



UM SISTEMA DE DECISÃO FUZZY PARA CLASSIFICAÇÃO DE FALHAS EM CÂMBIOS USANDO SINAIS DE VIBRAÇÃO

Tobias Anderson Guimarães

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia
tobiasg@mecanica.ufu.br

José Luís Oliveira Pena

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia
jlopena@mecanica.ufu.br

Marcus Antonio Viana Duarte

Prof. Dr., Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia
mvduarte@mecanica.ufu.br

***Resumo.** Um dos problemas básicos no controle de qualidade de câmbios em linhas de montagem, é a interpretação dos sinais de vibração contendo informações sobre prováveis defeitos presentes nestes sistemas. Lógica Fuzzy, tradicionalmente utilizada na modelagem de sistemas de controle em engenharia tem sido no entanto, recentemente empregada em tarefas de classificação de falhas de sistemas complexos. Desta forma, o objetivo deste trabalho é estabelecer uma metodologia de classificação de falhas em câmbios usando Lógica Fuzzy como um sistema de decisão. As entradas neste sistema são a amplitude do Cepstrum de Potência e a duração no tempo das componentes transientes geradas pelo defeito usando a Transformada de Wavelet. A modelagem do sistema de decisão Fuzzy é inteiramente baseada na observação dos dados de entrada e experiência. Os resultados comprovam a viabilidade desta técnica como uma ferramenta de classificação, se os dados de entrada forem bem processados.*

***Palavras-chave:** câmbios, classificação, Lógica Fuzzy, vibrações.*

1. INTRODUÇÃO

Identificação de falhas em câmbios frequentemente implica na interpretação do sinal de vibração proveniente do processamento de alguma técnica conhecida. O número de ferramentas disponíveis para o processamento das vibrações de um câmbio é bastante amplo mas, a sua interpretação, requer conhecimento detalhado do comportamento vibratório e da técnica utilizada (Menegatti, 1999; Guimarães, 2000). Além disto, no caso de câmbios automotivos em linhas de montagem, existe a necessidade de se interpretar os resultados rapidamente para que a tomada de decisão esteja dentro dos tempos estabelecidos pela produção. Devido à isto, diversas técnicas de classificação de sinais tem sido propostas na literatura, com as Redes Neurais merecendo destaque em aplicações de reconhecimento de padrões (Staszewski et al., 1997).

Lógica Fuzzy, originalmente destinada a aplicações de controle em engenharia, pode também ser eficazmente empregada em tarefas de classificação e reconhecimento de padrões (Mendel, 1995; Vachtsevanos and Mufti, 1995; Goddu et al., 1998; Ovaska and Gao, 2001). Sua principal vantagem sobre as demais técnicas, é a utilização de variáveis lingüísticas relacionadas com o cotidiano da nossa linguagem natural (Mendel, 1995). À cada variável lingüística é associado um intervalo de valores aceitáveis e, para cada valor deste intervalo, existe um correspondente grau de certeza ou

pertinência com a variável lingüística. A construção das relações de pertinência Fuzzy e a definição da faixa de valores para cada variável são determinadas com base nos interesses e o conhecimento prévio que o projetista possui sobre o comportamento do sistema Fuzzy. Este conhecimento, por sua vez, pode ser obtido por experiência, intuição ou otimização de algum parâmetro do modelo Fuzzy.

O propósito deste trabalho é estabelecer uma metodologia de classificação de falhas em câmbios automotivos usando um sistema de decisão Fuzzy de sinais de vibração. As entradas do sistema de decisão Fuzzy são baseadas na amplitude do Cepstrum de Potência e as durações no tempo das componentes vibratórias provocadas por defeitos nas engrenagens do câmbio. A duração no tempo é extraída através do processamento dos sinais de vibração usando a técnica da Transformada de Wavelet. As regras IF-THEN relacionando as entradas com a saída, funções de pertinência e faixa de valores para cada variável lingüística são estabelecidos através de experiência e observação dos valores de entrada, calculados pelo processamento de sinais de vibração teórico simulando 2 tipos diferentes de defeitos: falha no dente e desalinhamento das engrenagens.

2. ARQUITETURA GERAL DO SISTEMA DE DECISÃO FUZZY

Na fig. (1) à seguir, mostra-se a arquitetura geral do sistema de decisão Fuzzy para classificação de falhas no câmbio. Uma vez simulados ou adquiridos os sinais de vibração medidos no câmbio no domínio do tempo em regime permanente, os mesmos são processados usando o Cepstrum de Potência e a Transformada de Wavelet. À partir dos sinais de vibração transformados para o domínio wavelet, será possível calcular as correspondentes duração no tempo, que serão as entradas no sistema Fuzzy de classificação. Usando estas entradas, o sistema é capaz de reconhecer a presença ou não de falhas usando a amplitude do Cepstrum de Potência e classificá-las de acordo com a duração no tempo. O pré processamento dos sinais de vibração e processamento destes no sistema de decisão Fuzzy é inteiramente realizado no programa Matlab[®] versão 5.0.

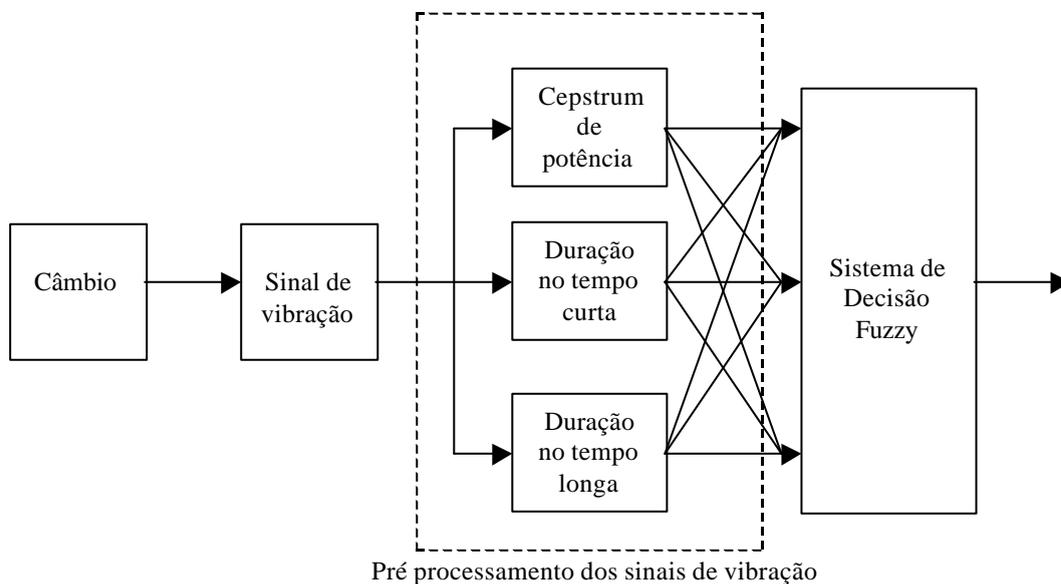


Figura 1. Arquitetura geral do sistema de classificação Fuzzy em câmbios.

3. PRÉ PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE VIBRAÇÃO

3.1. Cepstrum de Potência

Em vibração de engrenagens operando em regime permanente, qualquer desalinhamento dos eixos das engrenagens acopladas provocará uma variação da carga de contato entre os dentes. Se esta for pronunciada, o sinal resultante no domínio no tempo será do tipo modulado em amplitude.

Similarmente, qualquer defeito presente em um dente que resulte em uma diminuição da sua rigidez à flexão, produzirá um sinal do tipo pulso modulado em amplitude mas com um período de duração menor (Randall, 1982). No espectro de frequências, estes padrões vibratórios repetitivos aparecerão na forma de bandas laterais de baixa amplitude, porém, difíceis de serem identificadas, devido à presença de ruídos mascarando a sua presença (Randall, 1982).

Uma forma alternativa de se obter o período de repetição destas bandas laterais de modulação, consiste no uso do chamado Cepstrum de Potência definido como o espectro de frequências do logaritmo do espectro de frequências (Randall, 1982). Utilizando esta técnica, a escala de tempo no eixo horizontal (denominada de quefrência) representará o período de repetição destas bandas de modulação e, a escala vertical a sua magnitude, como mostrado na fig. (2). Intuitivamente, uma alta quefrência denota um espaçamento pronunciado entre as bandas laterais de modulação e, uma pequena quefrência uma flutuação rápida da periodicidade do padrão vibratório. Uma definição matemática do Cepstrum de Potência $c(\tau)$ segundo Braun (1986), é dada por:

$$c(\hat{\sigma}) = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \ln |S(f)|^2 \right\} \quad (1)$$

Onde τ representa tempo em s., \mathfrak{F} é o operador Transformada de Fourier e, $|S(f)|^2$ é o espectro de potência do sinal $S(f)$ no domínio da frequência f . No caso de vibrações geradas em engrenagens, a quefrência correspondente ao primeiro pico na amplitude representará o período de repetição do padrão vibratório provocado pelo defeito. Como este padrão é gerado a cada rotação da engrenagem naturalmente, é esperado que este valor de quefrência seja o período de rotação da engrenagem que possui o defeito (Randall, 1982). Quanto maior o valor da magnitude, maior é o valor da amplitude da componente de vibração gerado pelo defeito no domínio do tempo..

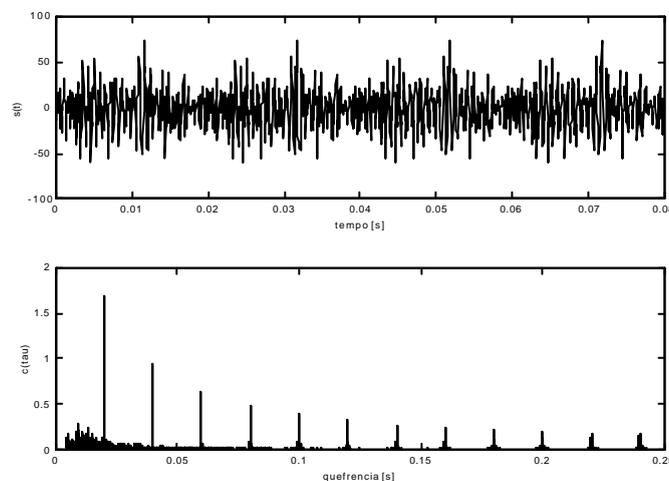


Figura 2. Sinal no domínio do tempo e Cepstrum de Potência mostrando periodicidade do padrão.

A magnitude do Cepstrum como uma das entradas do Sistema de decisão Fuzzy é o que verifica a existência de componentes no sinal provocadas por falhas nas engrenagens. Mesmo para um par de engrenagens com uma relação de transmissão próxima de 1(um) (períodos de rotação próximos) ainda é possível separar e identificar as quefrências ou períodos de rotação para cada uma destas engrenagens (Guimarães, 2000). Além disto, devido à escala logarítmica utilizada na definição da Eq. (1), dois padrões vibratórios idênticos mas com amplitudes diferentes acabam tendo magnitudes aproximadamente idênticas quando observados no Cepstrum. Ou seja, não é necessário recorrer à uma normalização da amplitude dos sinais de vibração, devido à insensibilidade do Cepstrum à uma variação da mesma ordem de grandeza da amplitude para o mesmo padrão vibratório.

3.2. Transformada de Wavelet

O conceito da Transformada de Wavelet (WT) pode ser compreendido de maneira análoga à definição da Transformada de Fourier. Na Transformada de Fourier (FT), o sinal é comparado com harmônicos em diferentes frequências: se a correlação entre o sinal e uma dada frequência é alta, pode-se dizer que esta componente tem contribuição significativa na formação do sinal. O mesmo raciocínio pode ser aplicado à WT mas, neste caso, o usuário escolhe o padrão de comparação que ele suspeita que esteja presente no sinal. Além disto, a largura de banda deste padrão de comparação chamada de wavelet mãe $\psi(t)$, é variada através da dilatação de $\psi(t)$. Formalmente, a Transformada de Wavelet Contínua CWT(t,r) de $s(t)$ é definida como (Heneghan et al., 1994):

$$\text{CWT}(t,r) = \frac{1}{\sqrt{|r|}} \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) \psi^* \left(\frac{\tau - t}{r} \right) d\tau \quad (2)$$

Onde r representa o fator de dilatação usada na dilatação $\psi(t)$, $*$ é o operador complexo conjugado e τ o tempo utilizado na convolução. Em aplicações de vibrações de engrenagens, é conveniente que $\psi(t)$ tenha um formato similar às componentes com modulação em amplitude geradas pelo defeito. Um wavelet apropriada para estes propósitos e que se assemelha aos padrões gerados pela falha, é a chamada wavelet Morlet que é, na realidade, um harmônico modulado por uma janela Gaussiana (Staszewski and Tomlinson, 1994). Figura 3, ilustra um sinal de vibração medido em um câmbio e o seu processamento com este tipo de wavelet.

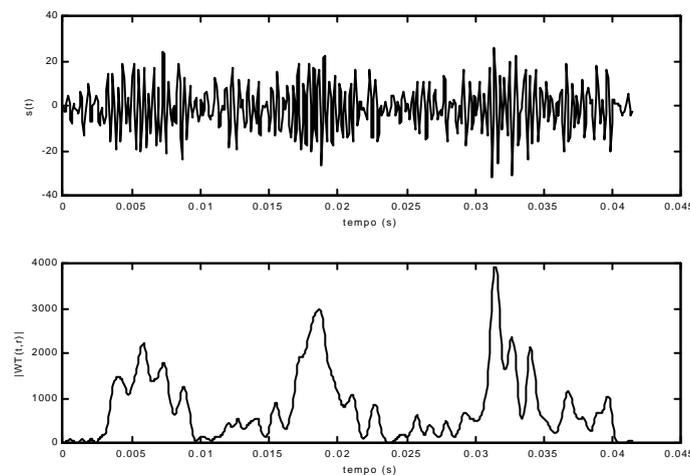


Figura 3. Sinal no domínio do tempo e sua representação no domínio wavelet.

Para a geração da envoltória do sinal no domínio wavelet mostrado na fig. (3)., foi adotado que a frequência central da largura de banda de $\psi(t)$ era igual à frequência de malha da engrenagem e, a duração no tempo de $\psi(t)$, aproximadamente igual ao seu período de rotação. Estes valores foram escolhidos porque a frequência predominante das vibrações de uma engrenagem é a sua frequência de malha e, a duração no tempo no caso de desalinhamento, é o seu período de rotação. Se o sinal da fig. (3) representasse as componentes provocadas por falha no dente, a frequência central de $\psi(t)$ seria um dos harmônicos da frequência de malha mas, a sua duração, tentaria reproduzir o período de engrenamento do dente. Neste trabalho, durante o processamento do sinais de vibração usando a WT, serão utilizadas duas larguras diferentes reproduzindo a duração no tempo devido à desalinhamento da engrenagem e falha no dente. Para desalinhamento do par de engrenagens, a frequência central de $\psi(t)$ será a frequência de malha das engrenagens de interesse mas, para falha no dente, a frequência central de $\psi(t)$ será o 2º harmônico da frequência de malha (Randall, 1982).

3.3. Duração no Tempo dos Sinais no Domínio Wavelet

Com os sinais transformados para o domínio wavelet, o próximo passo de processamento será a determinação da duração no tempo da forma da envoltória obtida. Uma medida comum usada para a duração no tempo de um sinal é o desvio padrão σ_t deste em torno do tempo médio. Intuitivamente, $2\sigma_t$ representa a dispersão do sinal no domínio wavelet, ou seja, se o sinal estiver concentrado em torno da média, σ_t será pequeno ou o sinal é de curta duração; se σ_t é relativamente grande então sua duração será longa. A envoltória do sinal do domínio wavelet, $|WT(r,t)|^2$, é uma medida da densidade de energia do sinal $s(t)$ por unidade de tempo. Estatisticamente, $|WT(r,t)|^2$ equivale à função densidade de probabilidade usada no cálculo de σ_t e definida pela equação (Cohen, 1995):

$$\sigma_t^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (t - \langle t \rangle)^2 |WT(t, r)|^2 dt \quad (3)$$

com $\langle t \rangle$ sendo o tempo médio em torno do qual ocorre a dispersão de $|WT(t,r)|^2$. Na forma discreta, $|WT(r,t)|^2$ serão os pesos a serem considerados no cálculo de σ_t . Como σ_t possui dimensão de tempo não será necessário normalizar o sinal de vibração antes do seu processamento via Transformada de Wavelet. Independente dos valores de amplitude de $|WT(t,r)|^2$, σ_t dependerá somente da forma de $|WT(t,r)|^2$ e não de sua magnitude. Para o cálculo de σ_t será considerada somente uma amostra de $|WT(t,r)|^2$ para um período de rotação completo pois, para os propósitos de classificação de falhas, o valor de $2\sigma_t$ não poderá ser superior ao período de rotação da engrenagem. Como uma das entradas do Sistema de classificação Fuzzy, $2\sigma_t$ será duas vezes a média dos desvios padrões para diferentes amostras considerando cada, uma rotação completa da engrenagem.

4. CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE DECISÃO FUZZY

4.1. Funções de Pertinência usadas no Sistema de Decisão Fuzzy

Tabela 1. Faixa de valores rotulados para cada entrada no Sistema de decisão Fuzzy.

Variável de entrada	Limite inferior	Limite superior	Rótulo
Amplitude do Cepstrum de Potência $c(\tau)$	0	0.1625	Baixa
	0.1625	0.2546	Baixa ou Média
	0.2546	0.3189	Média
	0.3189	0.4601	Média ou Alta
	0.4601	1.8	Alta
Duração no tempo para falha no dente	0.0005s	0.005s	Estreito
	0.005s	0.008s	Estreito ou Largo
	0.008s	0.01357s	Largo
Duração no tempo para Desalinhamento do eixo	0.0005s	0.005s	Estreito
	0.005s	0.007s	Estreito ou Largo
	0.007	0.009	Largo
	0.009	0.011	Largo ou Muito largo
	0.011	0.01357	Muito largo

Tabela 1 mostra cada faixa de valores adotada para cada variável de entrada bem como, o rótulo utilizado na caracterização de cada intervalo. Os limites inferior e superior de cada faixa, foram estipulados com base na observação do comportamento das variáveis de entrada, processados para diferentes sinais de vibração. Obviamente, estes sinais foram gerados simulando as vibrações de um câmbio sem defeitos, com um defeito em um dente da engrenagem e com um desalinhamento entre

os eixos. Para a geração dos sinais teóricos, inicialmente foi considerado que havia um defeito em um dos dentes na engrenagem de 34 dentes operando à 73.69Hz acoplada com uma engrenagem de 35 dentes trabalhando à 71.58 Hz. Depois disto, os sinais foram gerados para um desalinhamento proposital nos eixos da engrenagens isentas de quaisquer defeitos em um de seus dentes.

A forma das funções de pertinência adotadas para o Sistema de decisão Fuzzy estão mostradas na fig. (4). Nas interseções entre os intervalos das faixas definidas na Tab. (1), o grau de incerteza dos valores dentro destes intervalos assume valores entre 0 e 1 mas, para os intervalos situados fora das interseções, o grau de pertinência de qualquer valor é sempre igual à 1 (um), como ilustrado na fig. (4). A razão disto é que, não pode existir incertezas para os valores definidos para as faixas rotuladas fora das interseções, pois o Sistema Fuzzy deve efetuar uma tomada de decisão baseada nos valores da entrada e nas regras de inferência (Goddu et al., 1998). De fato, a única incerteza que pode existir, é com relação aos limites inferiores e superiores de cada faixa da Tab. (1) pois, nada garante que estes valores irão minimizar o erro cometido na tomada de decisão.

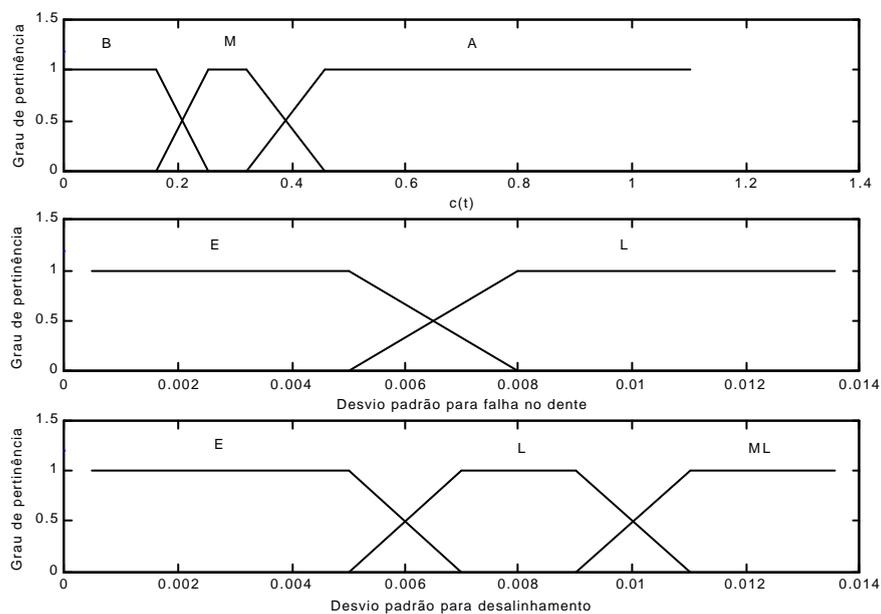


Figura 4. Funções de Pertinência adotadas para as entradas.

4.2. Regras IF-THEN Fuzzy do Sistema de Decisão

Tabela 2 mostra as regras IF-THEN adotadas para o Sistema de decisão Fuzzy. A formulação destas regras foi estabelecida com base na experiência e observação dos valores da variáveis de entrada no Sistema de decisão. Quando a amplitude do Cepstrum é baixa, não se verifica a presença de defeitos nas engrenagens analisadas mas, caso contrário, o sistema classificará o tipo de defeito de acordo com a duração no tempo do sinal no domínio wavelet. É interessante observar a distinção entre os tipos de desalinhamentos que podem estar presentes no câmbio, severo e muito severo, dependendo da combinação dos valores das variáveis de entrada. Adicionalmente, quando a duração no tempo para falha no dente for larga, é mais provável que esta seja proveniente de desalinhamento dos eixos e que se ajustará melhor à wavelet de duração no tempo larga. Infelizmente, este sistema não possui sensibilidade suficiente para a classificação de falhas incipientes pois, a baixa energia destas componentes seria provavelmente mascarada por ruídos presentes em sinais experimentais.

Tabela 2. Regras IF-THEN usadas pelo Sistema de decisão Fuzzy.

IF			THEN	
$c(\tau)$	σ_t falha no dente	σ_t desalinhamento	Falha no dente	Desalinhamento
Baixa	-	-	Não	Não possui
Média	Estreito	-	Sim	-
Média ou Alta	Estreito	-	Sim	-
Alta	Estreito	-	Sim	-
Média/Alta	Largo	-	Não	-
Média/Alta	-	Estreito	-	Não possui
Média	-	Largo	-	Severo
Média	-	Muito Largo	-	Muito Severo
Alto	-	Largo	-	Muito Severo
Alto	-	Muito Largo	-	Muito Severo

5. RESULTADOS OBTIDOS

O Sistema de Decisão Fuzzy descrito anteriormente foi testado para alguns sinais simulando o comportamento de prováveis padrões transientes que podem ser gerados para estes tipos de defeitos, falha no dente e desalinhamento. Em todos os casos analisados teoricamente, o sistema de decisão conseguiu identificar a presença ou não de defeitos e classificá-lo corretamente. O Sistema também foi testado com sucesso para 3 sinais experimentais medidos em um câmbio sem defeitos, com falha no dente da engrenagem e com desalinhamento. Não há problemas com relação as diferenças significativas entre as amplitudes dos sinais simulados e experimentais pois foi citado anteriormente que tanto $c(\tau)$, como σ_t dependem somente da geometria dos padrões presentes no sinal e não de sua magnitude relativa. No entanto, não se pode até o momento, fazer uma avaliação precisa do grau de acuracidade e precisão que esta metodologia possui quando aplicada em sinais experimentais, já que, uma quantidade maior de dados envolvendo situações diferentes precisaria ser avaliada.

6. CONCLUSÕES

Um Sistema de decisão Fuzzy foi elaborado para classificar falhas em engrenagens, com base na amplitude do Cepstrum de Potência e duração no tempo dos sinais de vibração. Este sistema foi capaz de classificar falhas severas do tipo defeito no dente da engrenagem e desalinhamento mas, não possui sensibilidade suficiente na classificação de falhas incipientes. O pré processamento das entradas e processamento destas no Sistema de decisão pode ser considerado relativamente curto, que é uma vantagem sob o ponto de vista de aplicações em controle de qualidade de câmbios em linhas de montagem.

Para a classificação de outros tipos de defeitos, como por exemplo, espaçamento irregular entre os dentes que provocaria uma modulação em frequência, outras técnicas de pré processamento e regras IF-THEN Fuzzy teriam de ser consideradas. A construção do Sistema de decisão Fuzzy com base na experiência e observação dos dados de entrada, mostrou ser um procedimento viável para a modelagem deste Sistema mas, que pode ser melhorado. Por isto, diversas técnicas de otimização inteligente como os Algoritmos Genéticos, poderiam ser utilizados para otimização de algum parâmetro, como as regras IF-THEN ou faixa de valores das variáveis de entrada, e que levaria à minimização do erro durante a tomada de decisão.

7. REFERÊNCIAS

Braun, S., 1986, "Mechanical Signature Analysis – Theory and Applications", Ed. Academic Press, London.

- Cohen, L., 1995, "Time-Frequency Analysis", Ed. Englewood Cliffs, Prentice Hall.
- Gao, X. Z. and Ovaska, S. J., 2001, "Soft Computing Methods in Motor Fault Diagnosis", Applied Soft Computing, Ed. Elsevier, Vol. 1, pp. 73 – 81.
- Goddu, G.; Li, B.; Chow, Mo-Yuen and Hung, J., 1998, "Motor Bearing Diagnosis by a Fundamental Frequency Amplitude Based Fuzzy Decision System", Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, August – September, Aachen Germany, pp. 1961 – 1965.
- Guimarães, T. A., 2000, "Análise Tempo-Frequência de Sinais de Vibração Aplicada à Detecção de Falhas em Caixas de Câmbio", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.
- Heneghan, C.; Khanna, S. M.; Flock, A.; Ulfendahl, M.; Brundin, L. and Teich, M. C., 1994, "Investigating the Nonlinear Dynamics of Cellular Motion in the Inner Ear Using the Short Time Fourier and Continuous Wavelet Transform" IEEE Transactions on Signal Processing, n^o 12, Vol. 42, pp. 3335 – 3351.
- Mendel, J. M., 1995, "Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial", Proceedings of the IEEE, Vol. 83, n^o 3, pp. 345 - 377
- Menegatti, W. B., 1999, "Identificação de Falhas em Caixas de Câmbio via Sinais de Ruído e Vibração", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.
- Randall, R. B., 1982, "A New Method of Modeling Gear Faults", ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 104, pp. 259 – 267.
- Staszewski, W. J. and Tomlinson, G. R., 1994, "Application of the Wavelet Transform to Fault Detection in a Spur Gear", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 8, pp. 289 – 307.
- Staszewski, W. J; Worden, K. and Tomlinson G. R., 1997, "Time-Frequency Analysis in Gearbox Fault Detection Using the Wigner-Ville Distribution and Pattern Recognition", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 11, pp. 673 – 692.
- Vachtsevanos, G. and Mufti, M., "Automated Fault Detection and Identification Using a Fuzzy-Wavelet Analysis Technique", IEEE Proceedings of 8th International Congress on Intelligence Artificial, pp. 169 – 175.

A FUZZY DECISION SYSTEM FOR GEAR FAULTS CLASSIFICATION USING VIBRATION SIGNALS

Tobias Anderson Guimarães

Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia
tobiasg@mecanica.ufu.br

José Luís Oliveira Pena

Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia
jlopena@mecanica.ufu.br

Marcus Antonio Viana Duarte

Prof. Dr., Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia
mvduarte@mecanica.ufu.br

***Abstract.** A basic problem in the gearbox quality control is to extract features of the vibration signals about possible faults in these systems. Fuzzy Logic, traditionally used in control applications in engineering, it may be used also for fault classification in complex systems. Therefore, the purpose of this work, is establish a fault classification methodology in gearboxes by using Fuzzy Logic as a decision system. The inputs of this system are the magnitude from Power Cepstrum and time duration of the transient components generated by the fault using the Wavelet*

Transform. The Fuzzy decision system modeling is based on the input data observation and the experience. The results proved the utility of this technique as a classification tool, if the input data were well-processed.

Keywords: *classification, Fuzzy Logic, gearbox, vibration.*