

UTILIZAÇÃO DE REDES NEURAIS NA IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE EXPLOSÃO.

Mechelangelo Viana Mancuzo (*mmancuzo@mecanica.ufu.br*)

Carlos Roberto Ribeiro (*cribeiro@mecanica.ufu.br*)

Marcus Antônio Viana Duarte (*mvduarte@mecanica.ufu.br*)

Universidade Federal de Uberlândia

Departamento de Engenharia Mecânica

CEP 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil

Resumo. *Neste artigo é apresentada uma metodologia para o diagnóstico automático de algumas falhas de funcionamento de motores de explosão, avaliadas a partir dos níveis de rumorosidade de batida de válvula(s), tensores das correias sincronizadora e do alternador. Estas são as falhas mais frequentemente encontradas nos motores na linha de montagem e são o foco deste trabalho. Utilizando-se da amplitude do espectro do envelope em frequências características, podem ser obtidos padrões que são associados aos defeitos acima citados. De posse de um conjunto de tais padrões, uma rede neural probabilística (PNN) é treinada com o objetivo de automatizar a identificação de falhas e estabelecer um critério objetivo para o procedimento de controle da qualidade de funcionamento dos motores de explosão.*

Palavras-chave: Diagnóstico automático de falhas, Redes Neurais, Motor a explosão

1. INTRODUÇÃO

No setor automobilístico, o aperfeiçoamento do produto é fortemente dependente da qualidade do funcionamento do conjunto propulsor dos veículos. Mesmo que o conjunto apresente desempenho satisfatório no item potência, um item que influi de forma decisiva na avaliação da sua qualidade é o nível de ruído sonoro por ele emitido. Dadas as características de subjetividade inerentes ao julgamento humano, na avaliação das condições de funcionamento dos motores durante a fabricação, propõe-se neste trabalho a implementação de uma ferramenta matemático-computacional de identificação automática de falhas em motores de explosão. Utilizando-se da amplitude do espectro do envelope em frequências características, foram definidos determinados padrões que são associados aos defeitos mais frequentemente encontrados durante os testes na linha de montagem. Um conjunto destes padrões associados aos defeitos foi então apresentado a uma rede neural objetivando seu treinamento e sua validação. A rede neural foi treinada com o intuito de se automatizar a identificação de falhas, estabelecendo assim, um critério objetivo para o procedimento de controle da qualidade dos motores.

Para reconhecer automaticamente os padrões associados às falhas, foi escolhida a rede neural probabilística(PNN). Dentre as características deste tipo de rede, que a habilitam para a tarefa proposta, podemos citar: a confiabilidade do modelo estatístico no qual ela é embasada, a facilidade de adição ou remoção de padrões no conjunto de dados de treinamento e validação, e o reduzido tempo computacional despendido para o seu treinamento(Master,1995).

2. IDENTIFICAÇÃO MODAL DO MOTOR

Com o objetivo de identificar as bandas de frequência de interesse na caracterização das falhas dos motores, fez-se necessário o conhecimento da função de resposta em frequência(FRF) entre cada mecanismo gerador de sinal de defeito e o ponto de medição do sinal de vibração. Os mecanismos geradores de sinal de defeito considerados neste trabalho são três:

- Rolamento do tensor da correia do alternador.
- Eixo comando de válvulas.
- Rolamento do tensor da correia sincronizadora.

O sensor do sinal de vibração(accelerômetro) foi posicionado sobre a tampa da caixa do eixo comando de válvulas devido a dois fatores primordiais: a preocupação em facilitar a fixação do sensor durante os testes na linha de montagem e o fato de a tampa da caixa do eixo comando de válvulas funcionar como um mecanismo amplificador do sinal de vibração. Na Fig. 1 podem ser vistos: polia do eixo comando de válvulas(a), tensor da correia do alternador(b) e acelerômetro(c).

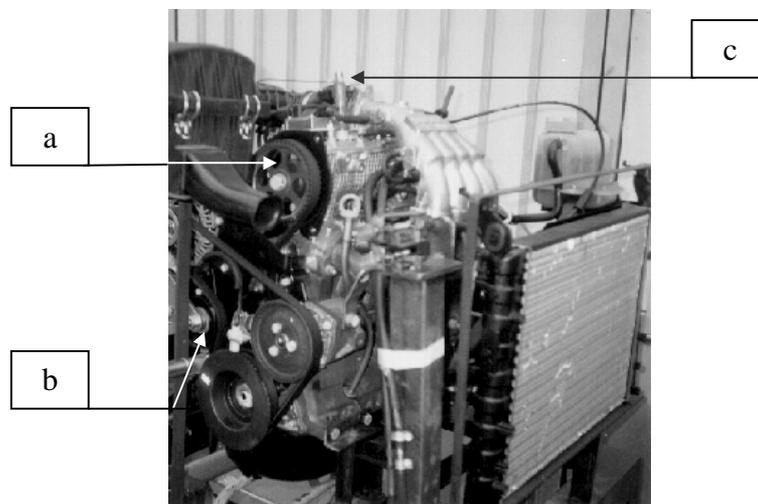


Figura 1 – Vista frontal do motor.

Na Fig. 2, tendo sido desmontado o tensor da correia do alternador, pode ser visto o tensor da correia sincronizadora(d), que é o terceiro mecanismo gerador de sinal de defeito considerado neste trabalho.

Os motores testados são da marca Fiat, 1500 cc - mpi, quatro tempos, de fabricação nacional. O sistema de aquisição do sinal usado para obter as estimativas de cada FRF constituiu-se de:

- 01 acelerômetro uniaxial, Bruel & Kjaer, sensibilidade = 1.94 pC/ms^{-2} .
- 01 martelo de impacto, Bruel & Kjaer, com sensibilidade da célula de carga = 1.03 pC/N .
- 01 conversor A/D de 12 bites.

- 01 micro computador equipado com programa de interface para o conversor A/D.
- Programa para cálculo do estimador das FRFs.

As estimativas das funções de resposta em frequência de interesse foram obtidas através do estimador H1 (Bendat, 1986), dado que este é o estimador ótimo, mesmo admitindo-se a presença de ruído correlacionado com o sinal de saída.

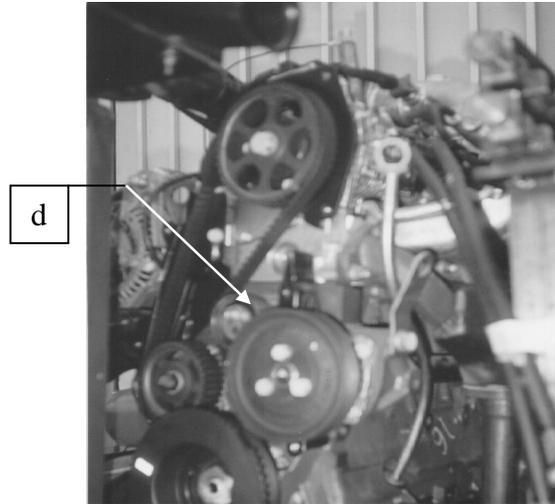


Figura 2- Vista frontal do motor com tensor da correia do alternador desmontado.

2.1 As funções de resposta em frequência de interesse.

Observando-se a FRF da Fig. 3-a, conjuntamente com suas partes, real Fig. 3-b, imaginária Fig. 3-c, e com a função de coerência associada Fig. 3-d, foram localizadas bandas de frequência nas quais ocorre maior amplificação da energia de vibração gerada no rolamento do tensor da correia do alternador e que é mensurada na tampa da caixa do eixo comando de válvulas. As frequências centrais destas bandas são as frequências naturais da estrutura analisada. Em tais frequências, o gráfico da parte real passa por zero, o da parte imaginária apresenta máximos ou mínimos, e a função de coerência apresenta valores próximos da unidade.

Construindo-se gráficos como os da Fig. 3, para os outros dois mecanismos geradores de defeito considerados neste trabalho, foi elaborada a Tabela 1. Na segunda coluna desta tabela, estão indicadas as bandas de frequência nas quais se verifica a amplificação do sinal de vibração que se propaga entre cada mecanismo gerador de sinal de defeito (primeira coluna da tabela) e o ponto de medição da resposta (para todos mecanismos, a resposta foi medida sobre a tampa da caixa do eixo comando de válvulas, Fig. 1-c)

De posse das bandas de frequência onde existe maior probabilidade de se encontrar energia provenientes de defeitos nos mecanismos considerados, foram feitos os testes dinâmicos dos motores. Antes de cada aquisição de sinal, os motores testados foram colocados em funcionamento à uma rotação constante de 3100 rpm, sujeitos entretanto, a pequenas oscilações em torno deste valor, devido às características de funcionamento inerentes a um motor de explosão operando sem carga. Quando o motor está frio tais oscilações são mais acentuadas, por isso, aguardou-se que o eletroventilador de arrefecimento ligasse e desligasse por uma vez antes de iniciar a aquisição dos dados.

Tabela 1 – Bandas de frequência onde ocorre a amplificação do sinal de defeito.

Mecanismo no qual é feita a excitação.	Bandas de Frequência, em [Hz], nas quais se verifica a amplificação do sinal de vibração.
Tensor da correia do alternador	[480,520],[780,820], [1180,1220] [1430, 1460], [2080, 2120]
Eixo Comando de Válvulas	[1250,2750]
Tensor da correia sincronizadora	[700,1100], [1800,2200] [2600, 2850]

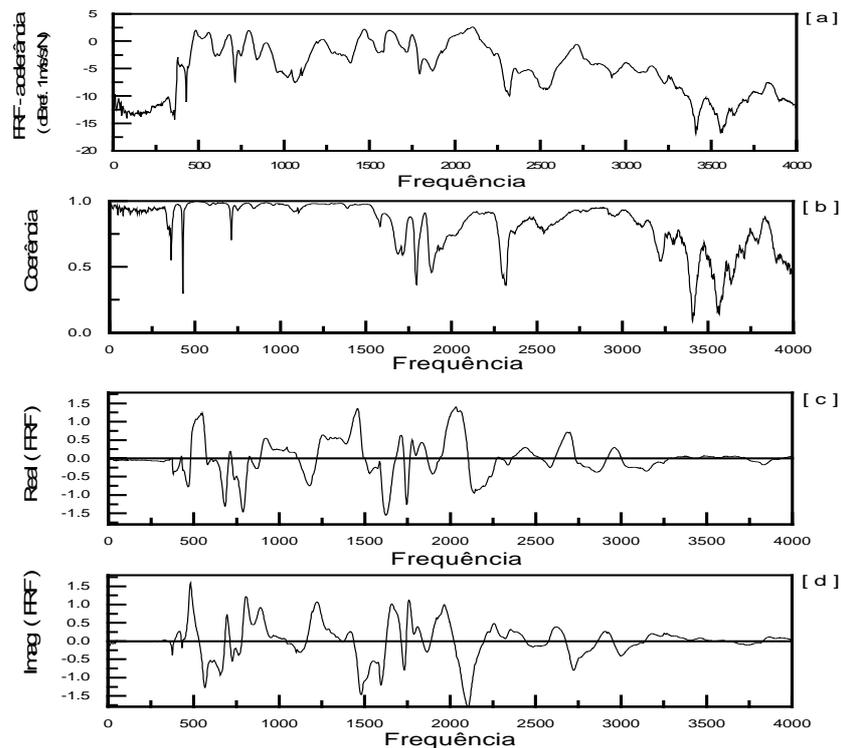


Figura 3- FRF entre: tensor da correia do alternador e a tampa da caixa do eixo comando de válvulas.

3. CARACTERIZAÇÃO DOS PADRÕES ASSOCIADOS AOS DEFEITOS

Durante os testes foram encontrados motores apresentando níveis elevados de ruído, de acordo com os critérios do fabricante. Um fato relevante a ser considerado é que, na maioria dos casos, os mecanismos dos quais a rumorosidade se originava não possuíam falhas propriamente ditas, tal como defeitos superficiais ou desvios de forma. O aumento do ruído é causado pelas más condições de funcionamento dos mecanismos considerados na seção 2.1, cuja origem, são os erros na aplicação de forças de tensionamento das correias e também, erros de tolerância no ajuste mecânico. Tal afirmação pode ser feita com segurança, visto que corrigidas as forças de tensionamento das correias e as folgas do ajuste came-tucho de válvula, os ruídos diminuíam para níveis aceitáveis.

Os sinais provenientes das falhas de que estamos tratando têm muita semelhança com sinais oriundos de defeitos incipientes, pois geram uma série de pulsos de pouca energia. Quando os rolamentos estão operando sobre-pressionados, os elementos rolantes, passando pela região de carregamento, geram deformações mecânicas de alta frequência que irão excitar a carcaça do rolamento nas suas frequências naturais, provocando assim um aumento no nível da vibração medida. A técnica usada para extrair as informações provenientes das falhas foi a técnica do envelope que pode ser obtida através do seguinte procedimento:

1- O sinal no tempo do motor com defeito, ilustrado na Fig. 4a, é filtrado com um filtro passa-banda de frequência central $f_{c1}=(f_1+f_2)/2$ e largura da banda $b=(f_2-f_1)$, na qual se verifica o aumento no nível da vibração em relação a um motor sem defeito, como ilustrado na Fig. 4b. O sinal resultante desta operação, no tempo e na frequência, está ilustrado respectivamente nas Fig. 4c e Fig. 4d. Segundo (Angelo,1987), as informações contidas neste sinal são isentas da maioria dos contaminantes provenientes de outras fontes de vibração.

2- O sinal é agora retificado e filtrado com um filtro passa-baixo, adotando-se uma frequência de corte com valor igual à metade da largura da banda da filtragem feita no item 1, isto é $f_{c2}=b/2$. O sinal resultante, no tempo, é ilustrado na Fig. 4e.

3- Aplicando a transformada de Fourier ao sinal resultante do item 2 obtêm-se, finalmente, o espectro do envelope, ilustrado na Fig. 4f.

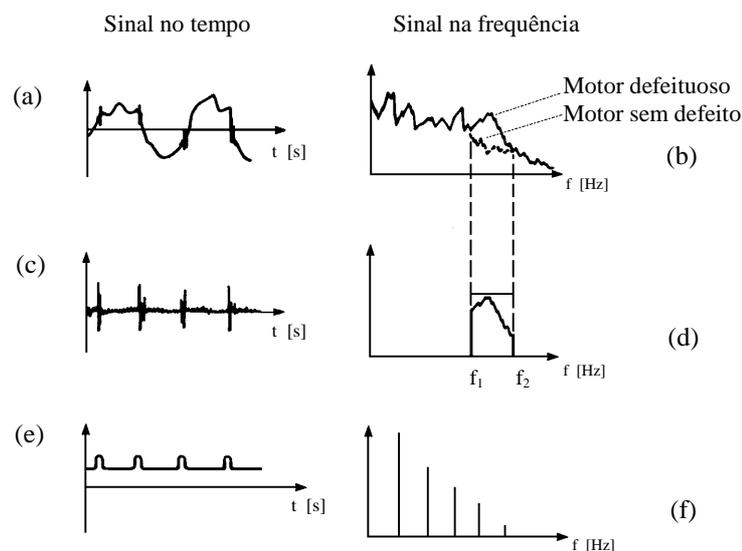


Figura 4- Princípio da detecção de falhas pela técnica do envelope, adaptado de(Angelo,1987).

Uma vez determinados os espectros do envelope dos sinais associados a cada tipo de defeito considerado neste trabalho, à primeira vista, pouca diferença foi encontrada entre os espectros de um motor com tensor da correia de distribuição rumorosa e o espectro de um motor com tensor da correia sincronizadora rumorosa. Desta forma se fez necessário a obtenção de informações adicionais a respeito dos rolamentos utilizados nos tensores, tratadas na próxima seção.

3.1 Determinação das frequências características dos rolamentos dos tensores.

Devido à dificuldade inicial na distinção dos defeitos associados à rumorosidade nos dois tensores, com base no espectro do envelope inteiro, utilizou-se um modelo de geração de vibrações em rolamentos. Com este modelo foram determinadas as frequências características

dos rolamentos utilizados nos tensores, conhecidas as suas dimensões e modo de operação. Tais frequências características são obtidas através das equações Eq. (1) a Eq. (4).

$$F_{pepe} = fc \left(\frac{n}{2} \right) \left(\frac{Fr}{60} \right) \left(1 - \frac{de}{p} \cos \phi \right) \quad (1)$$

$$F_{pepi} = fc \left(\frac{n}{2} \right) \left(\frac{Fr}{60} \right) \left(1 + \frac{de}{p} \cos \phi \right) \quad (2)$$

$$F_{ee} = fc \left(\frac{p}{2de} \right) \left(\frac{Fr}{60} \right) \left(1 - \left(\frac{de}{p} \right)^2 \cos^2 \phi \right) \quad (3)$$

$$F_t = \frac{fc}{2} \left(\frac{Fr}{60} \right) \left(1 - \frac{de \cos \phi}{p} \right) \quad (4)$$

Onde :

- F_{pepe} - frequência de passagem do elemento rolante na pista externa do rolamento.
- F_{pepi} - frequência de passagem do elemento rolante na pista interna do rolamento.
- F_{ee} - frequência de spin do do elemento rolante.
- F_t - frequência do trem dos elementos rolantes.
- de - diâmetro do elemento rolante.
- p - módulo diametral do rolamento.
- Fr - frequência de rotação da pista girante em rpm.
- ϕ - ângulo de contato entre o elemento rolente e a pista de rolamento.
- fc - fator de correção

O fator fc foi inserido com o objetivo de melhorar o acerto na busca dos padrões associados aos defeitos, pois ele reduz a diferença entre os valores das frequências características calculadas e o valores encontrados na prática, dado que as equações originais(Braun,1986), foram deduzidas assumindo que os elementos rolantes executam somente o movimento de rolamento. O valor adotado para fc foi de 0.975, determinado a partir das observações de sinais de motores cuja condição de funcionamento era previamente conhecida. Outra medida que facilitou a definição dos padrões dos defeitos foi a inserção das frequências características de outro rolamento movido pela correia do alternador: o da bomba d'água.

3.2 Padrões associados à rumorosidade nos tensores

Na definição dos padrões associados à rumorosidade nos tensores, foram utilizados 12 parâmetros: 11 frequências caractísticas dos rolamentos já citados e a frequência central da banda analisada através da técnica do envelope. Exemplos de padrões associados a cada condição de funcionamento dos motores são apresentados na Fig. 5, e cada um dos parâmetros dos padrões está descrito na Tabela 2.

Na Fig. 5, cada padrão apresentado está identificado com uma dada condição de funcionamento do motor como segue: motor com tensor da correia sincronizadora rumoroso(padão1); motor com tensor da correia do alternador rumorosa(padão2); motor sem defeito(padão3); motor com os dois tensores ruidosos(padão4).

Tabela 2. Descrição dos parâmetros constiuintes dos padrões associados à rumorosidade nos tensores.

1	frequência central da banda analisada através da técnica do envelope, f_{cl}
2 a 8	amplitude do espectro do envelope nas frequências características do rolamento do tensor da correia do alternador e do rolamento da bomba d'água.
9 a 12	amplitude do espectro do envelope nas frequências características do rolamento do tensor da correia sincronizadora.

Numa primeira análise, baseando-se apenas na Fig. 5, existe uma grande tendência em se querer reduzir ainda mais o número de parâmetros dos padrões ali apresentados, todavia, é preciso levar em conta que um motor é um sistema não linear de complexidade apreciável.

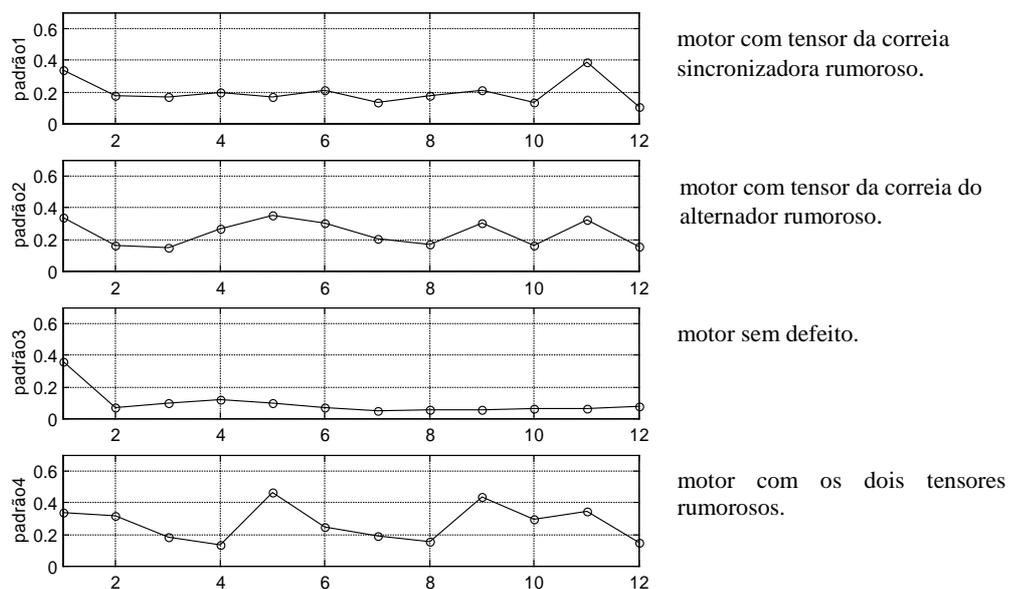


Figura 5- Padrões associados às condições de funcionamento dos motores.

3.3 Padrões associados à rumorosidade de batida de válvula

As amplitudes do espectro do envelope na frequência de rotação do eixo comando de válvulas e nos seus nove primeiros harmônicos são os 10 parâmetros constituintes do padrão associado a um motor com rumorosidade de batida de válvula(s), visto que estas 10 frequências são suficientemente representativas para o diagnóstico. Tais padrões estão mostrados na Fig. 6 e são identificados como segue: motor sem batida de válvula(s)(padrão5); motor no limite de aceitabilidade para rumorosidade de batida de válvula(s)(padrão6); motor com rumorosidade de batida de válvula(s) inaceitável(padrão7).

Os padrões apresentados nas Fig. 5 e Fig. 6 foram estabelecidos de acordo com os critérios subjetivos utilizados pelos técnicos que avaliam os motores na linha de montagem.

Uma vez estabelecidos conjuntos de padrões como os mostrados nas seções 3.2 e 3.3, estes foram utilizados para o treinamento e a validação de uma rede neural.

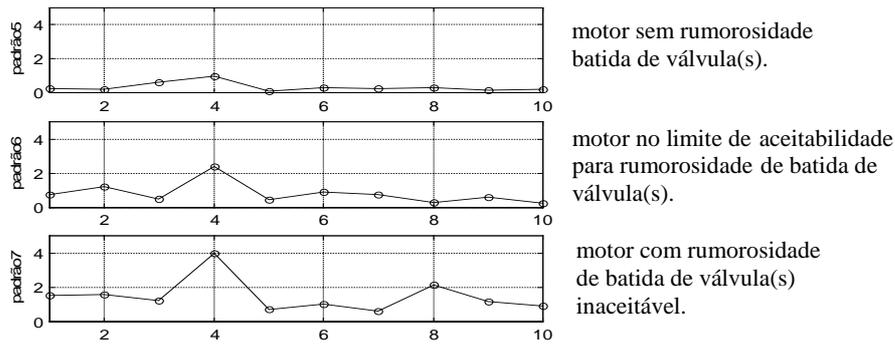


Figura 6- Padrões associados às condições de funcionamento dos motores.

4. TREINAMENTO E VALIDAÇÃO DE UMA A REDE NEURAL(PNN).

Durante o pós-processamento dos sinais adquiridos, observou-se, como era de se esperar, que diferentes motores com a mesma condição de funcionamento apresentavam padrões similares, porém, nunca iguais. A solução adotada para a identificação de tais padrões foi treinar e validar uma rede neural probabilística(PNN) usando conjuntos de padrões gerados numericamente a partir de poucos padrões básicos, semelhantes aos da Fig. 5 e Fig. 6.

A PNN é intrinsecamente um algoritmo projetado para executar tarefas de classificação, ou seja, a rede é treinada para avaliar amostras desconhecidas e associá-las com uma determinada classe do conjunto de treinamento. Nesta topologia de rede, utiliza-se o método de Parzen(Parzen,1962) para a estimar a função densidade de probabilidade(fdp) do conjunto de treinamento, que é um dos componentes mais importantes do modelo estatístico no qual a PNN é baseada: a regra de decisão de Bayes(Koltz,1982). Por esta regra, entende-se, que durante o processo de classificação se deve favorecer a classe que possui maior densidade de membros na vizinhança da amostra desconhecida. O programa utilizado neste trabalho que implementa a rede PNN, foi desenvolvido por (Master,1995).

Os conjuntos de padrões utilizados no treinamento foram obtidos por simulação numérica, de modo a constituir envoltórias que englobem diferentes padrões associados à um mesmo tipo de defeito. Com isto, se conseguiu suprimir, com restrições, a falta de um banco de dados mais completo. Cada envoltória foi obtida variando percentualmente entre [-35%,+35%] os valores dos parâmetros constituintes dos padrões básicos. Na Fig. 7 está mostrado um exemplo de um conjunto de padrões associados a um motor com tensor da correia sincronizadora rumoroso, gerado a partir de um padrão básico.

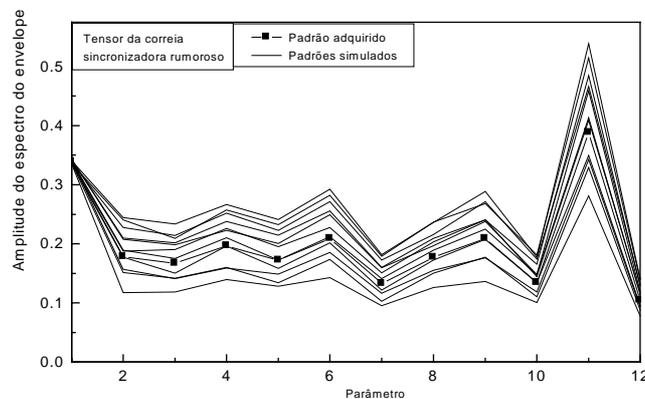


Figura 7- Exemplo de parte de um conjunto de treinamento.

A rede de classificação treinada para reconhecer padrões como os apresentados na Fig. 7 gera uma saída com (04) dígitos: $[P_1 P_2 P_3 P_4]$; onde $0 \leq P_i \leq 1$, de forma que o dígito P_1 está associado com o padrão1, o dígito P_2 está associado com o padrão2 e assim sucessivamente. Quando um padrão de um motor com condição de funcionamento desconhecida é apresentado à rede para a classificação, o padrão reconhecido pela rede é aquele correspondente ao dígito da saída da rede com valor mais próximo da unidade, ou seja, se por exemplo a saída da rede for $[0.1239 \ 0.0000 \ 0.7861 \ 0.0000]$, deve-se inferir que a rede neural identificou o padrão apresentado como sendo pertencente ao padrão3.

Na Fig. 8 são mostrados dois padrões, um de um motor com tensor da correia do alternador rumoroso (padrão 2), e outro, de um motor com o mesmo tipo de defeito, mas, que não pertence ao conjunto de treinamento apresentado à rede (padrão inédito). A saída da rede para o exemplo da Fig. 8 foi: $[0.0001 \ 0.9998 \ 0.0001 \ 0.0001]$.

Na Fig. 9 estão mostrados motores que possuem os dois tensores rumorosos, associados ao padrão4. A saída da rede para este padrão foi: $[0.0000 \ 0.0000 \ 0.0000 \ 1.0000]$.

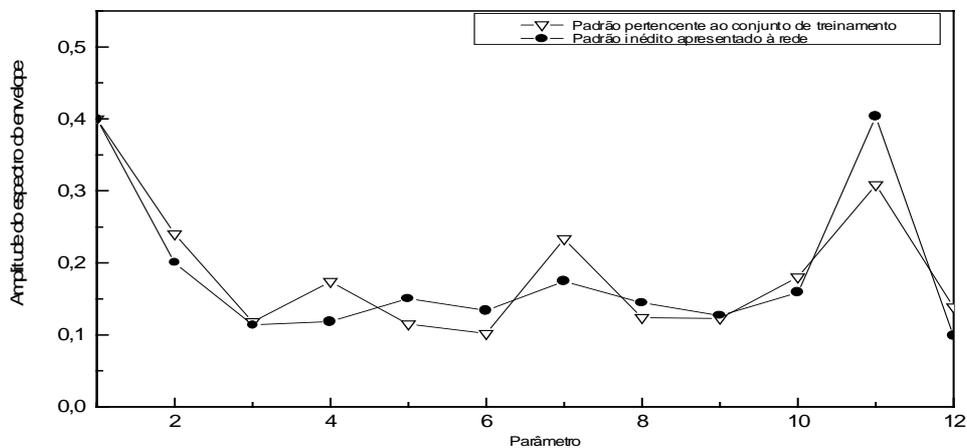


Figura 8- Teste de padrão inédito, representando motor com tensor da correia sincronizadora rumoroso (padrão 2).

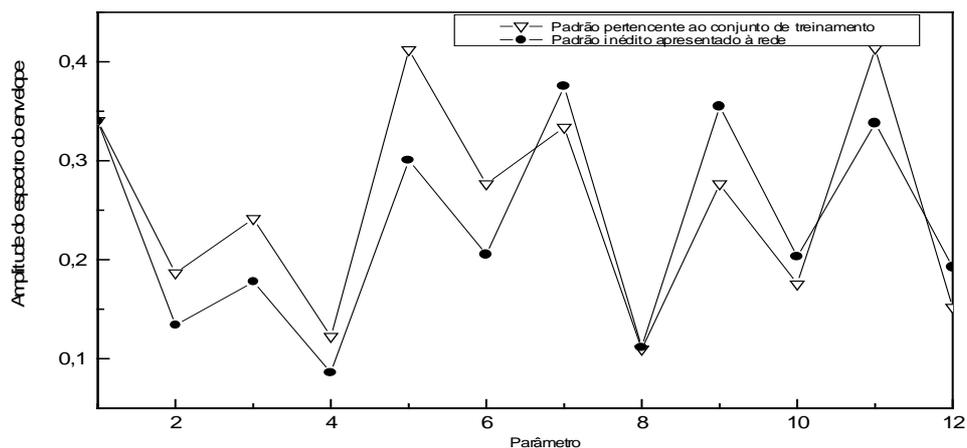


Figura 9- Teste de padrão inédito, representando motor com ambos os tensores rumorosos (padrão 4).

Constatou-se através de testes com a rede treinada, que se um padrão inédito se enquadra em uma das envoltórias do conjunto de treinamento, ele é corretamente classificado. Por outro lado, se um único parâmetro do padrão desconhecido fica fora da envoltória a que ele mais se enquadra, o padrão é considerado desconhecido pela rede. Esta mesma constatação foi feita durante os testes da rede treinada para o diagnóstico do problema de batida de válvula.

4. CONCLUSÕES

As características da rede PNN no que diz respeito à facilidade de adição ou remoção de padrões ao conjunto de dados de treinamento e validação, bem como sua rapidez de treinamento puderam ser comprovadas.

Conseguiu-se, para o restrito banco de dados adquirido, o sucesso no diagnóstico automático de rumorosidade nos tensores, e de batida de válvula, mesmo que os padrões inéditos apresentassem características muito diferentes em relação aos padrões do conjunto de treinamento da rede.

Com relação aos defeitos considerados neste trabalho, a metodologia apresentada mostrou-se como uma interessante ferramenta para o controle da qualidade do funcionamento de motores na linha de montagem.

REFERÊNCIAS

- Angelo, M., 1987, Vibration Monitoring of Machines, Bruel & Kjaer technical review, n. 1, Naerum Offset, Denmark.
- Bendat, J. S. & Pierson, A. G., 1986, Random Data: Analysis and Measurement Procedures, John Wiley & Sons, New York.
- Braun, S., 1986; Mechanical Signature Analysis: theory and applications, Academic Press, Lodon.
- Kotz, S., Norman. J., 1982, "Encyclopedia of Statistical Sciences", John Wiley & Sons, New York.
- Masters, T., 1995; Advanced Algorithms for Neural Networks, John Wiley & Sons, New York.
- Parzen, E., 1962, "On Estimation of a Probability Density Function and Mode", Annals of Mathematical Statistics, 33:1065-1076.

APLICACION OF NEURAL NETWORK IN ENGINE FAULT DETECTION

Abstract. This work presents the implementation of an automatic diagnosis tool for some faults founded in spark engine. Using the magnitude of envelope spectrum, in characteristic frequencies, certain patterns associated to the defects more frequently found during the tests in the assembly line were defined. Groups of these patterns were presented to a neural network objectifying its training. The type of neural network adopted, was the probabilistic neural network(PNN), which presents desirable characteristics to solve the problem in focus: the reliability of the statistical model in which it is based, the addition or removal easiness of patterns in data set of training and validation, and the reduced computational time expended in its training. The work finishes showing a validation procedure, in which the capacity of the trained net in recognizing patterns that are different from those used in its training, was tested. The PNN was capable to automate the fault diagnosis, establishing, like this, an objective approach for the control quality of spark engines conditions.

Key words: *Automatic falt detection, Neural net works, spark engine*