.

O sinal está amostrado ao longo de todo o ciclo de abertura da válvula. Para essa análise foi utilizada wavelet tipo db4, nível 6 e estão apresentadas as aproximações de nível 6 para cada sinal analisado.

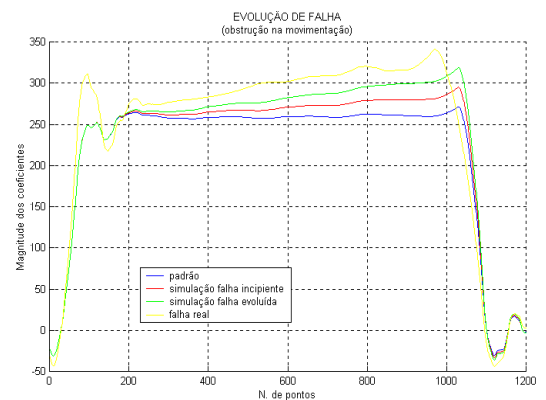


Figura 11. Análise de Evolução de Falha - Ciclo Total.

A Fig. 12 apresenta a análise da evolução de falha na região de interesse, ou seja, durante o intervalo de tempo de movimentação da haste da válvula propriamente dito.

Este gráfico evidencia a sensibilidade de detecção da falha ainda no estágio incipiente.

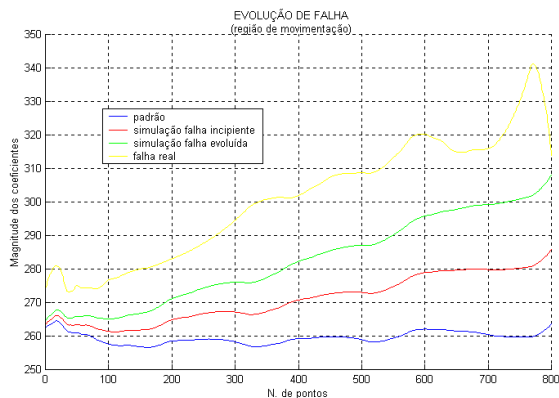


Figura 12. Análise de Evolução de Falha na Região de Movimentação da Haste da Válvula.

Caso 2. A falha apresentada neste caso consiste de uma situação de desgaste de engrenagem da caixa de redução do atuador. A assinatura de potência analisada foi adquirida durante a movimentação de abertura da válvula.

Nesse caso são apresentados 5 sinais, sendo a primeira assinatura a situação normal (sem falha), denominada de padrão e a quinta assinatura com falha real apresentando desgaste na engrenagem.

Os sinais equivalentes às assinaturas 2, 3 e 4 foram simulados fazendo uma regressão do sinal de falha chegando próximo da situação normal, simulando a situação de falha incipiente.

A Fig. 13 apresenta a sobreposição das assinaturas de potência no domínio do tempo para as cinco situações.

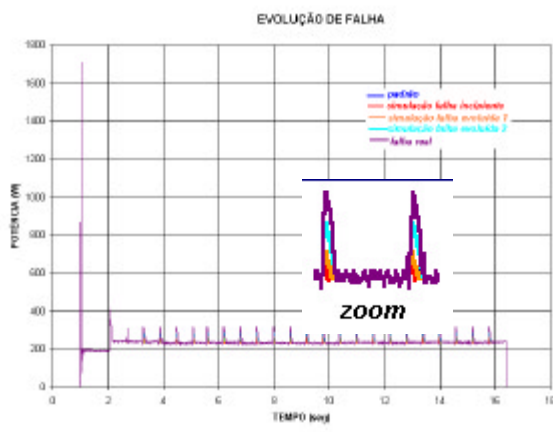


Figura 13: Assinaturas de Potência - Evolução de Falha de Desgaste de Engrenagem.

A análise do sinal na condição de falha real de desgaste de engrenagem, com aplicação da transformada

discreta de wavelet, utilizando wavelet “Daubechies” tipo db4, nível 6, está apresentada a seguir na Fig. 14.

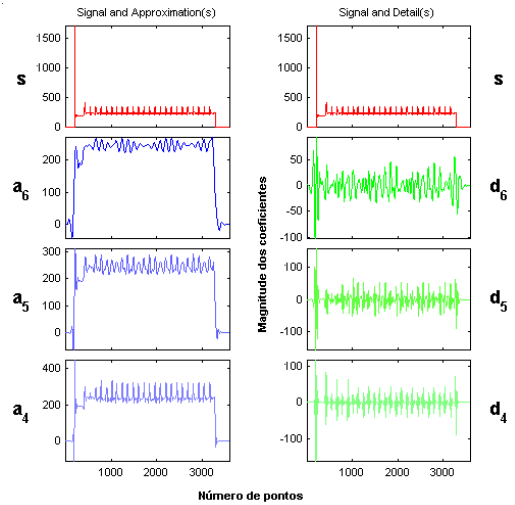


Figura 14. Análise do Sinal Real de Falha.

A Fig. 15 apresenta a evolução da falha partindo da situação padrão (s/ falha) até a falha real, com as intermediárias de simulação. Os sinais apresentados são: detalhe nível 6 para todo o sinal amostrado.

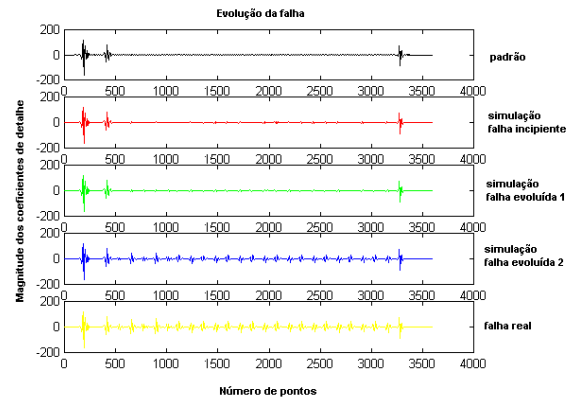


Figura 15. Evolução da Falha - Ciclo Total de Movimentação.

A Fig. 16 apresenta também a evolução da falha, porém na região de movimentação propriamente dita da haste da válvula.

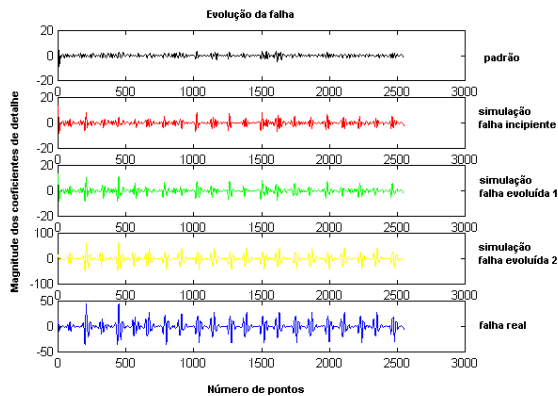


Figura 16. Evolução da Falha na Região de Movimentação.

IV. CONCLUSÃO

Com a crescente demanda da necessidade de monitoração e diagnóstico de falhas de componentes industriais no sentido de obter informações mais detalhadas nos sinais medidos, a utilização da transformada de wavelet veio a contemplar com significativa eficiência, demonstrando aqui mais uma aplicação como um método a ser utilizado na manutenção preditiva.

Como objetivo principal deste trabalho consiste na identificação da ocorrência de uma possível falha ainda no estado incipiente, isso ficou demonstrado com os resultados apresentados, nos dois casos de falhas analisados.

No caso 1, comprovando a sensibilidade na detecção do início de obstrução mecânica durante a movimentação de abertura da válvula, evidenciando a tendência de aumento da potência durante o ciclo de movimentação, conforme mostrado na Fig. 12.

Da mesma maneira no caso 2, deixando claro a eficiência na identificação do início de um desgaste mecânico de engrenagem da caixa de redução, conforme apresentado na Fig. 16.

Portanto, os resultados foram bastante satisfatório, na monitoração e diagnóstico de falha de válvulas moto-operadas, demonstrando aqui mais uma aplicação com sucesso da transformada de wavelet, ferramenta essa em expansão e ainda com muitas possibilidades a serem exploradas.

REFERÊNCIAS

- [1] Atalla D.L., **Early Detection and Diagnosis of Equipment Degradation – Angra I Practices and Goals**; Technical Committee Meeting Report, IAEA-J4 – TC698, Vienna, Nov/1995.
- [2] Carneiro Alvaro L. G., da Silva Aucyone A., Siniscalchi Marcio R., Ferreira William R.; **Predictive Maintenance Program for Motor Operated Valve at Angra I Nuclear Power Plant**; MARCON – 99; Gatlinburg, Tennessee, USA, May/1999.

[3] Ciftciogiu O, Turkcan E.; **Transient Detection by Wavelet Transform in Plant Monitoring**; SMORN VII, Avignon, France, 19-23, May/1995.

[4] Carneiro Alvaro L. G.; **Sistema de Monitoração e Diagnóstico por Análise da assinatura de Potência Elétrica Aplicado a Válvulas Moto Operadas Utilizadas em Centrais Nucleares**; Exame de Qualificação para doutoramento, relatório CPG IPEN/USP, Jun 2001.

[5] MATLAB – **The Language of Technical Computing**; The MathWorks Inc, 1996.

[6] Misiti M.; **MATLAB – Wavelet Toolbox User’s Guide**; The MathWorks Inc, 1996.

[7] Chui C. K.; **An Introduction to Wavelets**; Academic Press, Boston, 1992.

[8] Da Silva Aucyone A., **An Integrated Approach for Plant Monitoring and Diagnosis Using Multiresolution Wavelet Analysis**; Ph.D. Dissertation, The University of Tennessee, USA, december 1997.

[9] Penha Rosani M. L.; **Análise de Sinais em Regime Transiente Aplicando a Técnica de Wavelet**, Dissertação de Mestrado, IPEN - USP, 1999.

[10] Mallat S.; **A Theory for Multi-Resolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation**; IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 11, N.07, 674-693, july/1989.

[11] Daubechies Ingrid; **Ten Lectures on Wavelets**, Philadelphia. PA; Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade do Tennessee - EUA, mais diretamente ao Prof. Belle Upadhyaya pelas discussões técnicas e pela disponibilização dos dados. Ao CNPq pelo suporte financeiro na visita técnica à Universidade do Tennessee.

Ao Centro de Engenharia Nuclear – IPEN/CNEN, pela estrutura necessária para o desenvolvimento desse projeto.

ABSTRACT

The reliability question of the components, specifically the motor operated valves related to the security systems, became one of the most important point to be investigated in the nuclear plants, considering security and extension life of the plant. Therefore, the necessity of improvements in monitoring and diagnosis methods started to be the extreme relevance in the maintenance predictive field, establishing as main goal the reliability and readiness of the components systems.

Particularly in nuclear plants, the predictive maintenance contributes in the security factor in order to diagnosis in advance the occurrence of a possible failure, preventing catastrophic situations. Moreover, the predictive maintenance presents a contribution on the economic point, establishing a better maintenance programming, reducing unexpected shut down.

This work presents a monitoring and diagnosis method for motor operated valves, using the Wavelet Transform, that during the last decade, has been successfully applied in many areas of science and engineering. The method is based on the analysis of the power signatures of the engine, through the measures of currents and voltages of the phases, during the closing and opening stroke time of the valve.

The Wavelet transform, is applied to characterize the transients phenomena or trending to failure, allowing to point out the events in the time and frequency domain, correlating them with the failures situations in the system, identifying them in the incipient state.