

# USO DA TDA – MÉDIA NO DOMÍNIO DO TEMPO COMO FERRAMENTA DE IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM CÂMBIOS AUTOMOTIVOS

**Sebastião Simões Cunha Jr.**

**Marcus Antonio Viana Duarte**

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica.

Av. João Naves de Ávila 2160 – Bloco M, CEP: 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil.

E-mail: simoes@mecanica.ufu.br , mvduarte@mecanica.ufu.br

## Resumo

Embora inspeções visuais regulares e a manutenção preventiva possam ajudar na redução de falhas e defeitos em sistemas de engrenagens, o custo e o tempo requerido para executar tais procedimentos os tornaram economicamente inviáveis. Afim de evitar este problema, várias metodologias utilizando análise de assinaturas de sinais vibratórios estão sendo desenvolvidas para examinar as condições dos sistemas de engrenagens. Este trabalho tem como objetivo mostrar como a TDA (média no Domínio do Tempo) pode ser utilizada, juntamente com a análise Cepstral, como uma ferramenta poderosa na identificação de falhas em câmbios automotivos. Os sinais dos câmbios são oriundos de medições externas feitas nos câmbios em bancadas de teste da FIAT Automóveis, localizada em Betim/MG. Na primeira parte deste trabalho tem-se os conceitos e formulações pertinentes à análise Cepstral e à TDA. Por fim, tem-se um exemplo prático mostrando as vantagens do uso da TDA na identificação de falhas.

**Palavras-chave:** Câmbios automotivos, Cepstrum, TDA, Manutenção preditiva

## 1. INTRODUÇÃO

Câmbios automotivos são sistemas mecânicos complexos constituídos por diferentes grupos de elementos conectados entre si (rolamentos, engrenagens e eixos). Estes sistemas, quando defeituosos, geralmente produzem níveis vibratórios e de ruídos maiores que o esperado. Embora inspeções visuais regulares e a manutenção preventiva possam ajudar na redução das falhas e defeitos nestes dispositivos, o custo e o tempo requerido para executar tais procedimentos os tornaram economicamente inviáveis. Assim, várias metodologias utilizando análise de sinais vibratórios estão sendo desenvolvidas para examinar as condições de sistemas de engrenagens (Nepomuceno, 1989).

Diferentes tipos de defeitos em câmbios automotivos são normalmente identificados utilizando como ferramenta a acuracidade auditiva de especialistas. Porém, este critério é bastante influenciado pelas características físicas e psicológicas de cada especialista, podendo levar a uma análise insatisfatória. Uma alternativa que vem sendo utilizada para tornar o processo mais criterioso é a utilização de técnicas de manutenção preditiva via sinais de vibração no monitoramento e controle de qualidade de câmbios automotivos e redutores (Brito, 1994) (Silva, 1997).

Segundo Randall (1982), com a análise espectral é possível detectar defeitos em redutores através da interpretação de mudanças no espectro de sinais vibratórios.

Mamede (1997) utilizou a Transformada de Wavelet na detecção de falhas em redutores, conseguindo através de sinais vibratórios, identificar a presença de defeitos nas engrenagens.

Choy et al. (1996) desenvolveu uma metodologia onde é mostrado que através da aplicação da distribuição de Wigner-Ville em um sinal de vibração temporal é possível obter algum sucesso no monitoramento do estado de saúde de sistemas de engrenagens.

A aplicação recente de ferramentas de análise no domínio tempo-frequência em redutores e câmbios tem trazido resultados satisfatórios na detecção de defeitos principalmente em pares de engrenagens.

Segundo McFaden (1994) a TDA (média no domínio do tempo) permite separar sinais de vibração de pares de engrenagens do sinal total de vibração do câmbio.

Veloso (1999) utilizou a análise Cepstral para detecção de falhas em motores de combustão interna porém, não obteve bons resultados.

Como uma forma de contribuição à análise de sistemas de engrenagens, este trabalho tem como objetivo mostrar como TDA pode ser útil na detecção de falhas e defeitos em câmbios automotivos. Aqui, a TDA será utilizada em combinação com a análise Cepstral e Espectral, mostrando a sua capacidade de eliminar ruídos de sinais vibratórios.

No que segue, apresenta-se uma breve introdução à TDA e a análise Cepstral. Em seguida será feita uma análise em um câmbio automotivo defeituoso afim de mostrar como a TDA pode ser útil na detecção de falhas em sistemas mecânicos complexos.

## 2. MÉDIA NO DOMÍNIO DO TEMPO – TDA

A Média no Domínio do Tempo - TDA é uma ferramenta poderosa de processamento de sinais, principalmente aqueles provenientes de sistemas mecânicos complexos, tais como os câmbios automotivos. Ela é bastante útil na eliminação de transientes em um sinal, ou seja, ruídos, sinais não periódicos, dentre outros. O seu uso promove uma filtragem do sinal, além de uma alta redução de dados, uma vez que somente uma parte do sinal é retido.

A TDA de um sinal consiste em fazer uma média de vários períodos básicos do mesmo, de forma a se obter um período médio. A TDA pode ser definida da seguinte forma:

$$y(iT) = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x(iT - rMT) \quad (1)$$

onde:  $y(iT)$ : média dos períodos do sinal - TDA;  
 $x(iT)$ : sinal amostrado no domínio do tempo;  
N : número de períodos utilizados para média;  
M : número de pontos por período;  
T : comprimento finito do sinal no tempo,

Na prática, para se utilizar a Média no Domínio do Tempo é necessário que os períodos do sinal estejam sincronizados a fim de que na execução da média não se atenuem componentes de frequência importantes do sinal.

## 3. CEPSTRUM

O Cepstrum é definido como o espectro do logaritmo do espectro. A análise Cepstral pode ser usada como uma ferramenta para detecção de periodicidade no espectro de frequências (família de harmônicos com espaçamento uniforme, sinais contendo ecos, entre outros). A escala logarítmica da amplitude enfatiza a estrutura harmônica da estrutura e reduz a influência de sinais aleatórios provenientes do caminho de medição (Randall & Tech, 1980).

O Cepstrum foi originalmente definido como o espectro de potência do logaritmo do espectro de potência de um sinal (Bogert et al., 1963), ou matematicamente:

$$c(\tau) = |\mathfrak{F}\{\log F_{xx}(f)\}|^2 \quad (2)$$

onde  $F_{xx}(f)$  é o espectro de potência do sinal no tempo  $[f_x(t)]$ ,  $\tau$  é a variável temporal do Cepstrum (quefrência) e  $\mathfrak{F}$  é o operador da Transformada de Fourier. Desta forma,

$$F_{xx}(f) = |\mathfrak{F}\{f_x(t)\}|^2 \quad (3)$$

Uma outra definição para o Cepstrum é dada pela transformada inversa do logaritmo do espectro de potência:

$$c(\tau) = \mathfrak{F}^{-1}\{\log F_{xx}(f)\} \quad (4)$$

Uma das razões para o uso da definição dada pela equação (4) é que torna mais fácil a comparação entre o Cepstrum e a função de autocorrelação, dada pela equação (5).

$$R_{xx}(\tau) = \mathfrak{F}^{-1}\{F_{xx}(f)\} \quad (5)$$

A variável independente  $\tau$  tem dimensão de tempo, mas é chamada de quefrência. Essa terminologia é mais usual na interpretação de sinais no tempo em termos do conteúdo de frequência. Assim, uma alta quefrência representa flutuações rápidas no espectro (espaçamento pequeno na frequência) e uma baixa quefrência representa mudanças lentas na frequência (espaçamento grande na frequência). Nos picos do Cepstrum resultantes de famílias de bandas laterais, a quefrência do pico representa o período da modulação e sua recíproca frequência moduladora. Convém ressaltar que a quefrência não diz nada a respeito da frequência absoluta, apenas sobre o espaçamento entre as frequências (Randall & Tech, 1980). Por exemplo, se no espectro de frequência aparecem picos nas frequências  $f_1, f_2, \dots, f_n$ , igualmente espaçados de uma frequência  $f_m$ , no Cepstrum aparecerá somente um pico na quefrência correspondente ao inverso da frequência  $f_m$ .

#### 4. UTILIZAÇÃO DA TDA NA ANÁLISE DE UM CÂMBIO DEFEITUOSO

Para se mostrar experimentalmente a utilização das ferramentas acima citadas, foram coletados sinais de aceleração de um câmbio sem defeito. Em seguida, substituiu-se o par de engrenagem da quinta marcha deste câmbio, antes fabricado para um modelo 1.0 litro, por um par fabricado para o modelo 1.6 litros. Após a introdução deste “defeito”, coletou-se os sinais em aceleração para o câmbio agora defeituoso uma vez que este não se encontra mais dentro dos padrões ótimos de operação de acordo com sua montadora.

Assim, será feita uma análise deste câmbio utilizando primeiramente a TDA aplicada ao espectro do sinal e em seguida uma combinação da TDA e Cepstrum a fim de caracterizar os defeitos oriundos do mal engrenamento ocasionado pela troca dos pares de engrenagens.

Os sinais dos câmbios foram coletados com o eixo primário girando com rotação constante e igual a 35.8 Hz para o câmbio bom e 43 Hz para o câmbio defeituoso. O par de engrenagens da quinta marcha montado no câmbio bom tem relação de transmissão do eixo primário para o secundário igual a 35/34 ao passo que para o câmbio defeituoso a relação é de 37/31. A partir destes dados, verifica-se que para o câmbio bom tem-se uma velocidade rotacional do eixo secundário de 36.8 Hz e uma frequência de malha de 1253 Hz. Já para o câmbio defeituoso, a velocidade rotacional do eixo secundário é igual a 51.3 Hz e a frequência fundamental de engrenamento é de 1591 Hz. Assim, espera-se que as ferramentas

citadas acima identifiquem com robustez os problemas (mal engrenamento) ocasionados pela mudança do par de engrenagem da quinta marcha.

Devido ao sigilo industrial, todos os resultados serão apresentados sem unidade de medida, ou seja, os valores mostrados são adimensionais.

Na Figura 1, tem-se o espectro da aceleração tanto para o câmbio bom quanto para o defeituoso – par de engrenagem da quinta marcha trocado. Observa-se que o nível de energia é muito superior para o câmbio defeituoso quando comparado com o câmbio bom, o que era esperado pois seu funcionamento não é mais padrão.

Pode-se verificar no espectro do câmbio defeituoso uma região de alta concentração de energia situada entre 1000 e 1700 Hz, sendo esta uma região de ressonância do sistema em estudo já que a frequência de engrenamento do câmbio defeituoso é de 1591 Hz. Porém, devido à presença de ruídos em grande quantidade, a análise e a identificação correta da possível fonte causadora de defeito são dificultadas, necessitando-se de uma melhor análise.

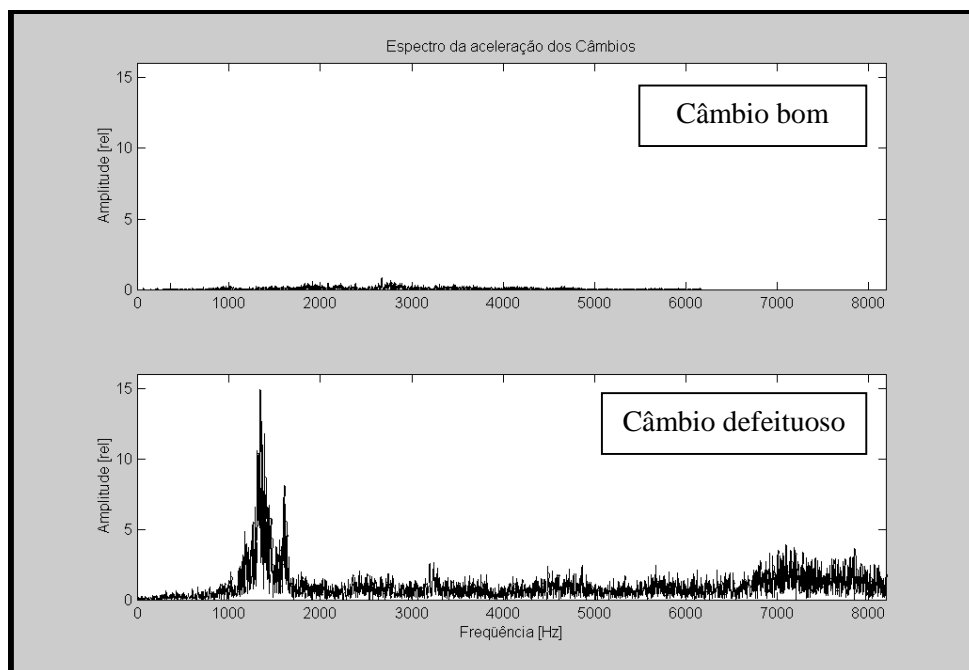


Figura 1. Espectro da aceleração para o câmbio bom e defeituoso sem o uso da TDA.

Já na Figura 2 abaixo, tem-se o espectro dos sinais tanto para o câmbio bom quanto para o defeituoso após fazer uso da TDA. Novamente observa-se uma maior concentração energética no espectro relativo ao câmbio defeituoso. Como era esperado, houve uma substancial redução de dados mostrando os sinais mais “limpos” e conseqüentemente com uma menor presença de ruídos sem que houvesse perdas das principais componentes do sinal em estudo, facilitando muito uma primeira análise dos resultados. Observa-se agora mais nitidamente que na figura anterior, a ocorrência do defeito provavelmente causado pelo mal engrenamento em 1591 Hz já que nessa frequência há uma elevação do nível de energia.

Viu-se até agora que houve uma elevação no nível de energia dentro da banda de frequência [1000 – 1700 Hz] para o sinal do câmbio defeituoso porém, não se tem precisamente a fonte causadora desse aumento de energia. Uma alternativa para se identificar esta fonte causadora de defeito é a utilização da análise Cepstral em conjunto com a TDA.

Primeiramente será feita uma análise do sistema sem a utilização da TDA. Uma vez que provavelmente o único defeito deste câmbio é o par de engrenagem trocado, espera-se que o Cepstrum detecte somente as frequências pertencentes a este par de engrenagem.

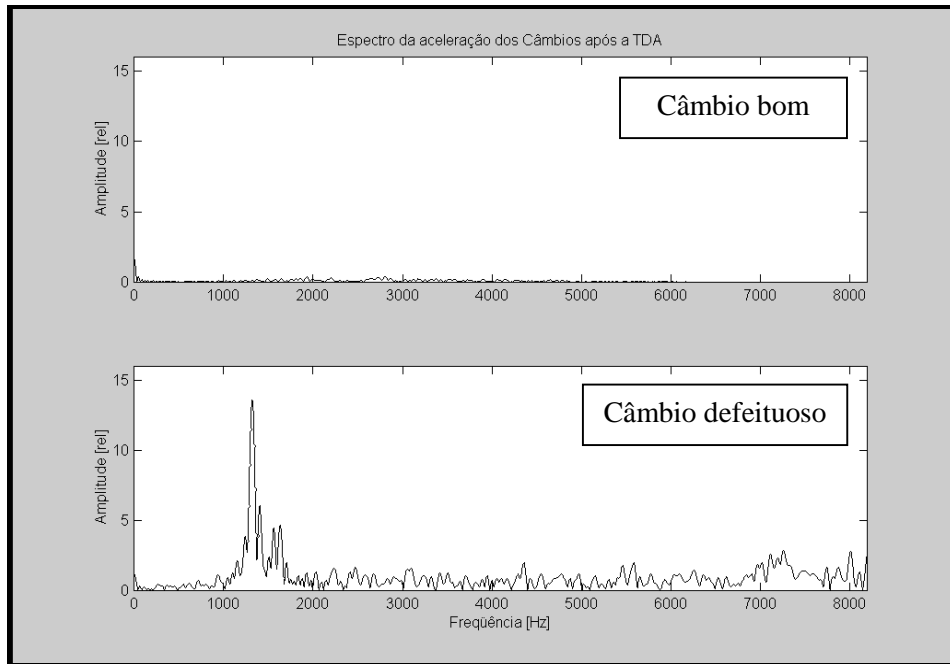


Figura 2. Espectro da aceleração para o câmbio bom e defeituoso após o uso da TDA.

Na Figura 3, tem-se a análise Cepstral sem a utilização da TDA tanto para o câmbio bom quanto para o defeituoso. Como pode ser observado, devido a presença excessiva de ruídos, a análise ficou totalmente comprometida, sendo muito difícil se ter uma análise precisa e identificar com clareza a origem do defeito, uma vez que o Cepstrum é muito sensível à presença de ruídos. Sendo aplicado desta forma, o Cepstrum não ajuda em nada na identificação de possíveis defeitos já que praticamente não há diferença entre o Cepstrum do câmbio bom e do câmbio defeituoso sendo então, praticamente impossível detectar as frequências pertencentes ao par de engrenagem trocado.

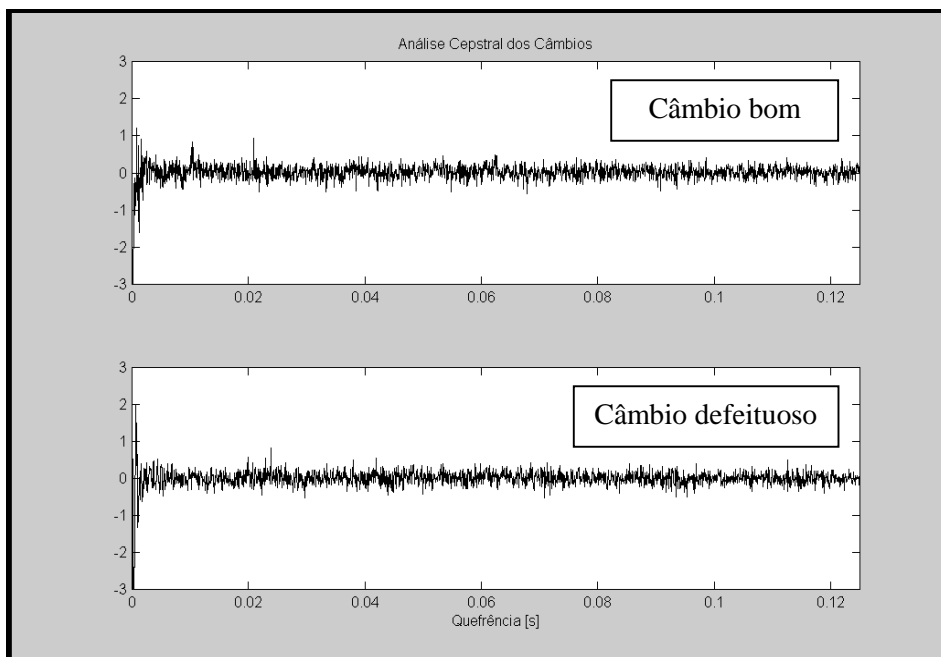


Figura 3. Análise Cepstral para o câmbio bom e defeituoso sem a utilização da TDA.

Já na Figura 4 abaixo, tem-se a análise Cepstral tanto para o câmbio bom como para o defeituoso após a aplicação da TDA nos sinais. Como pode ser observado, as quefrências estão bastante nítidas possibilitando a obtenção de resultados altamente confiáveis diferentemente da figura anterior onde não se podia fazer qualquer análise. O intervalo de repetição dos picos para o câmbio bom é de 35.8 Hz e para o defeituoso é igual a 43 Hz, valores estes equivalentes às velocidades rotacionais dos eixos primários dos câmbios.

De acordo com os resultados acima, observa-se que somente uma única componente do sinal, freqüência de rotação do eixo primário, é detectada pela análise Cepstral para ambos os câmbios mostrando desta forma, que os pares de engrenagens utilizados estão em “perfeitas” condições de uso já que nenhum outro tipo de defeito foi detectado. Isto mostra que a componente detectada pelo Cepstrum (43 Hz) proveniente do câmbio defeituoso é a fonte causadora do aumento de energia no sinal deste câmbio. Como esta componente está relacionada com a rotação do eixo primário deste câmbio “defeituoso”, pode-se concluir que o aumento no nível de energia é causado pelo mal engrenamento do par de engrenagem trocado.

Estes resultados mostram novamente a importância da utilização da TDA na identificação robusta de defeitos em sistemas mecânicos complexos tais como os câmbios automotivos e principalmente quando se utiliza sinais contendo ruídos em excesso, uma vez que sem a aplicação das TDA não seria possível verificar com precisão o mal engrenamento do par de engrenagem trocado.

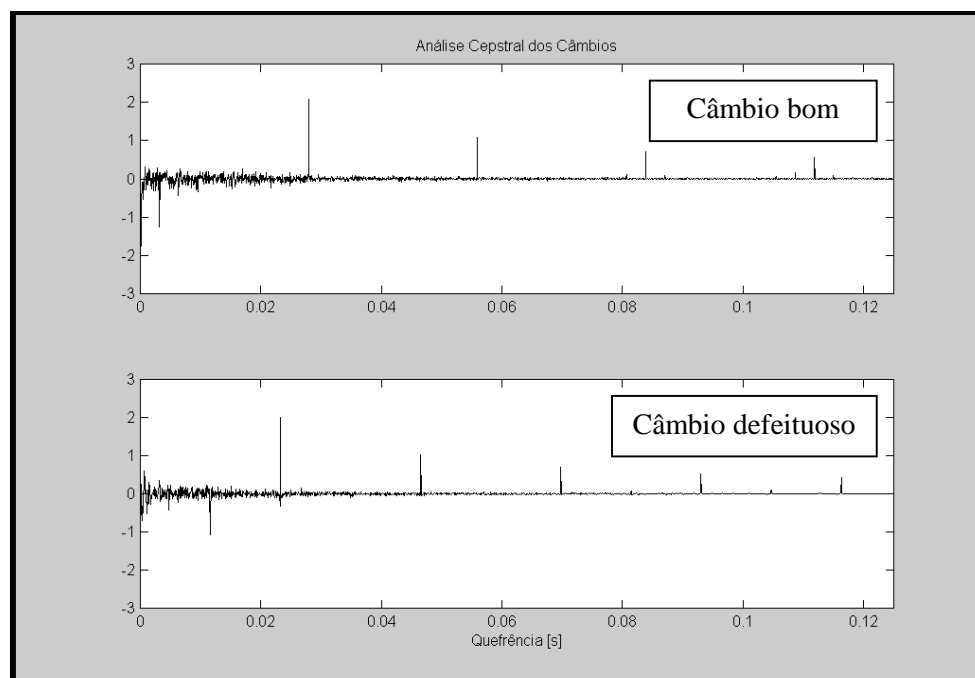


Figura 4. Análise Cepstral para o câmbio bom e defeituoso após utilização da TDA.

## 5. CONCLUSÕES

Foi demonstrado neste trabalho como a TDA pode ser utilizada, em conjunto com outras ferramentas de análise de sinais tais como o Cepstrum e a Análise Espectral, como uma ferramenta poderosa na identificação de falhas em câmbios automotivos mesmo quando estes ainda se encontram em suas linhas de montagem.

Introduziu-se nos câmbios automotivos analisados, defeitos cujas conseqüências eram previamente conhecidas de forma a se poder avaliar com precisão a robustez de algumas ferramentas geralmente utilizadas na manutenção preditiva de tais dispositivos.

Utilizada principalmente em conjunto com a análise Cepstral, que é uma ferramenta comumente utilizada na identificação de falhas em sistemas de engrenagens porém muito sensível à presença de ruídos, a TDA mostrou-se uma ferramenta de uso auxiliar bastante poderosa, uma vez que foi capaz de reduzir os dados e limitar a presença de ruídos nos sinais sem que houvesse perdas das principais componentes dos mesmos, fornecendo resultados altamente satisfatórios, diferentemente dos resultados obtidos quando feita a análise Cepstral sem o uso da TDA.

Esta característica da TDA de reconstituição do sinal sem grande presença de ruídos deve ser altamente ressaltada, uma vez que a grande maioria dos sinais adquiridos contém uma relação sinal/ruído pequena dificultando bastante suas análises. Deve-se portanto, tomar cuidado no uso da TDA pois ela pode eliminar componentes importantes do sinal.

Como trabalhos futuros, deve-se associar a TDA à outras ferramentas de identificação de falhas em câmbios automotivos como a Técnica do Envelope afim de avaliar a sua eficiência continuada.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fiat Automóveis S/A. por ter fornecido todo material necessário para a elaboração deste trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS

- Bogert, B. P., Healy, M. J. and Tukey, J. W., 1963, “The quefreny analysis of time series for echoes: cepstrum, pseudo-autocovariance, cross-cepstrum and saphe cracking”, in Times Series Analysis, M. Rosenblatt, Ed. New York: Wiley, Chap. 15, pp. 209-243.
- Braun, S., 1986, “Mechanical Signature Analysis: theory and applications”, Academic Press, London.
- Brito, J. N., 1994, “Estudo dos Efeitos dos Erros Geométricos e dos Defeitos Superficiais de Engrenamento no Comportamento Dinâmico de Redutores de Eixos Flexíveis”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- Choy, F. K., Polyshchuk, J. J. Z., Handschuh, R. F. and 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, P. L., 1974, “Applications of shock pulse technology and vibration analysis to rolling bearing condition monitoring”, Proc. 20<sup>th</sup> ISA Symposium., Albuquerque, New Mexico, pp. 231-238.
- Mamede, W. F., 1997, “Análise de Falhas em Redutores Utilizando Transformada de Wavelet”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- McFaden, P. D., 1994, “Window Functions for the Calculation of the Time Domain Averages of the Vibration of the Individual Planet Gears and Sun Gear in an Epicyclic Gearbox”, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 116, pp. 179-187.
- Nepomuceno, L. X., 1989, “Técnicas de Manutenção Preditiva”, Editora Edgard Blücher, Vol. 1, São Paulo, Brasil.
- Randall, R. B. and Tech, B. A., 1980, “Cepstrum Analysis and Gearbox Fault Diagnosis”, Brüel & Kjaer Application Notes, Naerum Offset, Denmark, pp. 1-20.
- Silva, L. E. L., 1997, “Relatório Técnico”, FIASA, Betim/MG, Brasil.
- Veloso, R. C., 1999, “Uma contribuição para o monitoramento de motores de combustão interna, através da análise de sinais de pressão sonora de vibrações”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.