

IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM ENGRENAGENS DE CÂMBIOS

Wilver B. Menegatti

Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica
Campus Santa Mônica, Bloco M, 38400-902, Uberlândia/MG

Marcus A. V. Duarte

Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica
Campus Santa Mônica, Bloco M, 38400-902, Uberlândia/MG

Resumo. *Estudos mostram que as Técnicas de Manutenção Preditiva têm trazido bons resultados quando utilizadas como ferramentas de monitoramento e controle de qualidade de sistemas mecânicos. Este trabalho estuda a correlação existente entre os sinais de vibração de câmbios bons e defeitos introduzidos em engrenagens, buscando-se, assim, desenvolver uma metodologia criteriosa de identificação e controle a fim de adequar as linhas de produção de câmbios às novas exigências de qualidade. A identificação dos defeitos é feita através de análise e comparação dos dados de câmbios via Técnicas de Análise de Assinaturas, destacando-se Análise Espectral e Cepstral. Dois tipos de defeitos são estudados separadamente: pinhão da segunda marcha e coroa do diferencial com falha de material localizada. Os sinais de aceleração dos câmbios foram coletados com rotação constante e sem carregamento. Os resultados obtidos mostraram-se bastantes satisfatórios.*

Palavras-chave: Câmbio, Engrenagens, Ruído, Transmissão, Vibração

1. INTRODUÇÃO

Nas linhas de montagem, o critério de aprovação de câmbios automotivos quanto aos níveis de ruído normalmente são baseados na acuracidade auditiva de técnicos. Este critério é bastante influenciável pelas características físico-emocionais de cada perito, sendo portanto, nem sempre confiável. A utilização de Técnicas de Manutenção Preditiva via sinais de vibração como alternativa no monitoramento e controle de qualidade de câmbios automotivos e redutores tem se mostrado uma importante ferramenta para tornar o processo de aprovação mais criterioso (Brito, 1994)(Mamede, 1997).

Segundo Gerges (1992), a qualidade do projeto e fabricação dos componentes mecânicos constituintes de câmbio é fundamental na geração de vibrações e ruídos. No tocante à engrenagens, quando são bem projetadas e acabadas, vibram menos do que engrenagens mal projetadas e mal fabricadas. Na prática, seria impossível conseguir um par de engrenagens perfeitas, o que ocasiona não uniformidade de transmissão de torque (isto é, variação da velocidade relativa entre um par de engrenagens) e esta não uniformidade está diretamente

relacionada com o ruído gerado.

Muitas técnicas de análise de sinais permitem a identificação de falhas em sistemas de engrenagens. Com a análise espectral é possível detectar defeitos em redutores através da interpretação de mudanças no espectro de sinais vibratórios. Segundo Randall (1982), muitas informações para diagnóstico podem ser obtidas nas mudanças ocorridas em sinais vibratórios medidos externamente em redutores operando continuamente sobre carregamento constante.

Já o Cepstrum pode ser considerado como uma ferramenta auxiliar de interpretação do espectro, principalmente em se tratando de famílias de bandas laterais, pois ele apresenta as informações de forma mais eficiente (Angelo, 1987).

O objetivo deste trabalho é identificar a presença de defeitos introduzidos em engrenagens de câmbios através da análise de sinais de aceleração. Para interpretar as mudanças nos sinais de vibração será utilizado as Técnicas de Manutenção Preditiva. Utilizar-se-á análises no domínio do tempo e da frequência, aplicando-se a Técnica da Média no Domínio do Tempo (TDA), Análise Espectral e Análise Cepstral. Os sinais dos câmbios serão oriundos de medições externas feitas nos câmbios em bancadas de teste da indústria automobilística. Os câmbios serão ensaiados com velocidade de rotação constante do eixo primário e sem carregamento.

2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS SINAIS DE VIBRAÇÃO DE CÂMBIOS

As principais frequências que surgem no espectro de um par de engrenagens são a frequência de rotação do pinhão, a frequência de rotação da coroa, além da frequência fundamental de engrenamento ou de malha, dada pelo produto entre o número de dentes da engrenagem e sua rotação.

A frequência de engrenamento é uma componente importante nos sinais de vibração de câmbios. Ela surge devido aos desvios no perfil do dente ideal. As duas fontes que causam desvios no perfil do dente são a sua deflexão proveniente do seu carregamento e erros geométricos gerados no próprio processo de fabricação da engrenagem (Randall, 1982). Essa componente vibratória propaga através de diversos meios, sendo transmitida através dos eixos e rolamentos para todo o câmbio, incluindo sua caixa (Brie et al, 1997). A “Fig. 1a” mostra um esquema do desvio no dente da engrenagem devido ao carregamento.

Quando uma engrenagem está em uso, seu perfil vai se desgastando gradualmente em torno do ponto de pitch, ou seja, há uma ação de escorregamento entre os dentes em ambos os lados da circunferência de pitch, exceto neste ponto específico. Tal situação é ilustrada na “Fig. 1b”.

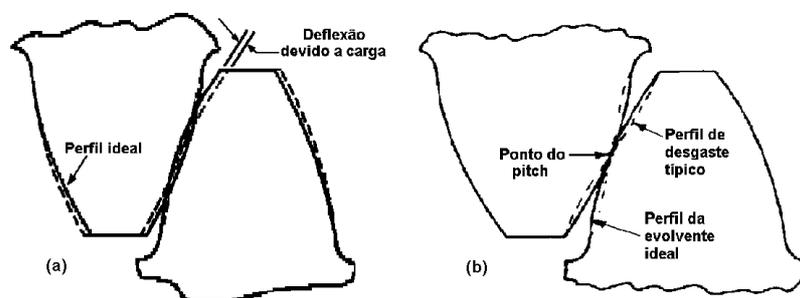


Figura 1 - Esquema mostrando a deflexão do dente da engrenagem sob carregamento(a) e o desgaste do dente em torno do ponto de pitch(b).

Além desses componentes de frequência, aparecem nos espectros sinais de vibração provenientes de estruturas periódicas. O tipo de estrutura periódica considerada é dada por

famílias de bandas laterais, normalmente encontradas em espectros de vibração de redutores, as quais frequentemente são uma indicação de diversos tipos de defeitos. Os espectros de redutores em boas condições de funcionamento normalmente contêm bandas laterais mas em um nível que permanece constante com o tempo. Mudanças no número e comprimento de bandas geralmente indicam deterioração no sistema (Randall and Tech, 1980).

O espaçamento entre as bandas laterais contém informações valiosas sobre a fonte de vibração do problema, geralmente tendendo a uma engrenagem em um redutor complexo. Entretanto, em muitos casos, existe a ocorrência de mais de uma família de bandas laterais em um mesmo espectro, sendo difícil a distinção delas. Neste caso, o cepstrum é muito útil na separação das várias periodicidades, sendo uma ferramenta a mais no diagnóstico de defeitos em redutores. Além disso, o cepstrum é uma técnica que compacta os dados, reduzindo as bandas de frequência em linhas, facilitando o problema de mudanças no monitoramento.

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O câmbio estudado é utilizado em um veículo comercial fabricado pela FIAT Automóveis. É o sistema de transmissão utilizado em um modelo de 1,0 litro de capacidade. Este câmbio é constituído principalmente por pares de engrenagens cilíndricas de dentes retos e helicoidais, além dos eixos primário e secundário, rolamentos e caixa externa. A “Fig. 2” mostra um desenho esquemático e uma foto do câmbio.

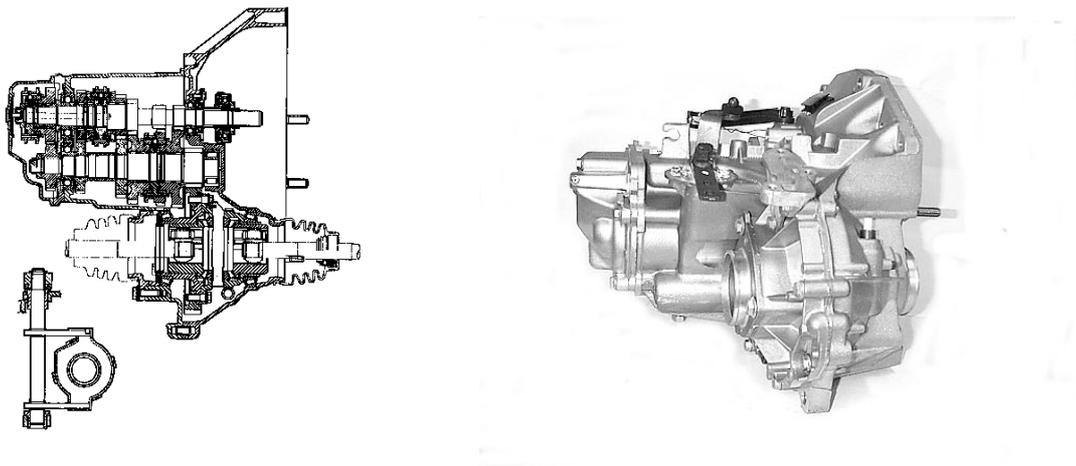


Figura 2 - Desenho esquemático e foto do câmbio automotivo estudado.

A instrumentação utilizada para obtenção dos dados era composta por um acelerômetro do tipo 4367 da Brüel & Kjær, um condicionador de sinal do tipo 2635 da Brüel & Kjær, além de uma placa analógica/digital A/D com dois canais (12 bits) ADC-100 da Pico Technology e um microcomputador Pentium 200 para aquisição dos dados.

O ponto de fixação do acelerômetro foi obtido através de análise de sensibilidade na própria indústria a fim de se determinar o melhor caminho de transmissão dos sinais de vibração.

Através de uma verificação de confiabilidade feita por Santana et al (1997), observou-se que os resultados de várias medições eram confiáveis, com alta repetibilidade. No ensaio de confiabilidade, coletou-se sinais de ruído e vibração para uma série de 10 experimentos para um mesmo câmbio, onde entre cada experimento, o dispositivo de fixação do acelerômetro e do microfone era retirado de sua posição e reinstalado para a realização de um novo ensaio.

Cada amostra de sinal era coletada com frequência de aquisição de 16384 Hz, durante dez segundos. Isso resultava em um número total de 163840 pontos por amostra. Para cada câmbio executou-se as seguintes etapas de medição dos sinais de aceleração:

- Coletou-se sinais de vibração de um câmbio bom com velocidade de rotação constante do eixo primário (regime permanente de velocidade). Todas as marchas foram amostradas;
- No câmbio ensaiado anteriormente, substituiu-se uma engrenagem perfeita por uma engrenagem com algum tipo de defeito ou deformidade. O câmbio tornou-se defeituoso, ou seja, com níveis de rumorosidade fora dos limites aceitáveis;
- Mediu-se sinais de vibração desse novo câmbio, agora defeituoso, com rotação constante. Seguiu-se os mesmos critérios usados para medição de sinais dos câmbios bons.

Apesar de se ter coletado amostras de todas as marchas para cada câmbio, somente será apresentado os resultados obtidos com as marchas que apresentaram maiores alterações nos sinais após a introdução dos defeitos.

Os câmbios foram ensaiados sem carga efetiva, ou seja, não foi aplicado nenhum tipo de carregamento durante o processo de teste dos câmbios. Quando os câmbios eram montados na bancada de teste, a única carga a qual ficavam submetidos era a inércia do eixo de acionamento do câmbio.

Na aquisição e tratamento dos sinais dos câmbios utilizou-se o programa “Cambio” desenvolvido no Laboratório de Vibrações. Para análise dos sinais, utilizou-se as ferramentas do programa Matlab, destacando-se algoritmo FFT e janelas tipo Hanning.

Foram introduzidos dois tipos de defeitos nos câmbios a fim de se identificar as principais modificações geradas nos sinais de aceleração. São eles:

- câmbio com golpe na segunda marcha: o pinhão da segunda marcha apresentava uma falha localizada em um dente, ou seja, tinha um defeito pontual;
- câmbio com golpe no diferencial: a coroa do diferencial apresentava uma falha localizada em um dente, ou seja, tinha um defeito pontual.

A metodologia utilizada para interpretação dos sinais de aceleração dos câmbios foi baseada em Análise de Assinaturas (Braun, 1986). Os sinais foram analisados no domínio do tempo e da frequência. Para tal, utilizou-se a Análise Espectral (espectro simples e 1/3 de oitava) e a Análise Cepstral.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Câmbio com golpe na segunda marcha

Como o defeito foi introduzido em uma engrenagem da segunda marcha, a análise dos sinais para esta apresentou maiores diferenças. Portanto, será mostrado os resultados obtidos com a análise dos sinais da segunda marcha dos câmbios.

Os sinais dos câmbios foram adquiridos com rotação constante do eixo primário e igual a 36 Hz para ambos os câmbios. Tendo em vista que a relação de transmissão da segunda marcha é de 21/47, a velocidade de rotação do eixo secundário dos câmbios é igual a 16 Hz. A frequência fundamental de malha para os câmbios vale 756 Hz.

Os sinais temporais de aceleração da segunda marcha dos câmbios estão na “Fig. 3”. A energia do sinal do câmbio ruim é maior do que a energia do câmbio bom. Quantitativamente, pela média quadrática dos sinais, tem-se que ela valem 17 para o câmbio bom e 25,4 para o defeituoso. Nota-se, ainda, a presença de pulsos transientes espaçados igualmente de

aproximadamente 0,0278 segundos nos dois sinais. Esse período de espaçamento equivale ao inverso da frequência de rotação dos eixos primários dos câmbios. Todavia, as amplitudes de vibração dos picos do sinal do câmbio defeituoso são na média maiores, variando de -100 a 100, enquanto que as do câmbio bom variam na média de -70 a 70.

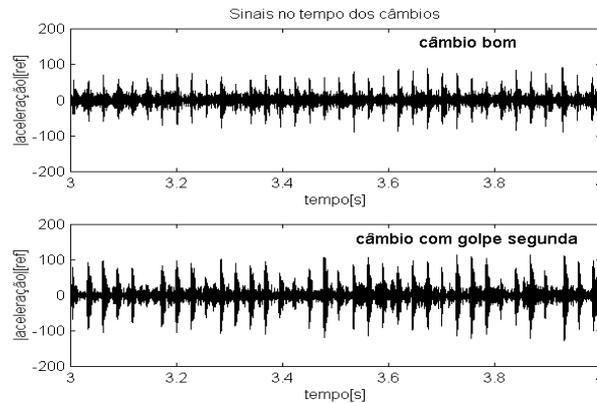


Figura 3 - Sinais no tempo da aceleração da segunda marcha dos câmbios.

Os espectros dos câmbios bom e defeituoso da segunda marcha são mostrados na “Fig. 4”. Comparando-se os dois espectros, observa-se que no espectro do câmbio ruim destacam-se vários picos, sendo que os dois de maior amplitude aparecem nas frequências de 1295 e 1332 Hz. Estas frequências correspondem aos 36° e 37° harmônicos da velocidade de rotação do eixo primário do câmbio defeituoso. Além disso, no espectro do câmbio defeituoso, a presença de bandas laterais de frequência é mais significativa do que no do câmbio bom. Tal resultado pode ser melhor visualizado nos espectros da “Fig. 5”.

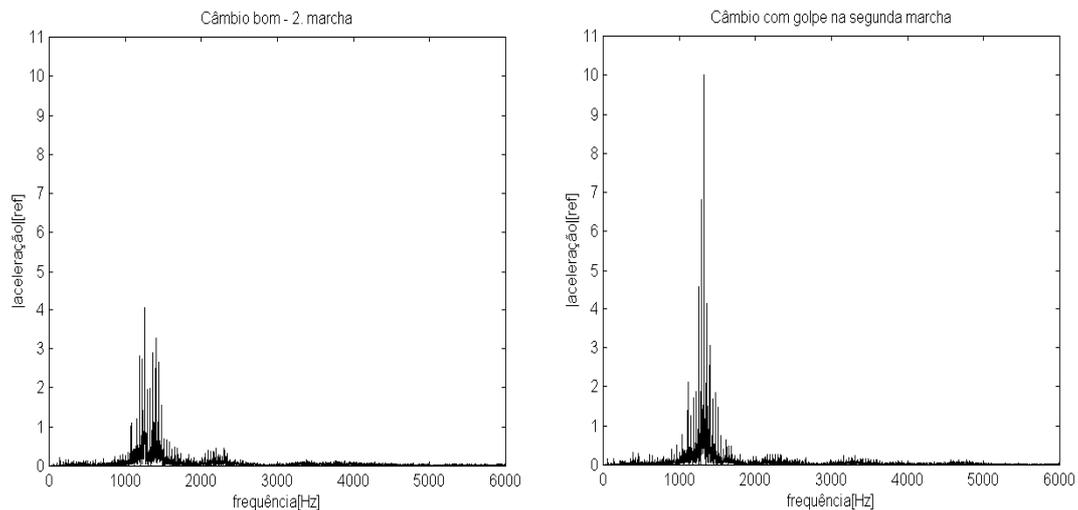


Figura 4 - Espectros de frequência da aceleração da segunda marcha dos câmbios.

Na “Fig. 5” estão os espectros dos câmbios para a região de 1000 a 1600 Hz. As bandas laterais de frequência com espaçamento igual à velocidade de rotação dos câmbios estão presentes em ambos os espectros. Nota-se que as amplitudes dos picos das bandas laterais de frequência no espectro do câmbio defeituoso são maiores do que as do câmbio aceitável. O

maior pico no espectro do câmbio ruim ocorre no 37° . harmônico da velocidade de rotação deste câmbio.

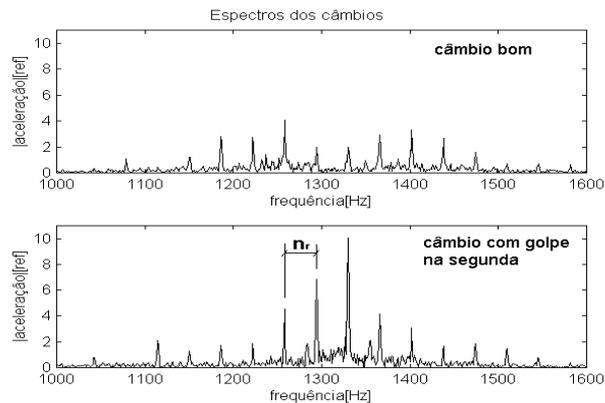


Figura 5 - Espectros de frequência da aceleração da segunda marcha dos câmbios mostrando a presença de bandas laterais de frequência.

Os espectros de 1/3 de oitava da aceleração da segunda marcha dos câmbios são mostrados na “Fig. 6”. Observa-se que nas regiões compreendidas entre 45-90 Hz e 350-1780 Hz, as amplitudes da aceleração do espectro do câmbio defeituoso estão acima das amplitudes do câmbio bom. O maior desnível de 7,5 dB ocorre na faixa de 56 a 68 Hz.

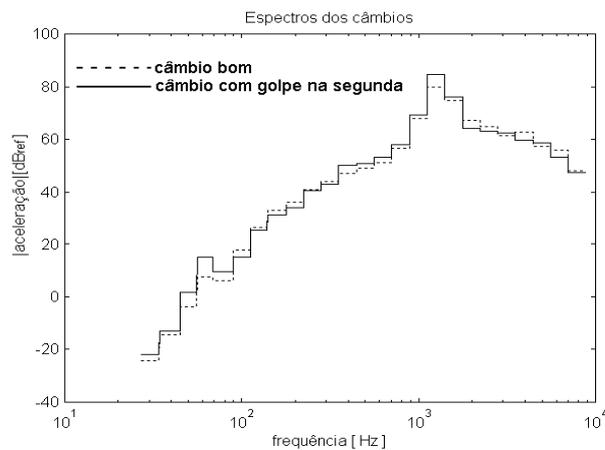


Figura 6 - Espectros de 1/3 oitava da aceleração da segunda marcha dos câmbios.

Já a “Fig. 7” mostra os cepstrums da aceleração da segunda marcha dos câmbios. Em ambos os cepstrums, destacam-se picos nas quefrências de 0,0278, 0,0556 e 0,0833 segundos, correspondendo ao inverso das velocidades de rotação dos eixos primários dos câmbios e de seus harmônicos. Nota-se ainda que no pico da quefrência de 0,0278 segundos para o câmbio com defeito ($1/n_r$), houve um aumento da ordem de 24% na amplitude quando se compara com o pico no cepstrum do câmbio com nível de rumorosidade aceitável.

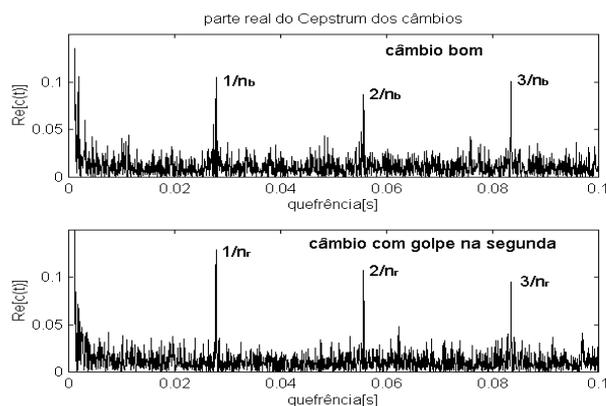


Figura 7 - Parte real do cepstrum da aceleração da segunda marcha dos câmbios.

4.2. Câmbio com golpe no diferencial

Após a análise dos sinais coletados de todas as marchas, constatou-se que a marcha que apresentou maiores e mais significativas diferenças foi a quinta. Sendo assim, apresentar-se-á os resultados obtidos com as análises dos sinais amostrados para quinta marcha.

Os sinais dos câmbios foram adquiridos com rotação constante e igual a 36,3 Hz para o câmbio sem defeito e 35,7 Hz para o câmbio defeituoso. Tendo em vista que para a quinta marcha, a relação de transmissão do eixo primário para o secundário é de 34/33, as velocidades rotacionais dos eixos secundários dos câmbios são, respectivamente, 37,4 para o câmbio bom e 36,8 para o defeituoso. A frequência fundamental de malha para o câmbio bom vale 1234 Hz e para o ruim 1214 Hz.

A “Fig. 8” mostra os gráficos da aceleração versus o tempo para os câmbios em quinta marcha. Também neste caso o nível de energia do sinal do câmbio defeituoso é bem maior do que o nível do câmbio sem defeito. As médias quadráticas dos sinais valem 17,6 para o câmbio bom e 35,6 para o defeituoso. Além disso, o sinal do câmbio ruim apresenta pulsos espaçados igualmente de 0,027 segundos (período). O inverso deste período corresponde à frequência de rotação do câmbio com golpe no diferencial.

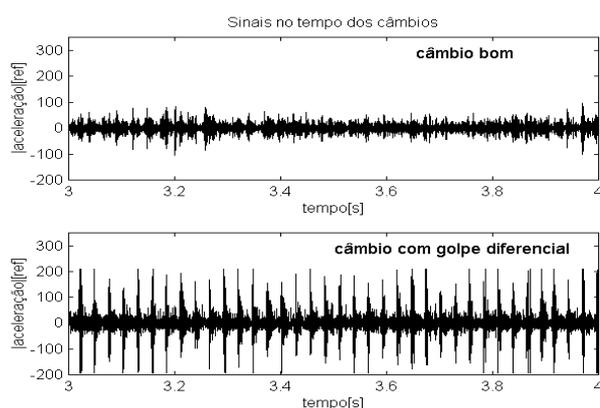


Figura 8 - Sinais no tempo da aceleração da quinta marcha dos câmbios.

Na “Fig. 9” estão os espectros dos sinais da aceleração da quinta marcha dos câmbios bom e ruim. Constata-se que o espectro do câmbio defeituoso apresenta alto nível de energia, além de vários picos em frequência quando comparado com o espectro do câmbio bom. Além disso, o espectro do câmbio ruim tem várias bandas de frequências significativas.

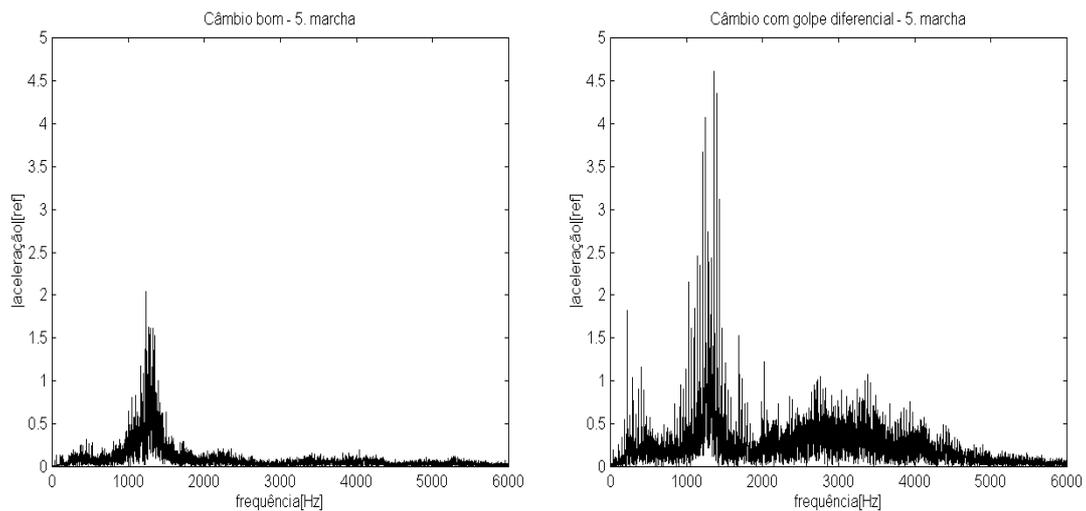


Figura 9 - Espectros de frequência da aceleração da quinta marcha dos câmbios.

Parte das bandas de frequência presentes no espectro do câmbio defeituoso podem ser melhor visualizadas na “Fig. 10”, onde estão os espectros da aceleração dos câmbios enfocando a região de 1000 a 1600 Hz. O espaçamento entre as bandas no espectro do câmbio ruim é o mesmo e vale 37 Hz, ou seja, é igual à velocidade de rotação do eixo primário do câmbio defeituoso. Tais famílias laterais de frequências não são visualizadas no espectro do câmbio bom.

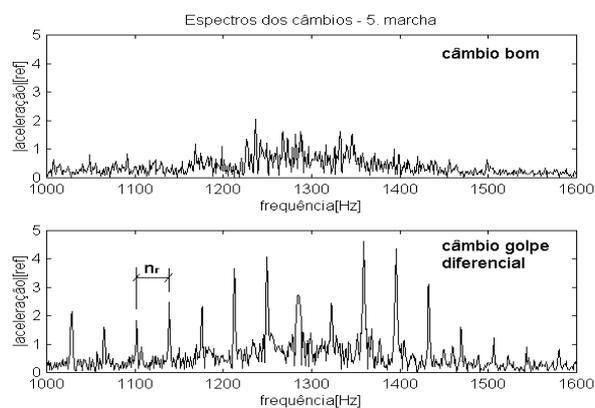


Figura 10 - Espectros de frequência da aceleração da quinta marcha dos câmbios mostrando a presença de bandas laterais de frequência.

Os espectros de 1/3 de oitava da aceleração da quinta marcha dos câmbios são mostrados na “Fig. 11”. Observa-se que em todas faixas de frequência as amplitudes da aceleração no espectro do câmbio defeituoso são maiores do que as amplitudes no espectro do câmbio aceitável. O maior desnível ocorre na faixa compreendida entre 2778 e 3493 Hz e vale 17,7 dB.

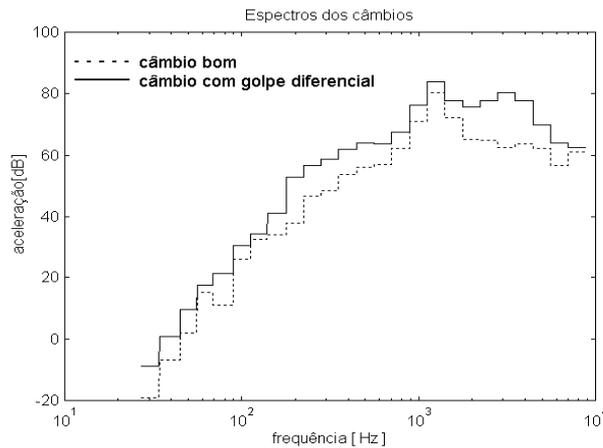


Figura 11 - Espectros de 1/3 oitava da aceleração da quinta marcha dos câmbios.

A “Fig. 12” mostra os cepstrums obtidos dos sinais da aceleração da quinta marcha dos câmbios. Constata-se que sobressaem três picos no cepstrum do câmbio defeituoso nas quefrências de 0,027 ($1/n_r$), 0,054 ($2/n_r$) e 0,081 ($3/n_r$) segundos. O inverso de tais quefrências correspondem respectivamente à velocidade de rotação do eixo primário do referido câmbio e dois de seus harmônicos. Novamente, essas quefrências estão relacionadas às bandas laterais de frequência presentes no espectro do câmbio com defeito. Já no cepstrum do câmbio bom não existe nenhum pico sobressalente, nem mesmo relacionado com a velocidade de rotação deste câmbio.

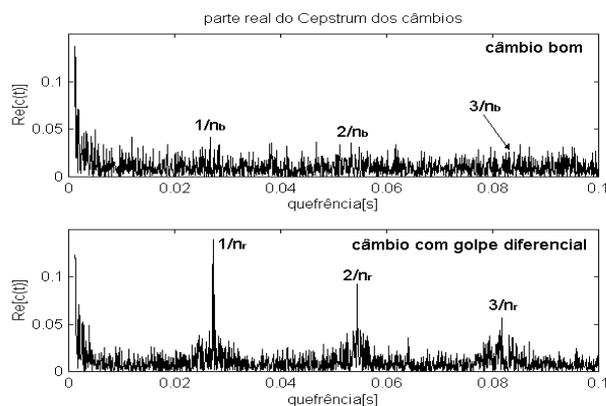


Figura 12 - Parte real do cepstrum da aceleração da quinta marcha dos câmbios.

5. CONCLUSÕES

Os câmbios automotivos são componentes de máquinas constituídos por vários elementos mecânicos que geram como consequência sinais de vibração bastante complexos. No geral, a análise destes sinais via Técnica de Assinaturas se mostrou eficiente no intuito de detectar a presença de defeitos introduzidos nos câmbios.

A análise dos sinais no domínio do tempo se mostrou muito eficaz na distinção entre câmbios bons e defeituosos, principalmente no que diz respeito à presença de pulsos periódicos nos sinais dos câmbios defeituosos.

A Análise Espectral é útil no intuito de diferenciar câmbios bons de câmbios defeituosos, principalmente quando se analisa as variações nos níveis de energia dos sinais e a presença de

bandas laterais de frequência nos espectros. Com os espectros de 1/3 de oitava torna-se mais fácil a visualização da presença de defeitos nos câmbios.

A Análise Cepstral também se mostrou uma ferramenta confiável na detecção de defeitos em câmbios, principalmente com o aparecimento de picos em quefrências relacionadas com as velocidades de rotação dos eixos primários dos câmbios defeituosos.

REFERÊNCIAS

- Angelo, M., 1987, "Vibration Monitoring of Machines", Brüer & Kjaer technical review, Naerum Offset, n. 1, Denmark.
- Braun, S., 1986, "Mechanical Signature Analysis: theory and applications", Academic Press, London.
- Brie, D., Tomczak, M., Oehlmann, H. and Richard, A., 1997, "Gear Crack Detection by Adaptive Amplitude and Phase Demodulation", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 11(1), pp. 149-167.
- 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.
- Gerges, S. N. Y., 1992, "Ruído: fundamentos e controle", Florianópolis, SC, Brasil.
- Mamede, W. F., 1997, "Análise De Falhas Em Redutores Utilizando Transformada de Wavelet", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- Randall, R. B., 1982, "A New Method of Modeling Gear Faults", ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 104, pp. 259-267.
- Randall, R. B. and Tech, B. A., 1980, "Cepstrum Analysis and Gearbox Fault Diagnosis", Brüel & Kjaer Application Notes, Naerum Offset, Denmark, pp. 1-20.
- Santana, D., Duarte, M. A. V., Ribeiro, C. R. and Cabacinha, A., 1998, "Um Procedimento Estatístico para Identificação de Rumor em Câmbios em Linhas de Montagem", Congresso SAE Brasil'98, São Paulo, Brasil.

GEARS FAULTS IDENTIFICATION IN GEARBOXES

Abstract. *Studies show that the Predictive Maintenance Techniques have brought good results when used as tools of monitoring and quality control of mechanical systems. This work study the existing correlation between the vibration signals of good and defective gearboxes, searching, thus, to develop a methodology of identification and control in order to adjust the gearboxes assembly lines to the new requirements of quality. The faults identification is made through analysis and matching of the gearboxes' data using Signatures Analysis Techniques, specifically Spectral Analysis and Cepstral Analysis. Faults were introduced in gearboxes. Two types of defects are studied separately: one located on second gear and other on differential gear, both related with material located damage. The gearboxes acceleration signals were collected with constant rotation and without load. The results had revealed sufficient satisfactory.*

Key Words: Gearbox, Gears, Noise, Transmission, Vibration