

APLICAÇÃO DE UMA FERRAMENTA PARA CONTROLE DE QUALIDADE EM LINHA DE MONTAGEM DE CÂMBIOS AUTOMOTIVOS UTILIZANDO FILTRAGEM ADAPTATIVA

Oliveira Filho, R. H.

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica
Campus Santa Mônica - CEP: 38400-089 - Uberlândia – MG
rhofilho@gmail.com

Duarte, M. A. V.

mvduarte@mecanica.ufu.br

Resumo: *As técnicas tradicionais de análise de sinais, em conjunto com o monitoramento de vibrações oriundas do funcionamento de câmbios automotivos, podem ser utilizadas para definir valores objetivos de aceitação ou recusa num programa de qualidade. Porém, devido à complexidade da dinâmica de tais sistemas mecânicos e aos ruídos inerentes a uma linha de produção, existe uma grande dificuldade na definição dos sintomas de controle e determinação de valores limites. Neste trabalho é apresentado um procedimento utilizando a filtragem adaptativa, via algoritmo dos mínimos quadrados (LMS), como ferramenta de auxílio nos procedimentos de controle de qualidade via monitoramento de vibrações. A metodologia é baseada na utilização dos sinais, medidos num teste padronizado, como sinal primário e de referência no procedimento de filtragem. Foram coletados sinais de vibração de câmbios aprovados em um procedimento de controle de qualidade e inseridas não conformidades comuns de fabricação e montagem. A partir dos resultados da filtragem (sinal filtrado e resíduo), o procedimento foi validado.*

Palavras-chave: *Câmbios Automotivos, Filtro adaptativo LMS, Vibrações, Controle de Qualidade.*

1. INTRODUÇÃO

Várias pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de aumentar a vida útil das caixas de transmissão. Dentre as diversas vertentes, o estudo dos fatores pertinentes ao projeto, como os efeitos decorrentes da geometria inadequada dos dentes das engrenagens, é uma das mais importantes (Howard et al., 2001; Vexlex and Maatar, 1996; Amabili and Fregolent, 1998). Outro campo de pesquisa de grande enfoque é o da análise dos sinais ou também conhecido como análise de assinaturas (Braun, 1986) com o objetivo de prever o estado das caixas de engrenagens, de preferência o mais prematuramente possível (Wang and McFadden, 1995; Wang et al., 2001; Choi et al., 1996).

O Laboratório de Sistemas Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, em parceria com a Engenharia de Processo da FIAT Automóveis S/A, desenvolveu uma série de procedimentos computacionais e experimentais para serem utilizados como ferramenta de apoio na quantificação e identificação das possíveis fontes de rumorosidade nas caixas de transmissão ensaiadas nas bancadas de teste de câmbios da unidade FIASA em Betim, Minas Gerais (Menegatti, 1999; Santana et al., 1998). Atualmente encontra-se em funcionamento um aplicativo que executa um procedimento passa não passa, utilizando curvas de mérito constituídas a partir de um banco de dados compostos por câmbios que foram considerados bons em ensaios na máquina de manobrabilidade e em testes de pista (Pena, 2003).

Observa-se que a rejeição dos câmbios ensaiados, ao se utilizar o procedimento adotado, está associada a algum problema ocorrido durante o processo de fabricação ou montagem. Atualmente, constatada a rumorosidade, a definição das causas que resultaram em tal problema é efetuada por meio de testes dimensionais de todas as engrenagens, eixos e carcaças que compõem os câmbios. Considerando que a caracterização completa de uma engrenagem implica em dezenas de procedimentos metrológicos, conclui-se que a identificação da causa da rumorosidade tem custo elevado além de grande tempo despendido.

Um problema a enfrentar na realização da manutenção preditiva por análise de vibrações, é a dificuldade de aquisição dos sinais diretamente do componente a analisar. Com isto os sinais medidos estão sujeitos a problemas relacionados à propagação do fenômeno vibratório pela máquina, devido à própria impedância mecânica da estrutura, que acarreta uma perda da energia oscilatória e atenuação da transmissão de forças de oscilação. Sabe-se também que o sinal obtido é contaminado por outras informações que não dizem respeito à detecção e diagnóstico de falhas em um determinado componente, como aquelas advindas de outras fontes vibratórias, além de ruídos externos diversos. Como tentativa de contornar este problema, uma ferramenta empregada é a filtragem dos sinais, desta forma consegue-se uma melhor qualidade nestes, permitindo uma análise mais confiável.

Dentro deste contexto surge a necessidade do desenvolvimento de ferramentas que atendam às exigências do mercado atual. Desta forma, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta que realize a filtragem dos sinais de vibração provenientes de câmbios automotivos, extraindo as interferências que não sejam relacionadas ao bom funcionamento do câmbio, para que então se consiga avaliar os defeitos e falhas provenientes dos processos de fabricação e montagem de maneira mais criteriosa.

2. FILTRAGEM ADAPTATIVA

Segundo Marques (2003), a filtragem adaptativa tem sua aplicação considerada vantajosa em relação aos filtros tradicionais quando há a necessidade de processar sinais cujas propriedades estatísticas do seu ambiente são inicialmente desconhecidas. Desta forma, estes filtros se adaptam de forma recursiva ao fenômeno que dá origem ao sinal mediante a variação de parâmetros da sua função de transferência a cada iteração, acompanhando as variações estatísticas dos sinais e permitindo uma filtragem eficaz em casos em que as técnicas do processamento digital de sinais tradicional são deficitárias.

No caso de ambientes estacionários em relação às suas propriedades estatísticas, utiliza-se comumente o filtro de Wiener, cujos parâmetros da sua função de transferência são constantes e definidos sob a regra da minimização do erro médio quadrático entre a sua saída e uma resposta definida como desejada. Primeiramente, são definidas condições iniciais, devido ao desconhecimento das propriedades estatísticas do sinal e, segundo Marques (2003), após um número de iterações, os parâmetros do filtro convergem para um conjunto conhecido como solução ótima de Wiener.

Os filtros adaptativos também se destinam a extrair informação de interesse de um ambiente contaminado por uma interferência (ou ruído), e estes, segundo Marques (2003), são lineares no sentido de que a saída oferecida é uma função linear das observações apresentadas à sua entrada.

A maioria dos algoritmos adaptativos busca os coeficientes ótimos através do método do gradiente descendente (Gradient Descent) ou método da máxima descida (Steepest Descent) segundo a direção oposta do gradiente do erro. Quando esta superfície corresponde ao erro quadrático instantâneo e se utiliza um filtro FIR (Resposta Finita ao Impulso), o algoritmo em questão se denomina LMS (Least Mean Square). Este é o algoritmo mais usado na implementação de filtros adaptativos, pois além de ser simples de implementar, é eficiente (Bezerra, 2004).

Para aumentar a velocidade de convergência do algoritmo LMS, propõe-se na literatura (Marques, 2003) uma versão modificada deste, o algoritmo de Mínimos Quadrados Normalizado (NLMS), conforme utilizado por Nunes (2006).

Na Figura 2.1 está ilustrado o diagrama de filtragem adaptativa utilizado.

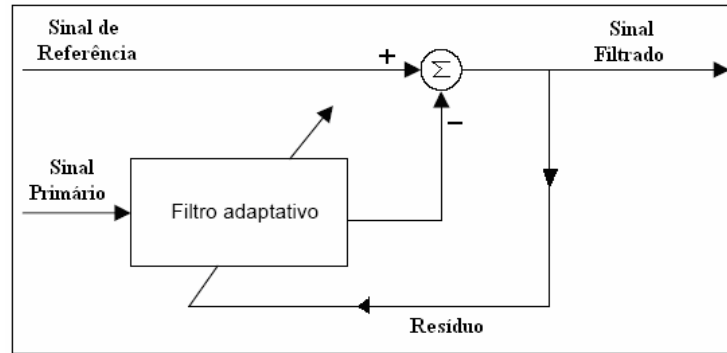


Figura 2.1 - Diagrama da técnica da filtragem adaptativa.

O resíduo de filtragem é estimado pela Equação 2.1.

$$\text{Resíduo}(k) = \text{Sinal Filtrado}(k) - \text{Sinal de Referência}(k) \quad (2.1)$$

3. SINAL DE ENGRENAMENTO

O processo de análise de sinais de câmbios é na maioria das vezes de difícil execução, uma vez que embora apenas um par de engrenagens esteja efetivamente transmitindo potência, todos os demais permanecem engrenados, fazendo com que um defeito presente em uma marcha se manifeste mesmo que esta não esteja transmitindo potência.

A Figura 3.1 mostra os gráficos de aceleração (a) e rotação (b) no domínio do tempo de um câmbio isento de defeitos. Já a Figura 3.2 ilustra o gráfico de aceleração (a) e rotação (b) no domínio do tempo de um câmbio com defeito na quinta marcha. Nota-se claramente nos gráficos das acelerações (Figuras 3.1 a e 3.2 a) que, apesar do defeito estar presente em apenas uma relação de marchas, este é transmitido a todas as outras. Contudo nos gráficos das rotações (Figuras 3.1 b e 3.2 b) nenhuma diferença relevante é observada.

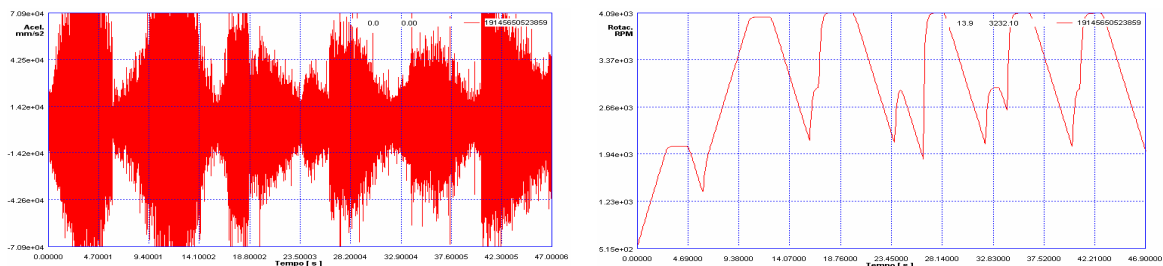


Figura 3.1 - Sinal de vibração coletado de um câmbio isento de defeitos.

a) Aceleração x Tempo. b) Rotação x Tempo.

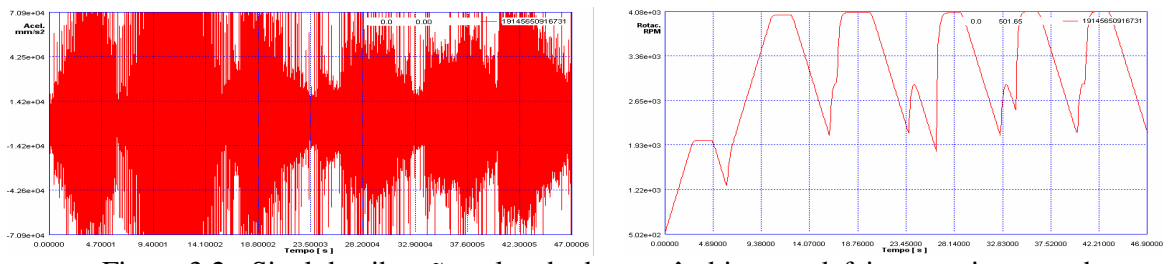


Figura 3.2 - Sinal de vibração coletado de um câmbio com defeito na quinta marcha.

a) Aceleração x Tempo. b) Rotação x Tempo.

A utilização da filtragem adaptativa com o algoritmo LMS é justificada devido ao comportamento do sinal, pois a rotação varia como tempo, como é visto nas Figuras 3.1 b) e 3.2 b), que ilustram a variação da rotação no ciclo de engrenamento, desde a marcha a ré até a quinta marcha. Desta forma, por se tratar de filtro de correlação, pretende-se através de sua utilização retirar do sinal primário, somente aquela parcela que esteja correlacionada com o engrenamento, sendo o resíduo uma parcela do sinal proveniente de falhas de fabricação ou montagem.

4. ANÁLISE DOS SINAIS DE VIBRAÇÃO

É sabido que, na análise de sinais de comportamento transiente e não estacionário, onde a frequência varie com o tempo, é necessário o uso de metodologias de análises tempo-frequência. Neste trabalho foi utilizada a média exponencial, aqui denominada curva RMS.

A média exponencial, $\bar{x}^2$, é dada pela Equação 4.1:

$$\bar{x}_i^2 = x_{i-1}^2 + (x_i^2 - x_{i-1}^2)/k \quad (4.1)$$

onde $\bar{x}_i^2$ é o i-ésimo termo do vetor $\bar{x}^2$ e k é dado pela Equação 4.2:

$$k = f_{aquis} T + 1 \quad (4.2)$$

onde f_{aquis} é a frequência de aquisição em Hz e T é o tempo de integração, o qual neste trabalho é igual a 125×10^{-3} s, o que corresponde a um tempo de integração rápido (fast), permitindo então um esquecimento das ocorrências passadas no sinal analisado.

4.1. Escolha do Sinal de Referência

O procedimento adotado nesta etapa foi a comparação entre os níveis RMS dos sinais. Foram coletados sinais de engrenamento de onze (11) câmbios isentos de defeitos, e dentre estes foi escolhido o sinal de referência para o filtro LMS. Para tal escolha, traçaram-se as curvas de valor absoluto (RMS) e a curva de valor médio dentre eles (Figura 4.1).

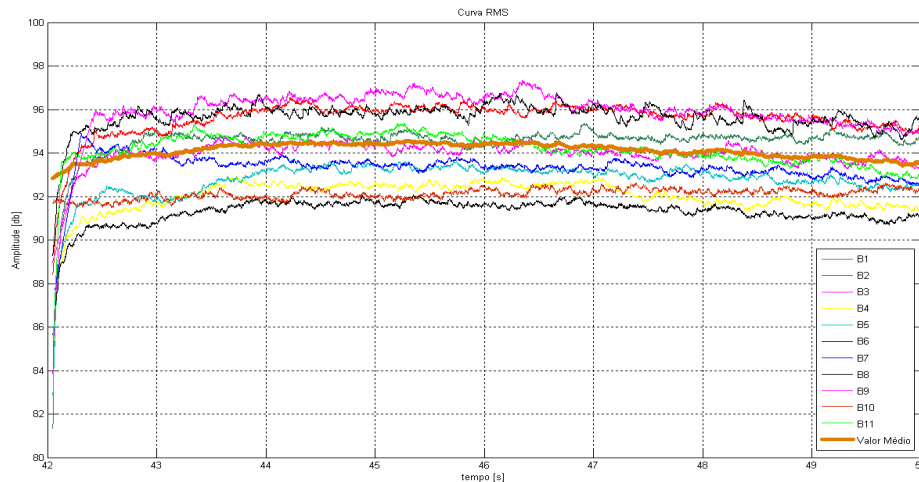


Figura 4.1 – Curvas RMS e de Valor Médio dos sinais de engrenamento bons.

Com o intuito de não divulgar os resultados numéricos dos testes realizados pela FIAT Automóveis, todos os sinais analisados foram multiplicados por um coeficiente, sendo os valores, em $[\text{mm/s}^2]$, em $[\text{RPM}]$ ou em $[\text{dB}]$ nos gráficos e tabelas, apenas para fins de comparação.

Analisando a Figura 4.1, verifica-se que a curva do câmbio B9 é a que mais se aproxima do valor médio, funcionando como um bom demonstrativo da curva característica de um engrenamento sem defeito, sendo escolhido como sinal de referência.

4.2. Tratamento dos Sinais de Engrenamento

Os sinais adquiridos no banco prova câmbio apresentam o ciclo completo de engrenamento, desde a ré até a quinta marcha. Contudo, como os defeitos a serem considerados aparecem somente na quinta marcha, se fez necessário separar a parcela do sinal referente à marcha de interesse. Nos gráficos de Aceleração x Tempo (Figura 4.2 a) e Rotação x Tempo (Figura 4.2 b) de um sinal de engrenamento, é possível estimar o instante de início e término do engrenamento da 5ª marcha, por volta do instante 42 segundos (conforme indicado pela seta) e 50 segundos (final do gráfico), respectivamente.

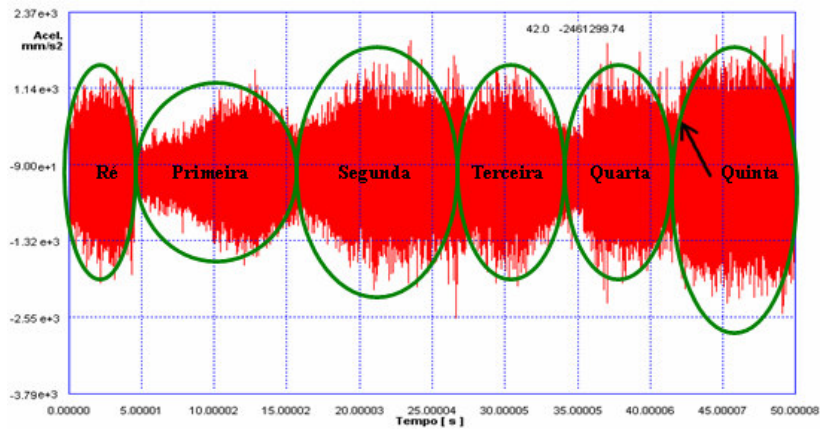


Figura 4.2 a) - Gráfico Aceleração x Tempo para um sinal de engrenamento.

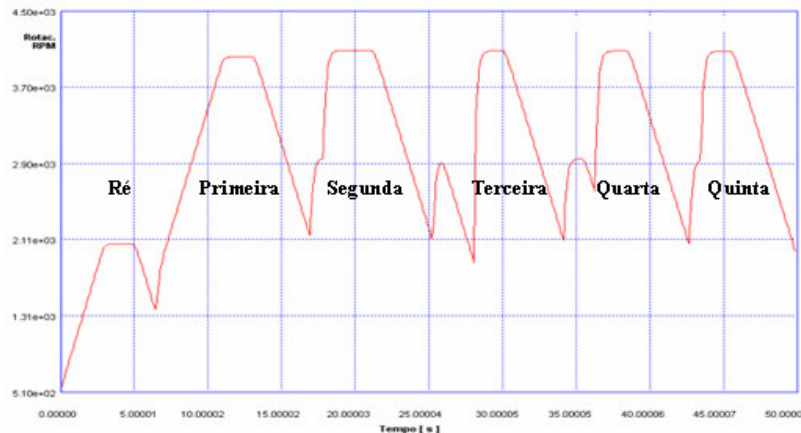


Figura 4.2 b) - Gráfico Rotação x Tempo para um sinal de engrenamento.

No sistema a ser implantado no banco de prova, o início e o término de cada ciclo são controlados via CLP (Controlador Lógico Programável), ou seja, o início dos ciclos é determinado com grande precisão.

Para que o filtro adaptativo seja eficiente, o início do ciclo do sinal que será filtrado deve coincidir com o início do ciclo do sinal de referência. Sendo assim, foi necessário desenvolver um procedimento de otimização via algoritmo genético, através de análises de correlação entre as rotações dos sinais que serão filtrados e de referência.

Foi definido o intervalo de restrição lateral de menos e mais um segundo (41 e 43 segundos) em relação ao início do ciclo da quinta marcha (42 segundos) e escolhido o ponto de maior correlação entre os sinais, sendo este o ponto de partida para a aquisição dos sinais que serão analisados.

4.3. Filtragem dos Sinais de Vibração

Para um satisfatório procedimento de filtragem dos sinais, é necessário ajustar os parâmetros a serem utilizados no filtro. Quando se diz parâmetros do filtro, está se referindo aos parâmetros iniciais do algoritmo LMS, ou seja, números de pesos do filtro (L), razão de convergência (μ) e fator de esquecimento (α). Tais parâmetros dependem das características dos sinais utilizados.

Para o ajuste dos parâmetros do filtro, adicionou-se ao sinal de referência, como sinais de interferência, um ruído branco de mesmo nível RMS, simulando alguma interferência externa ao funcionamento do câmbio.

A escolha dos parâmetros μ , α e L para utilização no filtro adaptativo foi feita após um processo de otimização randômica, onde a função objetivo foi a minimização do erro entre o sinal de engrenamento estimado (obtido com a utilização do filtro adaptativo) e o sinal de referência.

A Figura 4.3-a compara o sinal de referência com o sinal primário. A Figura 4.3-b compara o sinal de engrenamento estimado pelo filtro com o sinal de referência. Apesar de estarem no domínio do tempo, é possível verificar a minimização da interferência do ruído adicionado.

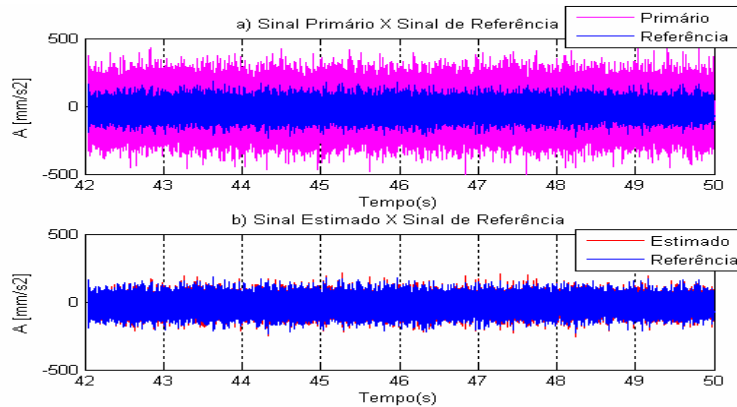


Figura 4.3 - a) Sinal de Referência X Sinal Primário. b) Sinal de Referência X Sinal Estimado.

Na Figura 4.4, pode-se comparar as curvas de valor absoluto (RMS) dos sinais de referência, primário e estimado, para os parâmetros otimizados $L = 8$, $\mu = 0,01$ e $\alpha = 0,001$.

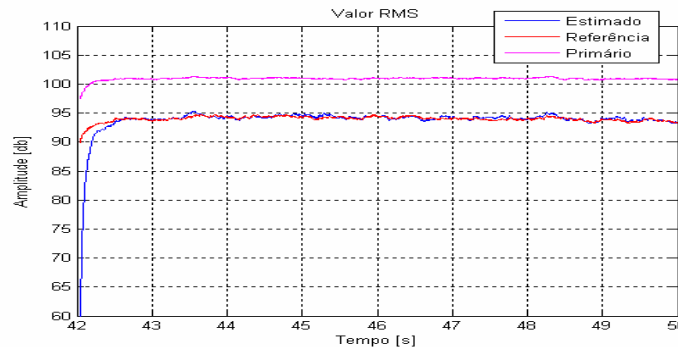


Figura 4.4 – Comparação entre as curvas de valor absoluto (RMS) dos sinais.

Através das análises dos gráficos das Figuras 4.3 e 4.4, constata-se que o filtro age de maneira eficaz, aproximando o sinal primário do sinal de referência com um erro médio de

aproximadamente 0,125 dB, valor este calculado pela máxima diferença entre os valores RMS dos sinais Estimado e de Referência da Figura 4.4.

Para uma melhor verificação do desempenho do filtro, adicionou-se ao sinal de ruído, além do ruído branco, três harmônicos:

- Um com frequência 4000 Hz e amplitude variável;
- Outro com frequência de 2500 Hz, amplitude de 30% do valor da amplitude do sinal de referência e defasada de 60°;
- Outro com frequência de 3000 Hz, amplitude de 40% do valor da amplitude do sinal de referência e defasada de 45°.

Analizando a Figura 4.5, que compara as curvas de valor absoluto (RMS) dos sinais, constata-se que o filtro ainda age de maneira eficaz, aproximando o sinal primário do sinal de referência com um erro médio de aproximadamente 0,5 dB, sendo então confirmado o uso dos parâmetros já estipulados.

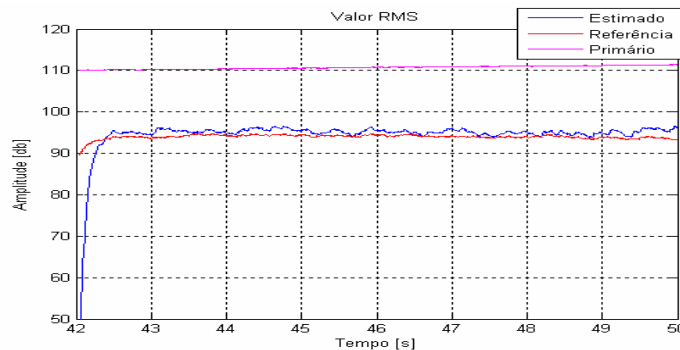


Figura 4.5 – Comparação entre as curvas de valor absoluto (RMS) dos sinais.

5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um filtro adaptativo NLMS (Normalized Least Mean Square) com o intuito de ser empregado como ferramenta para controle de qualidade em uma linha de fabricação e montagem de câmbios automotivos.

Utilizou-se um sinal de engrenamento real e simularam-se defeitos de fabricação e montagem. Observando-se os resultados obtidos na filtragem, pôde-se constatar que o filtro NLMS agiu de maneira eficaz, uma vez que atenuou significativamente as interferências simuladas, que possam vir a existir em um sinal de engrenamento real, não importando a quantidade ou intensidade, sejam eles com ou sem modulações em amplitude ou fase.

Mesmo com o erro apresentado, pode-se concluir que o filtro possivelmente atenderá à finalidade para a qual foi desenvolvido, uma vez que o erro não excedeu, em módulo, 1 dB.

Propõe-se para próximos trabalhos a aplicação do filtro em sinais de engrenamento com defeitos reais, ou seja, inserir os defeitos em componentes do sistema, tais como desvio de forma em dentes de engrenagem, desalinhamento e desbalanceamento de eixos, mancais com defeito, e assim averiguar a veracidade dos resultados aqui obtidos.

6 - REFERÊNCIAS

- Amabili M.; Fregolent A., 1998, “A Method to Identify Model Parameters and Gear Errors by Vibrations of a Spur Gear Pair”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 214, No. 2, pp. 339-357.
- Bezerra, R. A., 2004, “Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração”. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

- Braun, S., 1986, “Mechanical Signature Analysis: Theory and Applications”, 1.ed. Academic Press, London, 385p.
- Choi, F. K.; Polyshchuk, J. J. Z.; Handschuh, R. F.; Townsend, D. P., 1996, “Analysis of the Effects of Surface Pitting and Wear on the Vibration of a Gear Transmission System”, *Tribology International*, Vol. 29, n. 1, pp. 77-83.
- Howard, I.; JIA, S.; Wang, J., 2001, “The Dynamic Modeling of Spur Gear in Mesh Including Friction and a Crack, Mechanical System and Signal Processing”, Vol. 5, pp. 438-449.
- Marques, P. A. C., 2003, “Introdução à Filtragem Adaptativa. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa”, Apostila do curso de Processamento Digital de Sinal II - Engenharia Informática e de Computadores.
- Menegatti, W. B., 1999, “Identificação de Falhas em Caixas de Câmbios, Via Sinais de Vibração”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- Nunes, M. A. A., 2006, “Uma Metodologia para Quantificação da Contribuição Sonora de Fontes de Ruído Industrial no Meio Ambiente”, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- Pena, J. L. O., 2003, “Um Estudo Sobre o Uso de Técnicas Não Tradicionais Aplicadas à Detecção de Defeitos de Fabricação em Câmbios Automotivos”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- Santana, D.; Ribeiro, C. R.; Duarte, M. A. V.; Cabacinha, A., 1998, “Um Procedimento Estatístico Para Identificação de Rumorositades em Câmbios em Linhas de Montagem”, Congresso SAE Brasil’98, São Paulo, Brasil.
- Velex, P.; Maatar, M., 1996, “A Mathematical Model for Analyzing the Influence of Shape Deviations and Mounting Errors on Gear Dynamic Behavior”, *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 191, No. 5, pp. 629-660.
- Wang, W. J.; Macfadden, P. O., 1995, “Decomposition of Gear Motion Signals and Its Application to Gearbox Diagnostics”, *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 117, pp. 363-369.
- Wang, W. Q.; Ismail, F.; Golnaraghi, M. F., 2001, “Assessment of Gear Damage Monitoring Techniques Using Vibration Measurements”, *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 15, No. 5, pp. 905-922.

APPLICATION OF A TOOL FOR AUTOMOTIVE GEARBOX QUALITY CONTROL IN PRODUCTION AND ASSEMBLY LINE USING ADAPTIVE FILTERING

Oliveira Filho, R. H.

Federal University of Uberlandia, Faculty of Mechanical Engineering
Campus Santa Monica - CEP: 38400-089 - Uberlandia-MG

rhofilho@gmail.com

Duarte, M. A. V.

mvduarte@mecanica.ufu.br

Abstract: *The traditional techniques of signal analysis, allied with the vibration monitoring from the automotive gearboxes operation, can be used to set goals values of acceptance or rejection in a quality program. However, due to the complexity of the dynamics of such mechanical systems and the noise inherent in a production line, there is a great difficulty in defining the symptoms of control and determination of limits. In this work is presented a procedure using the adaptive filtering, by the least mean square algorithm (LMS), as a tool to aid in the procedures of quality control by vibrations tracking. The methodology is based on the use of signals, measured on a standardized test, such as primary and reference signals in the filtering process. Were collected vibrations signals by gearboxes approved in a procedure of quality control and introduced commonness manufacturing and assembly nonconformities. From the filtering results (signal filtered and waste), the procedure was validated.*

Keywords: *Automotive gearboxes, LMS adaptive filter, Vibrations, Quality Control.*