

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR GUSTAVO FURTADO
DE SOUZA E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 29/07/2011

Janito Vaquero Ferreira
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Gustavo Furtado de Souza

Análise do funcionamento de motores Diesel
utilizando wavelets

Campinas, 2011.

Gustavo Furtado de Souza

Análise do funcionamento de motores Diesel através de análise de vibrações

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da
Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Estadual de Campinas, como
requisito para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Automobilística.
Área de concentração: Projetos

Orientador: Prof. Dr. Janito Vaqueiro Ferreira

Campinas
2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

So89a Souza, Gustavo Furtado de
Análise do funcionamento de motores diesel
utilizando wavelets / Gustavo Furtado de Souza. --
Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Janito Vaqueiro Ferreira.
Dissertação de Mestrado (Profissional) -
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Mecânica.

1. Motores - Vibração. 2. Wavelets (Matemática) -
Software. 3. Análise de componentes principais. I.
Ferreira, Janito Vaqueiro. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.
Título.

Título em Inglês: Diesel engines running analysis using wavelets

Palavras-chave em Inglês: Engines - Vibration, Wavelets (Mathematics) -
Software, Principal components analysis

Área de concentração: Projetos

Titulação: Mestre em Engenharia Automobilística

Banca examinadora: Pablo Siqueira Meirelles, Lazaro Valentim Donadon

Data da defesa: 29-07-2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL**

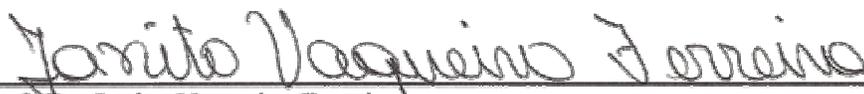
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL

**Análise do funcionamento de motores Diesel
utilizando wavelets**

Autor: Gustavo Furtado de Souza

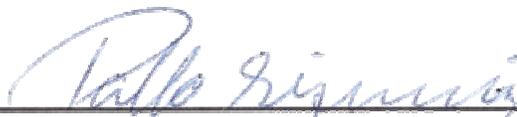
Orientador: Prof. Dr. Janito Vaqueiro Ferreira

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



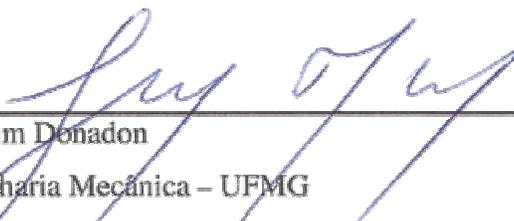
Prof. Dr. Janito Vaqueiro Ferreira

Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP



Prof. Dr. Pablo Siqueira Meirelles

Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP



Prof. Dr. Lázaro Valentim Donadon

Departamento de Engenharia Mecânica – UFMG

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a, meus pais Luiz Carlos e Vera Lúcia pelos valores que me foram ensinados e contribuíram para formação do meu caráter.

A minha amada esposa Solange, pela paciência e apoio, pois em muitos momentos precisei estar ausente de nosso convívio familiar.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Dr. Janito Vaqueiro Ferreira pelo apoio e orientação durante minha jornada acadêmica, sempre disposto a indicar o melhor caminho a seguir.

A minha esposa Solange Bender, pela compreensão e apoio durante este período de minha vida.

Ao meu colega e amigo Valmir Silveira, pela amizade, companheirismo e apoio nos momentos mais difíceis.

A MWM International, empresa onde trabalho, por ter propiciado condições de participar de um programa de mestrado.

Aos membros da banca examinadora.

A todos que de alguma forma, contribuíram comigo neste período de minha vida.

"Deus nos fez perfeitos e não escolhe os capacitados, capacita os escolhidos. Fazer ou não fazer algo, só depende de nossa vontade e perseverança."
Albert Einstein

RESUMO

A indústria de motores de um modo geral utiliza-se de testes de final de linha para assegurar a funcionalidade de seus produtos. Na indústria de motores estes testes são normalmente funcionais e verificam características de desempenho do motor, porém características construtivas são difíceis de avaliar e dependem de operadores habilidosos para serem identificadas. A dependência da habilidade dos operadores torna o processo subjetivo, pois não é possível aferir as habilidades dos operadores. A análise de vibrações surge como uma importante ferramenta para avaliação destas características, permitindo verificações não-intrusivas nos motores. A implementação da transformada de wavelet packet - WTP aos sinais de vibração permite determinar o nível de energia em cada uma das bandas de frequência, comparando então motor a motor. Para facilitar a análise, os coeficientes de energia são compactados e um polinômio de resposta pode ser determinado com auxílio da análise de componentes principais - ACP. A utilização de um polinômio de resposta, aplicado a um conjunto de resultados conhecidos, permite que seja definida uma assinatura mecânica padrão para os motores.

Palavras-chave: vibração, wavelets, ACP, motor, assinatura padrão, detecção de falhas.

ABSTRACT

The engine industry in general is used for end of line testing to ensure the functionality of its products. In the engine industry these tests are usually functional and verify performance characteristics of the engine, but construction features are difficult to assess and depend on skilled operators to be identified. The dependence of the ability of operators makes the subjective process, it is not possible to assess the skills of operators. Vibration analysis emerges as an important tool for evaluation of these features, enabling non-intrusive checks on the engines. The implementation of wavelet packet transform - WTP to vibration signals to determine the energy level in each frequency bands, then comparing the motor engine. To make the analysis easy, the coefficients of energy is compressed and a polynomial response can be determined with the aid of main component analysis - PCA. The use of a polynomial response, applied to a set of known results, allows us to define a signature pattern for mechanical engines

Key-words: vibration, wavelets, PCA, engine, signature pattern, failure detection.

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 - Resolução tempo-freqüência para a Transformada de Fourier.	9
Figura 2.2 – Resolução tempo-freqüência para STFT.....	11
Figura 2.3 - Resolução tempo-freqüência da CWT, utilizando a wavelet de Daubechies.	13
Figura 2.4 - Algoritmo Piramidal de Mallat (Fonte: SANTIAGO, 2004).....	14
Figura 2.5 – Exemplo da aplicação da teoria de Multiresolução – MRA (Fonte: SANTIAGO, 2004).....	15
Figura 2.6 - Esquema de obtenção das Componentes Principais	18
Figura 2.7 - Elipsóide de densidade constante	19
Figura 4.1 - Motor “Power Stroke 3.0E”, o qual será utilizado nos ensaios.	25
Figura 4.2 – Processo de alinhamento do motor ao dinamômetro: 1. Flange do dinamômetro com eixo de alinhamento montado. 2. Volante do motor com o eixo de alinhamento montado. 3. Buscha deslizante (passa não passa) para verificação do alinhamento entre os dois eixos.....	26
Figura 4.3 – Instalação do motor junto ao dinamômetro concluída. 1. Eixo cardan instalado, interligando motor ao dinamômetro 2. Coxins de borracha utilizados para isolar as vibrações motor e ambiente.	27
Figura 4.4 – Sistema de análise de vibrações composto por: 1. Acelerômetro piezoelétrico; 2. Conversor analógico/digital; 3. Computador portátil com software de processamento de sinais.	28
Figura 4.5 – Sinal da amplitude da aceleração em função do tempo, sem nenhum tipo de tratamento matemático, de um motor NGD funcionando a 4000 rpm na condição de máximo torque.	29
Figura 4.6 – Sinal da amplitude da aceleração em função do tempo, sem nenhum tipo de tratamento matemático, de um motor NGD funcionando a 4000 rpm na condição de mínimo torque.	30
Figura 4.7 – Espectro de freqüência do sinal de aceleração para o motor funcionando a 4000 rpm em máximo torque. 1. Freqüência referente à rotação do eixo comando de válvulas, 2. Freqüência referente à rotação do virabrequim, coincidente com a 2ª harmônica da rotação do comando de válvulas, 3. Freqüência referente à 3ª harmônica da rotação do eixo comando de válvulas, 4. Freqüência referente a combustão, coincidente com a 2ª harmônica da freqüência de rotação e a 4ª harmônica da freqüência de rotação do comando de válvulas.	31
Figura 4.8 - Espectro de vibração - 4000 rpm - axial - sem carga.....	32
Figura 4.9 - Eixos de medição	33
Figura 4.10 – Ponto de medição axial (Eixo “X”).....	33
Figura 4.11 – Espectro de aceleração a 4000 rpm, com limite de medição a 2 kHz.....	35
Figura 4.12 – Níveis de energia em cada banda da WTP, a 4000 rpm, com limite de medição a 2 kHz.	36

Figura 4.13 - Semelhança entre os níveis de energia de motores 2 motores , rodando a 4000 rpm em condições normais de funcionamento.....	38
Figura 4.14 – Virabrequim do motor com sinais de agarramento, junto à posição de montagem da bronzina.....	39
Figura 4.15 – Níveis de energia de aceleração para o motor (com início de agarramento) funcionando a 4000 rpm em máximo torque, obtido com base na WTP.	40
Figura 4.16 - Níveis de Energia para a condição de 4000 rpm, em máximo torque, de motores defeituosos.....	41
Figura 4.17 - Níveis de energia para a condição de 4000 rpm, em máximo torque.....	42
Figura 4.18 - Níveis de energia para a condição de 3600 rpm, em máximo torque.....	44
Figura 4.19 - Níveis de energia para a condição de 3200 rpm, em máximo torque.....	44
Figura 4.20 - Níveis de energia para a condição de 2800 rpm, em maximo torque.....	45
Figura 4.21 - Níveis de energia para a condição de 2400 rpm, em máximo torque.....	46
Figura 4.22 - Níveis de energia para a condição de 2000 rpm, em máximo torque.....	47
Figura 4.23 - Níveis de energia para a condição de 1600 rpm, em máximo torque.....	48
Figura 4.24 – Níveis de energia em cada um dos nós da WTP para (a) 3600 rpm (b) 3200 rpm.	50
Figura 4.25 – Níveis de energia em cada um dos nós da WTP para (a) 2800 rpm (b) 2400 rpm .	50
Figura 4.26 – Níveis de energia em cada um dos nós da WTP para (a) 2000 rpm (b) 1600 rpm .	51
Figura 4.27 – Níveis de energia em cada um dos nós da WTP para (a) 1400 rpm (b) 1200 rpm.	51
Figura 4.28 - Resultados obtidos a partir da Análise de Componentes Principais para 5 motores (grupo 1) em condições normais de funcionamento, no plano ($CP1$; $CP2$; $CP3$).....	55
Figura 4.29 – Validação do polinômio de resposta. Motores A, B, C, D, E foram utilizados na elaboração do polinômio. Os vetores $CP1 \times CP2 \times CP3$ para o motor F foram obtidos a partir do polinômio já elaborado, no plano $CP1$; $CP2$; $CP3$	56
Figura 4.30 – Polinômio validado com motores defeituosos - Motores A, B, C, D, E, F são motores em condições normais de funcionamento. Os motores G, H são motores que apresentam agarramento de bronzina de biela, no plano $CP1$; $CP2$; $CP3$	57
Figura 4.31 - Resultados obtidos a partir da Análise de Componentes Principais para motores Sprint, em condições normais de funcionamento, no plano bidimensional ($CP1$; $CP2$).....	59
Figura 4.32 – Validação do polinômio de resposta. Motores K, L foram utilizados na elaboração do polinômio. Os resultados obtidos para o motor M utilizaram o polinômio já elaborado.	60
Figura 4.33 - Polinômio validado e verificado com os motores K, L, M . Os motores N e O são motores que apresentam ruído e foram devolvidos pelo clientes, indicado no plano bidimensional $CP1, CP2$	61

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Faixa de frequência analisada em cada uma dos nós.....	37
Tabela 4.2 – Coeficientes de correlação para os resultados da WTP dos motores “A” e “B”.	39
Tabela 4.3 – Coeficientes de correlação para os resultados da WTP para os motores “G” e “H”.	41
Tabela 4.4 – Representação esquemática dos nós de maior energia de motores normais versus motores defeituosos para condição de 4000 rpm em cada um dos níveis de decomposição da WTP.....	43
Tabela 4.5 – Coeficientes de correlação para os resultados da WTP para os motores “A” e “G”.	49
Tabela 4.6 – Coeficientes de correlação para os resultados da WTP para os motores “K” e “L”, grupo 1.....	52
Tabela 4.7 – Coeficientes de correlação para os resultados da WTP para os motores “N” e “O”, grupo 3.....	52
Tabela 4.8 – Coeficientes de correlação para os resultados da WTP para os motores “K “ e “N”, grupo 1 versus grupo 3.	52

Lista de abreviaturas

Letras Latinas

- a – parâmetro de escala
- b – parâmetro de posição
- f – frequência
- j – nível de decomposição
- k – posição do nó no nível
- l – autovetor
- n – quantidade de medições
- p – quantidade de variáveis
- r – matriz de correlação
- I – matriz identidade
- S – sinal original discreto

Letras Gregas

- Σ – matriz de covariância
- λ – autovalor

Abreviações e Siglas

- ACP – Análise de Componentes Principais
- CP1 – Componente Principal 1
- CP2 – Componente Principal 2
- CWT – Transformada Contínua de Wavelet
- DWT – Transformada Discreta de Wavelet
- FFT – Transformada Rápida de Fourier
- FT – Transformada de Fourier
- FWT – Transformada Rápida de Wavelet
- MRA – Análise de Multiresolução
- STFT – Transformada de Curta Duração de Fourier

WTP – Transformada de Wavelet Packet
WPD – Decomposição dos nós da wavelet
ANN – Redes Neurais Artificiais
WT – Transformada de Wavelet
QMF – Filtro de Quadratura Espelhada
E – Entropia de Shannon
rpm – rotações por minuto
 (a, b) – coeficientes de escala e posição
 A_1, A_2, \dots, A_n – níveis de aproximação
 D_1, D_2, \dots, D_n – níveis de detalhe
 S_i – sinal amostrado no instante i
 (CP_1, CP_2, CP_3) – plano tridimensional de componentes principais
 (CP_1, CP_2) – plano bidimensional
 dbn – wavelet de daubechies
 $db10$ – wavelet de ordem 10

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Introdução ao Problema.....	1
1.2	Revisão Bibliográfica.....	3
1.3	Objetivo.....	5
1.4	Organização do Trabalho.....	6
2	Análise Tempo – Freqüência e Análise de Componentes Principais.....	7
2.1	Sinais Estacionários.....	7
2.2	Sinais Não Estacionários e Transientes.....	9
2.3	Análise de Componentes Principais – ACP.....	17
3	Metodologia para Identificação do Defeito.....	20
3.1	Introdução.....	20
3.2	Descrição do Método.....	20
4	Resultados Experimentais.....	23
4.1	Introdução.....	23
4.2	Preparação dos Ensaios.....	24
4.3	Medição dos Sinais de Vibração.....	28
4.4	Medições Iniciais.....	29
4.5	Aplicação da Transformada de Wavelet Packet.....	35
4.6	Análise de Componentes Principais – ACP.....	53
4.7	Discussão dos Resultados.....	62
5	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	64
5.1	Conclusões.....	64
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	65
	Referências.....	66

1 Introdução

1.1 Introdução ao Problema

A busca constante pela satisfação dos clientes em todos os níveis sejam eles clientes finais ou mesmo etapas intermediárias do processo de produção, tem levado a indústria a buscar diferentes formas de verificação do nível de conformidade de seus produtos. Não diferente a isto, a indústria de motores a diesel tem buscado soluções a fim de garantir detecção de eventuais defeitos de montagem ou mesmo de qualidade dos produtos. Isto preservará a imagem de sua marca perante o mercado consumidor.

Os principais métodos de detecção de defeitos utilizados pelas indústrias de motores são os testes funcionais, conhecidos como “cold test” (teste a frio) e “hot test” (teste a quente). Em função das características construtivas dos motores a diesel, devido às altas taxas de compressão utilizadas, auto-ignição da mistura ar-combustível e a temperatura da frente de chama, a grande maioria dos fabricantes deste tipo de motor utiliza o “hot test” como forma de detecção dos defeitos. O “hot test” é conhecido desta forma, pois é necessário o funcionamento do motor (existência do fenômeno da combustão, que gera calor) para a verificação dos seus parâmetros de desempenho.

Durante o “hot test”, são verificadas características de desempenho dos motores a diesel tais como: potência, torque, consumo de combustível, fumaça e outros. Porém defeitos relacionados a características funcionais são difíceis de identificar, pois além da vibração e ruído produzido por características mecânicas dos motores, temos vibrações e ruídos devido à combustão. Hoje em dia, a análise dos defeitos funcionais identificados nos motores durante o

“hot test” depende praticamente da habilidade do operador de identificar o motor defeituoso, através da experiência.

Isto torna o processo muito subjetivo, pois não é possível aferir a habilidade do operador, nem mesmo compará-los entre si, não existindo assim um padrão de avaliação. O principal problema que temos com isto, é para garantir que o mesmo padrão de análise seja utilizado por todos os operadores. Além disso, o tempo de funcionamento do motor muitas vezes não é suficiente para que este apresente algum tipo de ruído perceptível relacionado a algum defeito, o que impacta na não identificação do problema pelo operador do banco de testes.

Uma vez que a identificação dos defeitos está baseada na experiência dos operadores, relacionado à percepção de vibrações ou ruídos anormais, pode-se utilizar esta característica como dado de entrada para detecção de defeitos dos motores.

Dessa forma, é necessária a aplicação de alguma técnica capaz de identificar os defeitos provenientes do funcionamento dos motores, eliminando assim a subjetividade (habilidade do operador) da análise. Para auxiliar a tarefa de identificação de defeitos funcionais dos motores, pode-se encontrar pesquisas utilizando-se de métodos de análise de vibrações.

O princípio geral por trás do monitoramento de sinais de vibração em sistemas mecânicos, envolve os componentes que vibram durante a operação. Quando as falhas se desenvolvem, algumas características dinâmicas do sistema variam, resultando em desvios significativos nos padrões de vibração (YEN & LIN, 2000).

As variações nos padrões de vibração estão relacionadas a mecanismos de rotação ou translação, e as anomalias nos conjuntos de bronzinas de biela e bronzinas de virabrequim são os defeitos mais perceptíveis em motores de combustão. Geralmente, motores de combustão defeituosos, exibem alterações em seu padrão de vibração que podem ser utilizados no diagnóstico de falhas mecânicas (ZHANG *et al*, 2010).

Técnicas de detecção de falhas, através de análises de vibrações, permitem identificar defeitos, de forma não intrusiva, antes da falha total do equipamento. Este tipo de análise é de grande importância, pois dispensa a necessidade de intervenções para avaliação das condições de funcionamento dos equipamentos. Normalmente este tipo de análise é aplicada a sistemas rotativos balanceados, como bombas e turbinas. No caso dos motores a diesel este tipo de análise

torna-se mais difícil, pois temos vários eventos atuando em conjunto, entre os quais podemos citar a combustão (por compressão), abertura e fechamento das válvulas e o movimento de translação dos pistões (CHANG & HU, 2010).

A análise de sinais de vibração é uma área em crescimento no diagnóstico de falhas de motores a combustão e tem a vantagem de serem simples e rápidas em identificar com precisão, o mecanismo de falhas de motores previamente a sua desmontagem. Estas aplicações possuem amplas perspectivas de crescimento na engenharia no desenvolvimento de sistemas robustos de detecção de defeitos (ZHAN-FENG *et al*, 2010).

O resultado da análise de sinais é diretamente influenciado pelo método de medição dos sinais de vibração coletados do motor, impactando assim no diagnóstico da falha. Por isso, é uma premissa para a análise dos sinais de vibração, estudar a forma como será executada a coleta de dados e a definição das posições de medição (ZHAN-FENG *et al*, 2010).

1.2 Revisão Bibliográfica

A extração de informações a partir de sinais digitais é característica de técnicas de análise de sinais utilizando wavelets. A wavelet é uma ferramenta adequada para análise de série de tipos de sinais (Daubechies, 1990).

As wavelets são muito utilizadas em análise de vibração, pois podem ser aplicadas na análise de sinais estacionários e não estacionários. Existem diversos tipos de funções wavelet, cada uma delas apresentando características próprias.

Wavelets são funções que atendem certos requisitos matemáticos e podem representar dados ou outras funções. As wavelets têm suas origens fundamentadas na teoria de Joseph Fourier, que se utilizava de uma base de análise tempo-freqüência, através da sobreposição de funções seno e cosseno. A wavelet por sua vez, utiliza-se do conceito tempo-escala, que permite analisar um mesmo sinal com diferentes resoluções.

A primeira referência que temos notícia sobre a wavelet é de 1909, estudada por Alfred Haar. A wavelet de Haar apresenta suporte compacto, o que significa que a função desaparece fora de um intervalo finito. Não sendo assim continuamente diferenciável, o que limita muito sua aplicação prática. A wavelet de Haar é bastante simples, sendo ela muito usada para fins educacionais (GRAPS, 1995).

O grande impulso na aplicação da wavelet ocorreu em 1985, através de um trabalho de Stephane Mallat para o processamento digital de imagens (Análise de Multiresolução, também conhecido com algoritmo piramidal de Mallat). A partir deste trabalho, juntamente com os esforços de Yves Meyer, surgiu a versão discreta da transformada de wavelet (DWT). Nos anos seguintes, Ingrid Daubechies utilizou-se do trabalho de Mallat para construir um conjunto de wavelets de suporte compacto, criando assim a base das aplicações atuais de wavelets Mallat (GRAPS, 1995 *apud* Mallat, 1985; *apud* Meyer, 1986; *apud* Daubechies, 1988).

Existem diferentes utilizações de wavelets em muitas áreas de pesquisa, nas mais diversas aplicações, sendo sua maioria na análise de sinais digitais e compressão de imagens digitais. Uma das aplicações mais conhecida de wavelets é a compactação e armazenamento de impressões digitais utilizada pelo FBI (BRADLEY & BRISLAWN; 1994). Além destas, existem outras aplicações, como a classificação de padrões baseado em séries temporais para assinaturas de vibração através do uso da Transformada de Wavelet Packet (WTP) (YEN & LIN, 2010).

Nos últimos anos, houve grandes avanços nas áreas pesquisa e desenvolvimento de sistemas de diagnóstico automático de falhas, em todo o mundo. No entanto, a detecção da maioria dos tipos de falhas em motores, especialmente defeitos mecânicos, ainda depende da decisão dos operadores habilidosos (ZHAN-FENG *et al*, 2010).

Geralmente o mecanismo de falha apresenta sinais muito sutis no seu início, assim nenhum sintoma é normalmente observado, dificultando a detecção do defeito. Quando a falha torna-se perceptível, a mesma já se encontra em um estágio onde outros componentes já podem ter sido danificados, que representam custos extras ou até mesmo a impossibilidade de reparo.

Um sistema eficaz de identificação de defeitos deve, portanto alertar o operador, assim que os primeiros sinais de mau funcionamento começam a aparecer. Neste momento a avaliação

da assinatura mecânica de motores desempenha um papel fundamental para a detecção de defeitos (ZAN *et al*, 2007).

A análise da assinatura mecânica consiste na extração de informações a partir de padrões existentes em sinais obtidos de dados reais. Este tipo de aplicação é um campo já bem explorado na área de engenharia. Aliado a isto, os avanços no desenvolvimento de computadores de baixo custo especialmente projetados para aplicações industriais, juntamente com o uso de controladores digitais, tem contribuído muito para o desenvolvimento de sistema de monitoração e diagnósticos de sistemas mecânicos nas últimas duas décadas, de modo que podemos fazer uma avaliação da assinatura mecânica em tempo real (SAMYMI & RIZZONI, 1996).

Yen & Lin (2000), utilizaram a Transformada de Wavelet Packet, como alternativa a análise de Fourier para extração da assinatura de vibração. Os coeficientes de energia obtidos da aplicação da WTP foram então analisados com auxílio de métodos estatístico de geração de padrões.

Santiago (2004) apresentou um método para classificação de defeitos através da energia contida em bandas de frequência com a aplicação da Transformada de Wavelet Packet (WTP) em conjunto com Redes Neurais Artificiais (ANN). A vantagem do método está na forma compacta de extração dos dados de vibração para classificação.

Zhan *et al* (2007), utilizou a análise de vibrações para verificar a ocorrência de defeitos em motores marítimos. A caracterização das frequências de vibração foi realizada com o uso da wavelet, sendo estas informações utilizadas na aplicação da Análise de Componentes Principais, permitindo assim a categorização dos tipos de defeitos.

1.3 Objetivo

Verificar, através de um método de análise de vibrações, a viabilidade de se classificar o comportamento dinâmico de vibração de motores de combustão do ciclo diesel. Isto permitirá

identificar vibrações normais e anormais, contribuindo assim para a detecção de defeitos funcionais nos motores a diesel durante o seu hot test.

1.4 Organização do Trabalho

No capítulo dois, é caracterizado o que são sinais estacionários e não estacionários. A partir disto, são apresentados os conceitos análise tempo-frequência, suas características, aplicações e limitações. Neste ponto são introduzidos os conceitos da Transformada de Fourier - TF. Na seqüência, caracterizam-se os sinais não estacionários e transientes, junto a isso é apresentado o conceito da Transformada de Wavelet (WT) e o domínio tempo-escala.

No capítulo três, propomos uma metodologia a ser aplicada para obtenção da assinatura mecânica de motores, com a aplicação da Transformada de Wavelet Packet (WTP) associado à Análise de Componentes Principais - ACP.

No capítulo quatro, é demonstrada a preparação dos ensaios, análises iniciais realizadas, resultando na identificação do perfil de vibração dos motores através da WTP. Além disso, o método de Análise de Componentes Principais é aplicado para ajudar na classificação dos motores defeituosos.

No capítulo cinco, são discutidos os resultados obtidos através do emprego da WTP associados à ACP, onde são feitas observações sobre a capacidade do método proposto de fazer a classificação da condição de funcionamento dos motores.

No capítulo seis, são comentadas as conclusões deste trabalho e são propostas possíveis sugestões de trabalhos futuros.

2 Análise Tempo – Frequência e Análise de Componentes Principais

A análise de sinais vibração no diagnóstico de falhas de motores é uma área em crescimento e tem uma vantagem única podendo simples e rapidamente, identificar com precisão o mecanismo de falhas previamente à desmontagem de motores, e tem amplas perspectivas de engenharia (ZHAN-FENG *et al*, 2010).

2.1 Sinais Estacionários

A maioria dos sinais, na prática, são sinais no domínio do tempo em seu formato bruto. Essa representação não é sempre a melhor representação para a maioria dos aplicativos de processamento de sinais. Em muitos casos, as informações mais importantes estão escondidas no conteúdo de frequência do sinal (MARTINA *et al*, 2007).

Os métodos de análise de frequência foram desenvolvidos a partir dos trabalhos de Joseph Fourier de 1807. Os resultados no domínio da frequência são obtidos através da aplicação da Transformada de Fourier - TF. Esta transformada decompõe um sinal em uma série de somas de suas componentes elementares de senos e cossenos (*apud* GRAPS, 1995).

Ao aplicarmos a Transformada de Fourier para obter o espectro de um sinal, podemos ver como a energia do sinal é distribuída em frequência. Para sinais estacionários, não há necessidade de ir além do domínio do tempo ou frequência. Ao contrário disso, na presença de sinais não estacionários, é necessário criar funções capazes de representar a energia dos sinais em tempo e frequência simultaneamente (MARTINA *et al*, 2007).

2.1.1 Transformada de Fourier

A utilidade da Transformada de Fourier reside na sua capacidade para analisar um sinal no domínio do tempo em seu domínio de frequência. A transformação ocorre, em primeiro lugar transformando uma função no domínio do tempo em uma função no domínio da frequência. O sinal pode ser então analisado em seu conteúdo de frequência, isto porque os coeficientes da função transformada de Fourier representam a contribuição de cada função seno e cosseno em cada frequência (GRAPS, 1995).

A análise espectral é de grande importância para sinais estacionários, pois o domínio da frequência pode identificar a ocorrência de uma série de eventos contidos no sinal original. Por exemplo, é possível conhecer características intrínsecas do sinal como o intervalo de ocorrência do evento, sua intensidade ou mesmo do sistema que o gera, a partir de seu espectro de frequência (MIRANDA, 2002).

A transformação de um sinal estacionário do domínio do tempo, como o da equação 2.1, para o domínio da frequência é feita através da transformada de Fourier, que pode ser representada pela seguinte equação (MIRANDA, 2002):

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \quad (2.1)$$

Conforme já foi dito, a análise espectral é muito útil na avaliação de sinais estacionários. Isto ocorre, pois a frequência contida no sinal é de grande importância para avaliação das características do evento original.

A figura 2.1 mostra o plano tempo-frequência da transformada de Fourier, com sua resolução.



Figura 2.1 - Resolução tempo-freqüência para a Transformada de Fourier.

Entre as principais limitações da Transformada de Fourier, podemos considerar a não localização da ocorrência de eventos específicos no tempo e a resolução fixa para o plano tempo-freqüência. Estas deficiências limitam a utilização da Transformada de Fourier apenas a sinais estacionários (GRAPS, 1995).

Quando os sinais não são estacionários, outras ferramentas devem ser utilizadas para transformá-los do domínio do tempo para o domínio da freqüência (MIRANDA, 2002).

2.2 Sinais Não Estacionários e Transientes

Na análise de sinais estacionários, em que o conteúdo de freqüência é invariante no tempo, a Transformada de Fourier se aplica muito bem para obter informações corretas a respeito do sinal no domínio da freqüência. Tanto o sinal temporal, quanto seu espectro carregam suas informações completas, embora nenhuma destas representações revele explicitamente o espectro de freqüência num instante particular de tempo, nem o instante em que ocorre uma componente espectral. Caso um sinal apresente seu conteúdo de freqüência variando com o tempo, não se pode afirmar com absoluta certeza, utilizando-se a Transformada de Fourier, que todas as informações observadas sejam corretas ou completas. Surge então a necessidade de se examinar estes sinais através de ferramentas mais poderosas, que permitam mostrar os detalhes a respeito do conteúdo do sinal (MIRANDA, 2002).

A ocorrência de alterações, mesmo que pequenas, em um determinado instante de tempo no sinal, afetam o espectro inteiro. Portanto a FFT é um tanto inadequada para análise de sinais não-estacionários e para o processamento de sinais em tempo-real, por isso outras transformadas foram desenvolvidas como, por exemplo, a Transformada de Curta Duração de Fourier (STFT) e as transformadas de wavelet, tanto contínuas quanto discretas. Essas transformadas serão descritas a seguir.

2.2.1 Transformada de Gabor (Short Time Fourier Transform - STFT).

A Transformada de Fourier de Curta Duração – STFT foi proposta por Denis Gabor em 1946. Esta transformada é uma adaptação da Transformada de Fourier. Seu objetivo era superar as deficiências existentes na Transformada de Fourier, que apresenta uma única resolução em frequência para todo o intervalo do sinal e a falta de localização de eventos no tempo. Em função disso, Gabor apresentou o conceito de localização no tempo, chamado de “função janela” $g(t - b)$, onde o parâmetro b é utilizado para deslocar a janela no domínio do tempo. A equação 2.2, mostra a alteração proposta (*apud* CHEN & DAI, 2010).

$$STFT(f, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t).g(t - b)e^{-i2\pi ft} dt \quad (2.2)$$

Gabor propôs então dividir o intervalo de tempo em pequenas janelas e incluindo um termo de posicionamento da janela, aumentando assim a resolução na análise do sinal, porém o tamanho da janela é fixo. O tamanho fixo das janelas utilizadas na STFT implica em uma resolução tempo-frequência fixa no plano tempo-frequência (YEN & LIN, 2000).

Uma premissa para a aplicação desta transformada é que o sinal deve ser considerado estacionário dentro de cada janela analisada.

Uma dificuldade no uso da STFT é que a precisão das informações de frequência extraída é limitada pelo comprimento da janela (fixo) em relação à duração do sinal analisado (YEN &

LIN, 2000). Isto limita sua aplicação, pois a resolução é constante para todas as faixas de frequência. A figura 2.2 ilustra esta condição.

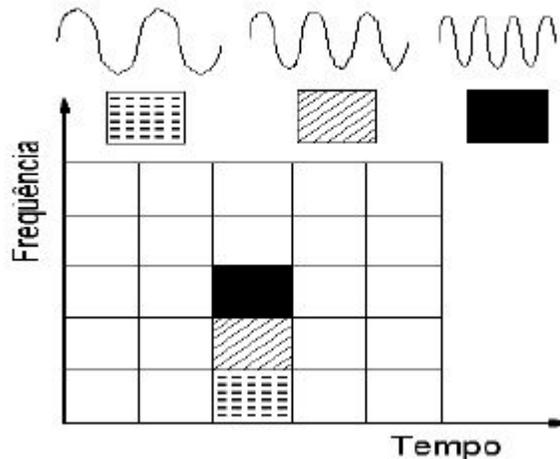


Figura 2.2 – Resolução tempo-frequência para STFT

A largura fixa da janela limita a precisão na extração da informação no domínio da frequência. Esta condição leva necessariamente a uma relação de compromisso na resolução tempo-frequência. Com isto percebe-se que a STFT não é adequada para análise de sinais onde temos componentes de baixa e alta frequência presentes no sinal.

Por conseguinte, se formos analisar o conteúdo de baixa frequência de um sinal, desejamos uma função de janela ampla no tempo. Caso contrário, se estamos interessados em fenômenos de alta frequência, uma função de curta duração seria preferível (YEN & LIN, 2000).

A partir destas necessidades é proposta a utilização do domínio tempo-escala, em detrimento do domínio tempo-frequência, surgindo assim à análise de wavelets.

2.2.2 Transformada Contínua de Wavelet - CWT

A teoria de Wavelet pode ser vista como um quadro comum de técnicas que foram desenvolvidas de forma independente em diversas áreas (RIOUL & VERTTELI, 1991).

Podemos definir uma wavelet, como sendo uma onda pequena oscilante com média igual a zero e que tem decaimento rápido tendendo a zero, quando $t \rightarrow \infty$ (SANTIAGO, 2004).

Diferentemente da Transformada de Fourier, que determina seus coeficientes através de senos e cossenos, a Transformada de Wavelet utiliza dilatação e translação da wavelet a partir da wavelet mãe.

A Transformada Contínua de Wavelet – CWT introduz o conceito de escala em substituição à frequência, criando assim o domínio tempo-escala. Análise de wavelet baseia-se em funções de base formadas por dilatação ou compressão, referente ao parâmetro a (escala) e ao parâmetro b de translação, coeficiente este referente ao avanço ou atraso da posição wavelet no eixo do tempo (SANTIAGO, 2004).

A CWT utiliza um parâmetro de escala a variável, ao invés de frequência f variável, conforme descrito anteriormente pela STFT.

A equação 2.3 demonstra a CWT para um sinal $x(t)$.

$$CWT(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \psi_{a,b}^*(t) dt \quad a \text{ e } b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (2.3)$$

Sendo a CWT uma transformada independente do fator de escala, podemos variar a escala em função do tempo, obtendo assim uma boa resolução do sinal tanto no tempo quanto na frequência (escala). A figura 2.3 indica esta condição, onde se percebe que a utilização de uma janela estreita obtém boa resolução no tempo, porém baixa resolução em frequência. De outra forma, uma janela larga apresenta boa resolução na frequência, mas baixa resolução no tempo.

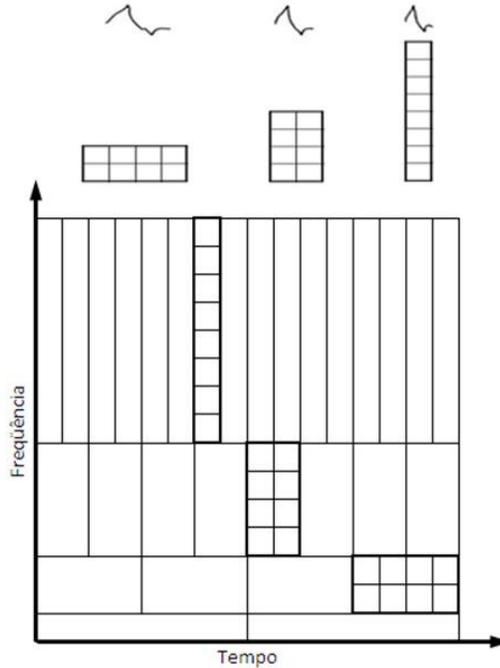


Figura 2.3 - Resolução tempo-frequência da CWT, utilizando a wavelet de Daubechies.

O resultado obtido a partir da transformada contínua de wavelet é uma matriz dos coeficientes de escala e posição (a, b) .

Os coeficientes $CWT(a, b)$ medem o conteúdo tempo-frequência do sinal indexado pelos parâmetros de escala e posição. O termo frequência em vez de escala pode ser utilizado para auxiliar na compreensão, uma vez que as wavelets com grande escala estão relacionadas com conteúdo de componentes de baixa frequência, e vice-versa. Assim, vemos que a CWT corrige as notáveis deficiências das análises de Fourier. Ou seja, a CWT analisa o conteúdo de baixa frequência de um sinal com uma função de grande duração e, inversamente, analisa fenômenos de alta frequência com uma função de curta duração (YEN & LIN, 2000).

A análise do sinal no domínio tempo-escala, permite captar as mudanças sutis do sinal de vibração do motor, enquanto as falhas acontecem (ZAN *et al*, 2007).

2.2.3 Transformada Discreta de Wavelet

A Transformada Discreta de Wavelet - DWT pode ser utilizada como uma alternativa a CWT reduzindo assim a quantidade de dados a serem processados. Na DWT, os parâmetros de escala e posição na CWT a e b são substituídos por 2^j e $k2^j$.

$$DWT(j, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \psi_{j,k}^*(t) dt \quad j \text{ e } k \in \mathbb{Z} \quad (2.4)$$

Semelhante à Transformada Rápida de Fourier (FFT), existe um algoritmo para implementação da DWT baseado na decomposição da Transformada Rápida de Wavelet (FWT), que é normalmente utilizado. Este algoritmo é conhecido como Análise de Multiresolução (MRA) ou Algoritmo Piramidal de Mallat, o qual foi desenvolvido por Mallat em 1988 (MISITI *et al*, 1997; MALLAT, 1989).

A MRA utiliza um processo especial de filtragem para decompor o sinal, onde, o conteúdo do sinal em baixa frequência é chamado de aproximação, e o de alta frequência é chamado de detalhe. Este processo de filtragem decompõe o sinal original em aproximações e detalhes, e podem ser interpretados como filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente, como mostra a figura 2.4 (SANTIAGO, 2004).

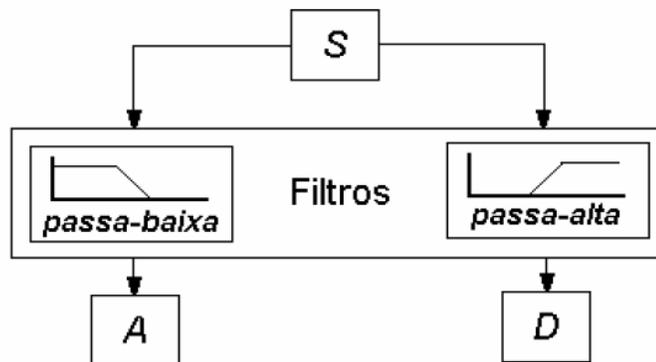


Figura 2.4 - Algoritmo Piramidal de Mallat (Fonte: SANTIAGO, 2004)

No caso discreto, a Transformada de Wavelet é equivalente a um banco de filtros logarítmicos, com a restrição adicional de regularidade no filtro passa-baixa (RIOUL & VERTTELI, 1991).

Os bancos de filtros implementados na análise de multiresolução também são conhecidos como *Quadrature Mirror Filter* – QMF. Este banco de filtros é constituído de dois blocos: um bloco utilizado na decomposição do sinal e outro na reconstrução do sinal.

Resumindo, a teoria de multiresolução permite decompor um sinal da seguinte forma: primeiro, um sinal original discreto S é decomposto no primeiro nível em duas componentes A_1 e D_1 por um filtro passa-baixa e um passa-alta, respectivamente. O A_1 , é chamado de aproximação do sinal e D_1 , é chamado de detalhe do sinal. Para o segundo nível, a aproximação agora A_1 é decomposta em uma nova aproximação, A_2 , e um detalhe D_2 . Este procedimento pode ser repetido para o terceiro nível, quarto, etc. A Figura 2.5 mostra a árvore de decomposição da wavelet de um sinal em três níveis (SANTIAGO, 2004).

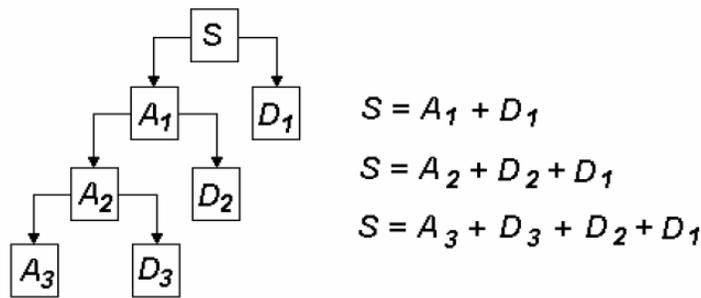


Figura 2.5 – Exemplo da aplicação da teoria de Multiresolução – MRA (Fonte: SANTIAGO, 2004)

Dependendo da necessidade de aplicação, diferentes abordagens de implementação são possíveis: a construção da DWT inclui diferentes arquiteturas de níveis de paralelismo de processamento e também alternativas de algoritmos como o banco de filtros e do regime de elevação (MARTINA *et al*, 2007).

2.2.4 Transformada de Wavelet Packet - WTP

A WTP é um caso específico da DWT. Na DWT apenas as componentes de baixa energia (packets de aproximação) são desdobrados. Diferentemente disso, na WTP as componentes de baixa e de alta energia também são desdobradas.

A WTP é largamente utilizada na compressão para posterior armazenamento de sinais, sendo estes dados, sons ou imagens. Durante a compressão do sinal, é possível identificar o nível de energia do sinal contido em cada uma das frações (nós) originais do sinal, através da análise dos nós. Isto permite determinar o nível de contribuição de energia de cada fração do sinal original. Conhecendo este nível de contribuição, é possível determinar quais frações do sinal original são importantes, descartando assim aquelas que não sejam representativas para reconstrução do sinal. Esta característica permite a compactação do sinal sem perdas significativas de informação.

A WTP também pode ser aplicada em problemas de classificação baseado em séries temporais para assinaturas de vibração. Os dados de vibração são decompostos através da WTP para extração dos coeficientes de energia contido em cada um dos nós WTP (YEN & LIN, 2000).

Um tipo de wavelet bastante utilizada no cálculo da DWT de um sinal, baseado na análise de multiresolução é a wavelet de Daubechies (SANTIAGO, 2004).

Os coeficientes de energia para cada um dos nós (componentes de energia) da WTP foram obtidos através da fórmula de entropia de Shannon, que é uma entropia não-normalizada envolvendo o logaritmo do valor de cada quadrado,

$$E = -\sum_i s_i^2 \log s_i^2 \quad (2.5)$$

onde E é a entropia de Shannon e s_i é o sinal amostrado no instante i (SCHEFFER & HEYNS, 2001).

2.3 Análise de Componentes Principais – ACP

A Análise de Componentes Principais – ACP é um método estatístico empregado na análise de dados multivariados. Este método foi proposto por Karl Pearson e reformulado posteriormente por Harold Hotelling (LOPES 2002, *apud* PEARSON, 1901; *apud* HOTLLEING, 1933).

A ACP transforma um conjunto de variáveis em um conjunto menor de combinações lineares que representam a variância do conjunto total. Neste caso, as variáveis de entrada serão os coeficientes de energia, de cada um dos nós, obtidos por exemplo pela aplicação da WTP à sinais de aceleração. Esta análise permite reduzir os dados e facilitar a interpretação destes.

O objetivo da ACP é o de explicar a máxima quantidade de variância com o menor número de componentes principais - CP

A ACP, portanto tem a finalidade de substituir um conjunto de variáveis correlacionadas por um conjunto de novas variáveis não-correlacionadas, sendo essas combinações lineares das variáveis iniciais e colocadas em ordem decrescente por suas variâncias (VERDINNELLI, 1980).

A ACP é comumente usada onde existe um grande conjunto de dados a serem analisados, sendo normalmente utilizada como um passo intermediário em uma série de análises, porém também pode ser utilizada como forma de separação das características dos dados analisados.

A determinação das componentes principais ocorre através de combinações lineares das p variáveis de entrada X_1, X_2, \dots, X_p . Geometricamente, essas combinações lineares representam a relação de um novo sistema de coordenadas obtido por deslocamento e rotação do sistema original com X_1, X_2, \dots, X_p como eixos. Os novos eixos representam as direções com variabilidade máxima e fornecem uma descrição mais simples e mais parcimoniosa da estrutura de covariância (LOPES, 2002).

As componentes principais são então obtidas de uma matriz de covariância Σ ou correlação r . A figura 2.6 mostra uma seqüência esquemática para determinação das componentes principais

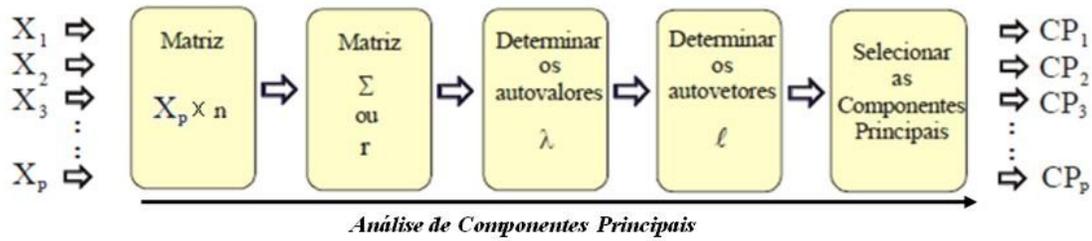


Figura 2.6 - Esquema de obtenção das Componentes Principais

Na figura 2.6 temos as X_p variáveis de entrada, que representam os coeficientes de energia obtidos pela aplicação da WTP aos sinais de vibração. A partir destas variáveis constrói-se uma matriz $X_p \times n$, onde X_p representa os valores de energia contidos em cada um dos nós da WTP e n as diferentes condições de rotações do motor utilizadas para medição na aplicação da WTP

A partir da matriz $X_p \times n$, definimos então uma matriz de covariância Σ ou a matriz de correlação r , dependendo do tipo dos dados a serem analisados. Neste ponto, discutiremos apenas a matriz de covariância, que será o modelo utilizado no trabalho. A análise de covariância é sempre realizada duas a duas variáveis. Assim então, a matriz de covariância será uma matriz quadrada de ordem p , como pode ser visto na equação da matriz 2.6.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \text{Vâr}(X_1) & \text{Côv}(X_1, X_2) & \dots & \text{Côv}(X_1, X_p) \\ \text{Côv}(X_1, X_2) & \text{Vâr}(X_2) & \dots & \text{Côv}(X_2, X_p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{Côv}(X_1, X_p) & \text{Côv}(X_2, X_p) & \dots & \text{Vâr}(X_p) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

A partir da matriz Σ , são calculados os p autovalores λ . A partir de cada um dos p autovalores λ , obtemos então p autovetores l associados a cada um dos p autovalores λ . Estes serão multiplicados pelas p variáveis de entrada, originando as p componentes principais. A equação 2.7 representa a CP_1 esquemática.

$$CP_1 = l_{11}X_1 + l_{12}X_2 + \dots + l_{1p}X_p \quad (2.7)$$

Para fins de ilustração, consideraremos apenas duas componentes principais de maior representação da variância total dos dados. A figura 2.7, mostra à elipsóide de densidade de probabilidade constante para CP_1 e CP_2 .

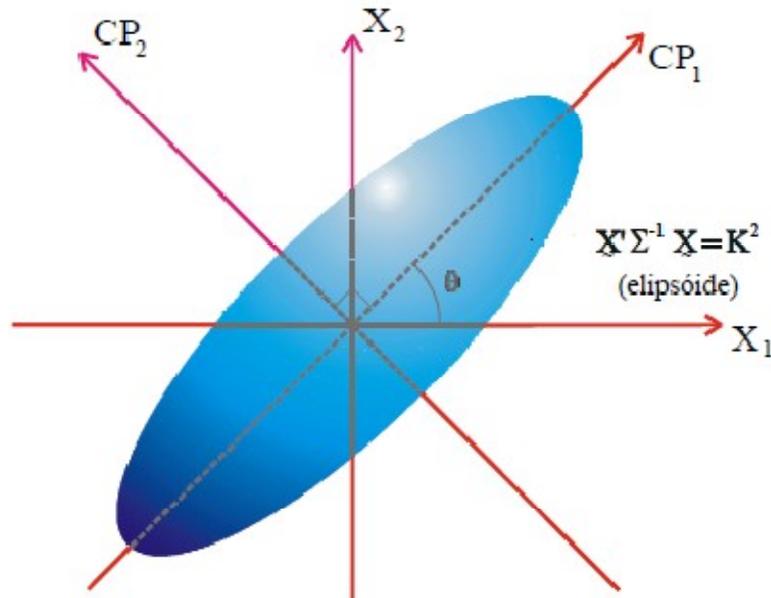


Figura 2.7 - Elipsóide de densidade constante

A componente principal um (CP_1) estará relacionada a eixo do elipsóide que apresentar a maior variância nos dados. A componente principal dois será perpendicular à primeira. Os eixos CP_1 e CP_2 passam então a representar o plano onde os vetores estão distribuídos, criando assim o plano (CP_1, CP_2).

Uma forma de determinar o número de componentes principais significativas para a análise é através da representação da variância total. O número de componentes principais a ser utilizadas deve representar entre 80% a 90% da variância total dos dados originais (LOPES, 2002, *apud* JOHNSON & WICHERN).

3 Metodologia para Identificação do Defeito

3.1 Introdução

Neste trabalho discutiremos a implementação da WTP aplicada a sinais de vibração, juntamente com a ACP, que será utilizada como forma de detecção de eventuais defeitos de montagem. Com os resultados obtidos pela ACP a partir de um grupo de referência, será definido um padrão de classificação dos motores. Este padrão de classificação é obtido através de um conjunto de equações, ajustadas a partir dos resultados da WTP de um grupo de referência. Este conjunto de equações fornecerá um polinômio de resposta para classificar os motores. Esta metodologia sendo proposta será descrita na seção 3.2 em detalhes.

3.2 Descrição do Método

Para aplicação do método de detecção de eventuais defeitos de montagem é necessário inicialmente dispor de uma amostra de motores em condições normais de funcionamento. Esta amostra será dividida em grupo 1 e grupo 2. Os grupos 1 e 2 são compostos apenas por motores em condições normais de funcionamento. Para validação é necessário uma outra amostra de motores em condições anormais de funcionamento. Este grupo denominado de grupo 3 é composto somente por motores defeituosos, os quais são previamente conhecidos os seus respectivos defeitos.

Para todos os grupos de motores serão coletados os sinais de vibração, de uma determinada faixa de rotações com intervalos de variação de rotação constantes.

Aos sinais de vibração coletados para todos os grupos de motores, aplicaremos a WTP para determinar os coeficientes de energia de cada um dos nós da WTP, para cada uma das condições de rotação.

Uma análise de correlação é aplicada no grupo 1 mostrando quais rotações apresentam semelhança de distribuição dos coeficientes de energia dos nós da WTP. Definidas as rotações, aplica-se em seguida esta correlação entre os sinais do grupo 1 e 3 na mesma rotação com o intuito de validar a identificação do grupo de motores defeituosos.

A partir dos coeficientes de energia obtidos pela aplicação da WTP para o grupo 1, aplicaremos também a ACP para determinar as componentes principais referentes a cada uma das bandas de frequência da WTP. Obtendo os autovalores, que permitirão calcular os autovetores, para então obter as equações das componentes principais referentes a cada uma das variáveis de entrada. Analisando o somatório das variâncias representadas pelas componentes principais em ordem decrescente, selecionaremos as componentes principais que atendam os critérios de representatividade dos dados originais.

Obtidas as componentes principais, representa-se graficamente a sua distribuição conforme a figura 2.7, considerando que foram selecionadas 2 componentes principais.

Definidas as equações das componentes principais que representam os dados originais, estas serão aplicadas aos coeficientes da WTP obtidos para os motores do grupo 2. Sendo os grupos 1 e 2 compostos apenas por motores em condições normais de funcionamento, os resultados das componentes principais do grupo 2 devem validar as equações das componentes principais obtidas através dos coeficientes da WTP do grupo 1. Para isso, representa-se graficamente as componentes principais do grupo 1 e do grupo 2 e realiza-se uma comparação visual da distribuição dos valores obtidos para cada um dos grupos.

Estando as equações das componentes principais validadas, verificaremos a capacidade que as equações selecionadas de identificar os motores que apresentem algum tipo de defeito. Para isto, aplicaremos as mesmas equações selecionadas a partir da aplicação da ACP aos coeficientes da WTP ao grupo 1, para o grupo 3, que é composto apenas por motores anormais. Novamente a análise das equações selecionadas e validadas a partir dos grupos 1 e 2, será

realizada através da comparação visual da distribuição dos valores obtidos para cada um dos grupos.

Após termos as equações das componentes principais definidas pelo grupo 1, validadas pelo grupo 2 e verificadas pelo grupo 3, podemos assumir que as equações das componentes principais, juntamente com as resultantes das componentes principais do grupo 1, correspondem a uma resposta padrão para os motores do tipo sendo analisado em condições normais de funcionamento. Dessa forma, podemos utilizar estas equações, juntamente com as resultantes das componentes principais do grupo 1, como um polinômio de resposta e um padrão normal de assinatura de vibração destes tipos de motores.

4 Resultados Experimentais

4.1 Introdução

Os resultados mostrados neste capítulo, foram obtidos a partir de 2 famílias diferentes de motores, chamadas respectivamente de NGD e Sprint. Ambas famílias de motores foram divididas em 3 grupos de motores.

Para os motores NGD, o grupo 1 foi composto por cinco motores em condições normais de funcionamento, chamados de motores A, B, C, D e E. O grupo 2 foi composto por um motor em condições normais de funcionamento, chamado de motor F, representando as mesmas condições dos motores do grupo 1. O grupo 3 foi composto por dois motores anormais, onde foi introduzido um início de agarramento de biela em ambos motores, identificados como motores G e H.

Para os motores Sprint, o grupo 1 foi composto por dois motores em condições normais de funcionamento, identificados por K e L. O grupo 2 foi composto por um motor em condições normais de funcionamento, indicado como motor M, representando as mesmas condições dos motores do grupo 1. O grupo 3 foi composto por dois motores anormais, identificados N e O, sendo estes dois motores devolvidos por nossos clientes com reclamação de ruído de engrenamento.

4.2 Preparação dos Ensaios

Após a conclusão do processo de montagem dos motores, estes precisam ser submetidos a um ensaio, conhecido como “hot test”, para assegurar que as características de desempenho previstas estão sendo atendidas. Juntamente com a avaliação destas características é necessária a verificação das características construtivas e estruturais dos motores. Para isto, os motores são testados individualmente em cabines especialmente preparadas para este fim. Essas cabines permitem simular as condições de funcionamento dos motores, sem que os mesmos sejam instalados no veículo.

As cabines de teste possuem instrumentação necessária para que parâmetros de temperatura, pressão, umidade, consumo de ar, consumo de combustível, torque, potência e fumaça sejam monitorados e avaliados.

A cabine de teste onde este experimento foi realizado é composta por um dinamômetro Schenck modelo WS400 (corrente de *Foucault*), com capacidade de medição 2.000 Nm @ 5.000 rpm, um equipamento de medição de vazão de combustível e um medidor de enegrecimento de fumaça.

A primeira família utilizada nos ensaios foi a família de motores NGD diesel, quatro cilindros em linha, quatro tempos, com cilindrada de 3.0L, modelo “Power Stroke 3.0E” que atualmente equipa as “pick-ups” Ford Ranger. Como principais características este motor apresenta potência máxima de 120 kW @ 3800 rpm e um torque máximo de 380 Nm @ 1600 a 2200 rpm, atendendo a legislação de emissões Euro III. A figura 4.1, ilustra o motor da primeira família com o qual estaremos trabalhando.



Figura 4.1 - Motor “Power Stroke 3.0E”, o qual será utilizado nos ensaios.

Para permitir a avaliação das características do motor, o mesmo deve ser instalado no dinamômetro na cabine de teste. O eixo de transmissão de força do motor (virabrequim) deve estar perfeitamente alinhado ao centro do dinamômetro, evitando assim a geração desnecessária de esforços, vibrações e ruídos devido a desalinhamentos. A fim de garantir este correto alinhamento entre o centro do virabrequim do motor e o centro do flange do dinamômetro, são utilizados mancais com alturas reguláveis e liberdade de movimento sobre a base de montagem.

A verificação da posição de montagem do motor em relação ao dinamômetro é realizada através de dois eixos e uma bucha deslizante. Uma vez que a bucha passe livremente de um lado a outro do eixo, o conjunto motor e dinamômetro estará considerado alinhado. Na figura 4.2, podemos ver os dois eixos montados, um deles no flange do dinamômetro e o outro junto ao volante do motor, com a bucha totalmente posicionada sobre um dos eixos.



Figura 4.2 – Processo de alinhamento do motor ao dinamômetro: 1. Flange do dinamômetro com eixo de alinhamento montado. 2. Volante do motor com o eixo de alinhamento montado. 3. Buscha deslizante (passa não passa) para verificação do alinhamento entre os dois eixos.

Esta é uma etapa importante do processo de montagem do motor na cabine de testes, pois quanto menor for o desalinhamento entre motor e dinamômetro, menor será decomposição de forças atuantes sobre o eixo cardan. Apesar do eixo cardan ser capaz de absorver desalinhamentos, a sua principal função é de transmitir o esforço torçor do motor para o dinamômetro e isolar o sistema das vibração gerada pelo motor. Com o objetivo de isolar a transmissão de vibrações, são utilizados também coxins de borracha entre o motor e os mancais reguláveis. Na figura 4.3, podemos verificar o motor já alinhado com o dinamômetro e com o cardan montado. Nesta condição já é possível transmitir o torque do motor para o dinamômetro.

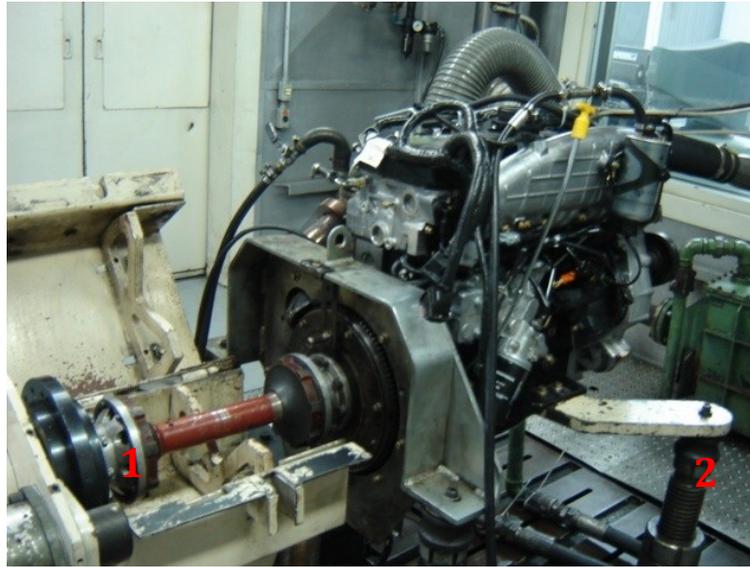


Figura 4.3 – Instalação do motor junto ao dinamômetro concluída. 1. Eixo cardan instalado, interligando motor ao dinamômetro 2. Coxins de borracha utilizados para isolar as vibrações motor e ambiente.

Para a obtenção dos parâmetros de desempenho do motor, devemos garantir que as condições de temperatura e pressão estejam estabilizadas a fim de não influenciarem na obtenção dos resultados. A obtenção destes parâmetros é realizada através da medição da curva de performance do motor. Para iniciarmos a medição da curva de performance de motor, este deve ser acelerado até a condição de 4.000 rpm em máximo torque. Uma vez atingida esta condição, o motor deve ser mantido por 3 minutos nesta condição de rotação e torque, garantindo assim que os parâmetros resultantes (temperaturas, pressões, etc) estejam estabilizados. Após a medição destes valores pelo sistema de controle da cabine de teste, a rotação é decrescida de 200 rpm da faixa anterior, mantendo-se a condição de máximo torque para esta nova condição de rotação. Esta etapa será repetida até atingirmos a última condição de medição 1.000 rpm em máximo torque. Após o término das medições o motor é desacelerado até a condição de marcha - lenta (rotação mínima, sem carga), para então ser desligado. A partir dos dados adquiridos nas 16 etapas do ensaio, constrói-se a curva de desempenho do motor.

4.3 Medição dos Sinais de Vibração

A medição dos sinais de vibração foi executada utilizando-se um sistema de análise de vibrações (SDAV - Teknikao), composto por um acelerômetro piezoeletrico com resposta 5 a 10.000 Hz com sensibilidade de 100mV/g, um conversor analógico/digital 12 bits ligado a um computador e um software de processamento de sinais, como pode ser visto na figura 4.4.



Figura 4.4 – Sistema de análise de vibrações composto por: 1. Acelerômetro piezoeletrico; 2. Conversor analógico/digital; 3. Computador portátil com software de processamento de sinais.

Os sinais de vibração em função do tempo foram adquiridos em duas condições diferentes: para motores NGD utilizou-se uma frequência de amostragem de 5.000 Hz, para uma frequência máxima de análise de 2.000Hz. Nos motores Sprint, a frequência de amostragem foi 25.000 Hz e a frequência máxima de análise 10.000 Hz.

Devido a diferenças entre as famílias de motores utilizadas, foi necessário estabelecer faixas de medição de rotação independentes para cada uma das famílias de motores. Para os motores NGD, utilizou-se uma faixa de 1.000 a 4.000rpm com acréscimo de 200rpm a cada etapa de medição de vibração. Para os motores Sprint, utilizamos o mesmo intervalo de acréscimo de 200rpm, porém a faixa de medição utilizada foi de 1.000 a 3.600rpm. Cada nível de rotação utilizado no ensaio foi considerado uma amostra individual.

4.4 Medições Iniciais

O objetivo das medições iniciais é de verificar a viabilidade de identificar os sinais característicos do motor através da análise de vibrações e ao mesmo tempo de definir os pontos de aquisição para aplicação do método de identificação de defeitos.

4.4.1 Escolha dos Pontos de Aquisição para Análise

Foi adquirido o sinal de aceleração em um regime estacionário a 4000rpm de um motor da família NGD, na condição de máximo torque. Este sinal está mostrado na figura 4.5

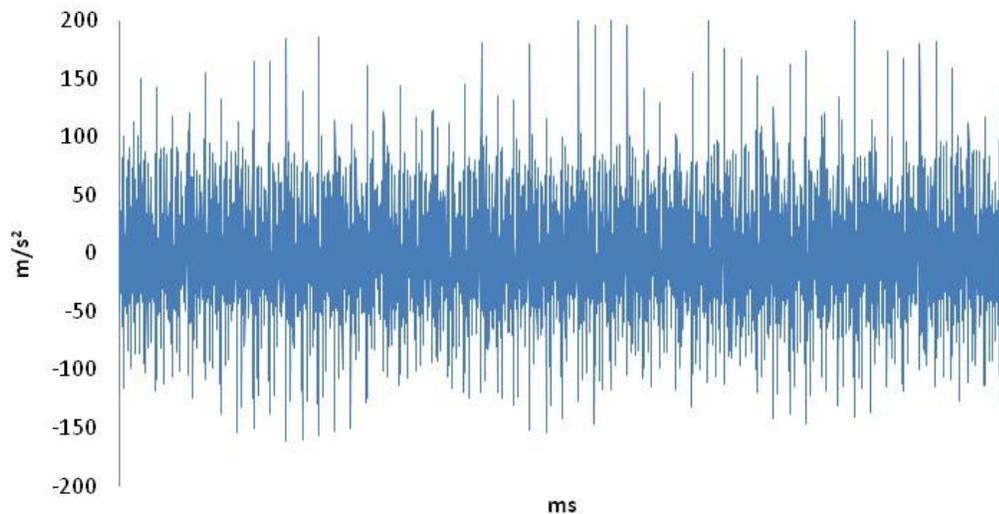


Figura 4.5 – Sinal da amplitude da aceleração em função do tempo, sem nenhum tipo de tratamento matemático, de um motor NGD funcionando a 4000 rpm na condição de máximo torque.

Nesta mesma faixa de rotação de 4000rpm, foi adquirido um novo sinal de aceleração para este motor, porém agora na condição de mínimo torque. Os valores de aceleração estão indicados na figura 4.6.

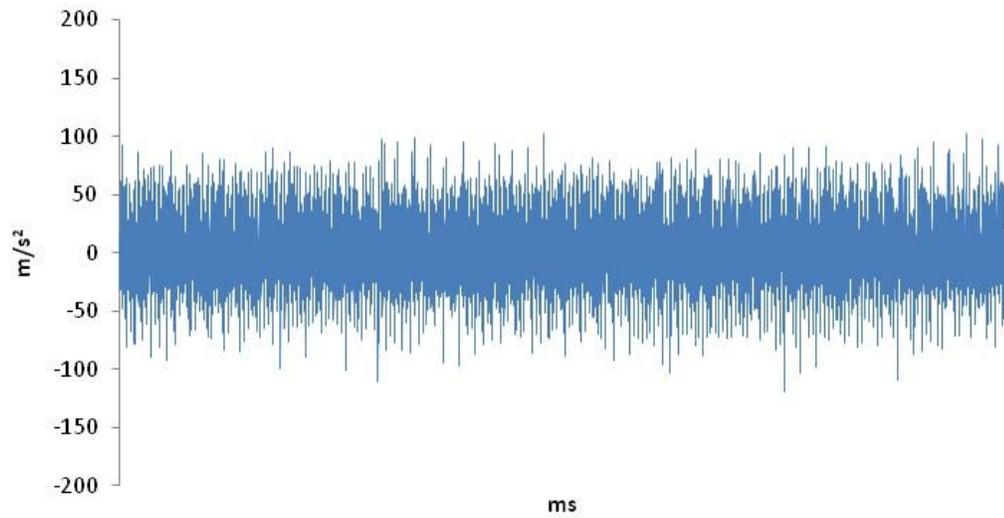


Figura 4.6 – Sinal da amplitude da aceleração em função do tempo, sem nenhum tipo de tratamento matemático, de um motor NGD funcionando a 4000 rpm na condição de mínimo torque.

A partir do sinal de vibração no tempo do motor mostrado na figura 4.5, obtivemos o espectro de vibração (domínio da frequência), mostrado na figura 4.7. A Transformada Rápida de Fourier - FFT foi utilizada para determinação deste espectro.

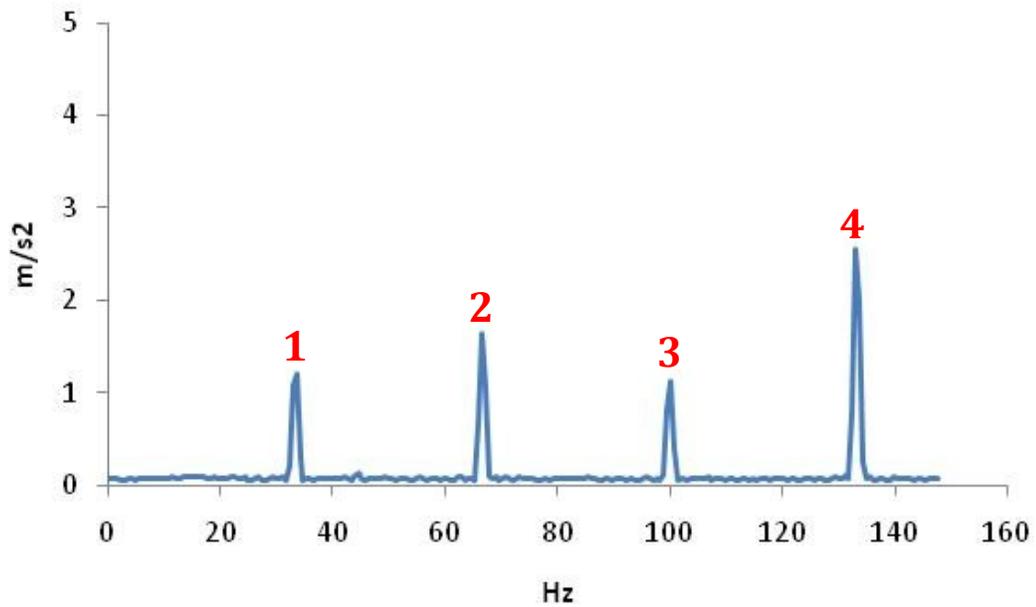


Figura 4.7 – Espectro de frequência do sinal de aceleração para o motor funcionando a 4000 rpm em máximo torque. 1. Frequência referente à rotação do eixo comando de válvulas, 2. Frequência referente à rotação do virabrequim, coincidente com a 2ª harmônica da rotação do comando de válvulas, 3. Frequência referente à 3ª harmônica da rotação do eixo comando de válvulas, 4. Frequência referente a combustão, coincidente com a 2ª harmônica da frequência de rotação e a 4ª harmônica da frequência de rotação do comando de válvulas.

A partir do sinal de vibração no tempo do motor mostrado na figura 4.6, obtivemos o espectro de vibração (domínio da frequência), mostrado na figura 4.8.

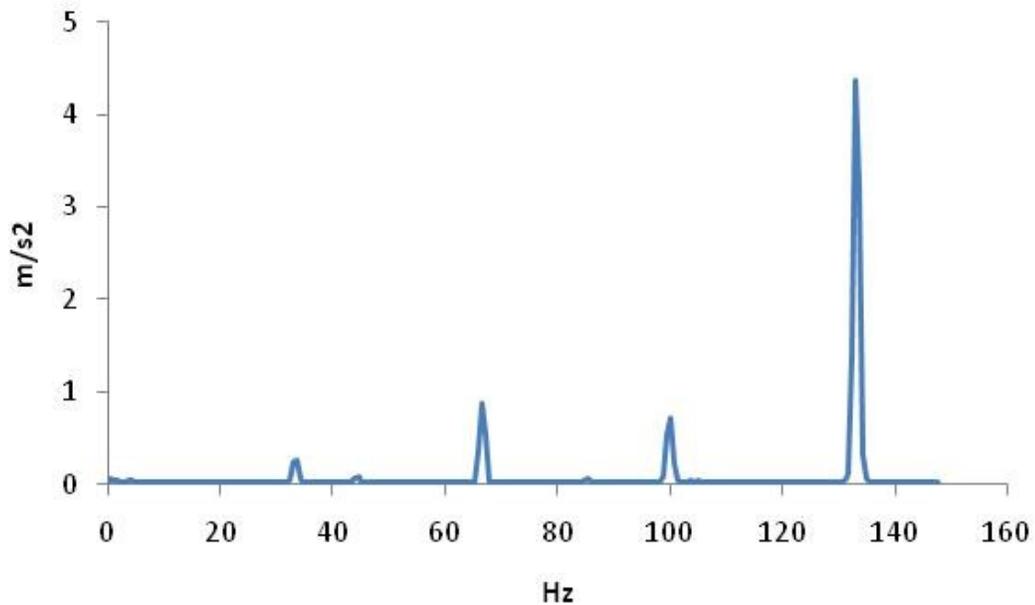


Figura 4.8 - Espectro de vibração - 4000 rpm - axial - sem carga

Ao compararmos ambas as condições de medição, figura 4.7 e 4.8, percebe-se que quando utilizamos o motor sem carga, a 4ª harmônica, referente à frequência de combustão é bastante superior as demais. Quando analisamos estas características para a condição de funcionamento em máximo torque, figura 4.7 percebe-se um incremento nos valores de aceleração da 1ª, 2ª e 3ª harmônicas, enquanto ocorre uma redução da amplitude da 4ª harmônica. Apesar da condição com carga, figura 4.7, apresentar um decréscimo na 4ª harmônica o aumento de amplitude da 1ª, 2ª e 3ª harmônica facilita a identificação das frequências típicas de funcionamento do motor. Em função disto, utilizaremos apenas a condição com carga a partir deste ponto.

Conforme também mencionado anteriormente, o espectro mostrado na figura 4.7 foi adquirido junto ao bloco de cilindros depois de uma série de medições em diferentes posições. Este ponto foi o que apresentou a melhor definição das frequências típicas do motor.

Uma vez determinada a condição de medição, é necessário definir a direção de execução das medições. Para esta análise foram realizadas leituras em três eixos, conforme indicado na figura 4.9. Todas as leituras foram realizadas diretamente no bloco de cilindros do motor, pois os componentes mais importantes do motor estão montados nesta parte do motor.

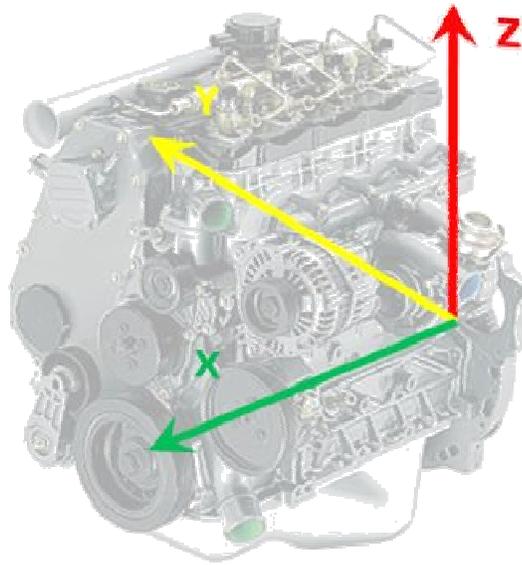


Figura 4.9 - Eixos de medição

Os melhores resultados para fins de identificação das frequências típicas do motor foram os sinais adquiridos juntamente à face traseira do bloco do motor, representando assim uma medição longitudinal ao eixo árvore (virabrequim) do motor, direção esta chamada de “Eixo X” como pode ser visto na figura 4.10. A partir deste ponto somente esta direção será analisada em todos os resultados mostrados.

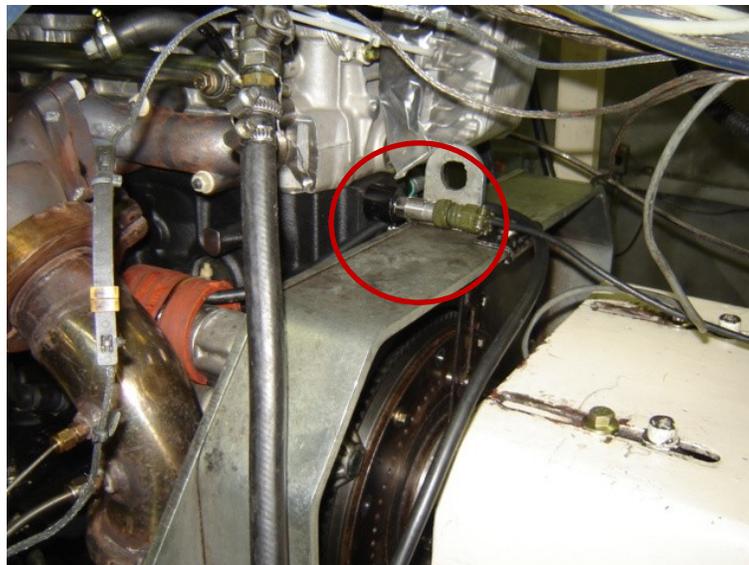


Figura 4.10 – Ponto de medição axial (Eixo “X”)

Os sinais de vibração foram adquiridos da mesma forma que são realizadas as medições de desempenho dos motores. Para isso cada motor utilizado foi estabilizado a 4000rpm, na condição de máximo torque e as medições foram tomadas. A rotação foi reduzida então de 200rpm e novamente as medições foram realizadas. Este processo se repetiu até a faixa de 1000rpm ser atingida, como já foi descrito no item 4.2.

4.4.2 Caracterização das Freqüências Típicas do Motor

Tomando por base o sinal no tempo adquirido e indicado na figura 4.7, para o motor em condições normais de funcionamento, porém analisando seu espectro de vibração em função da freqüência, é possível observar algumas características típicas dos motores de combustão.

A freqüência de referência utilizada foi à rotação do virabrequim do motor, pois este é o padrão existente na literatura para ensaios de vibração em motores. Existe uma relação fixa entre as freqüências de rotação do virabrequim e do eixo comando de válvulas na ordem 1:0,5. O mesmo também se observa entre a freqüência de rotação do virabrequim e a freqüência de combustão do motor, porém esta relação é de 1:2. Estas relações entre freqüências podem ser observadas na figura 4.7. Isto ocorre em função do motor utilizado no ensaio possuir dois eixos árvore, girando em sentido anti-horário sendo eles: virabrequim e eixo comando de válvulas. Além disso, estamos analisando um motor a combustão, logo teremos também um sinal de vibração devido à freqüência de combustão.

Na figura 4.11, podemos verificar os resultados obtidos no domínio da freqüência, onde são indicados todos os valores de aceleração em vibração até a o limite de medição de 2.000 Hz.

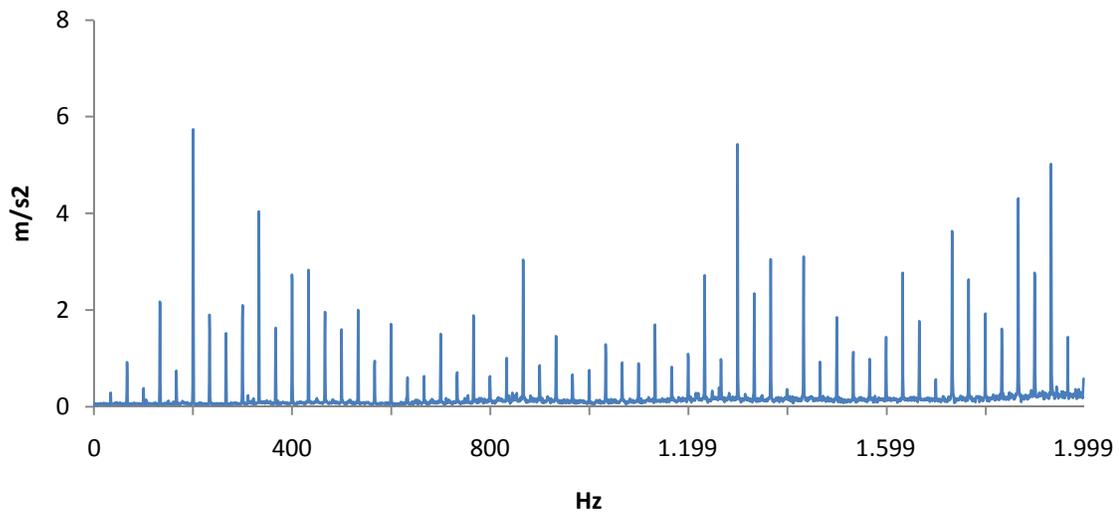


Figura 4.11 – Espectro de aceleração a 4000 rpm, com limite de medição a 2 kHz.

As frequências típicas relacionadas à rotação e combustão do motor, encontram-se abaixo de 200 Hz, conforme mostrado na figura 4.7. A partir de 1.200 Hz, passamos a observar a influência das frequências relacionadas com o trem de engrenagens do motor.

Conforme descrito no capítulo 2, as análises no domínio da frequência são muito importantes para avaliação de sinais estacionários. Uma vez que estamos trabalhando para a identificação de defeitos em motores de combustão, não podemos restringir nossas análises a sinais estacionários, pois não temos como afirmar que tipo de sinal estará presente no espectro. Dessa forma, faz-se necessária a utilização de outros métodos de análise.

4.5 Aplicação da Transformada de Wavelet Packet

Nesta seção serão mostrados os resultados obtidos da aplicação da WPT nos sinais de vibração obtidos das amostras dos motores NGD e Sprint. Para aplicação da WTP aos sinais de vibração, utilizaremos a wavelet de *daubechies*, de ordem *db10* e com $j=4$ níveis de decomposição, disponibilizada no *toolbox de wavelet do software Matlab®*, representando um

total de 30 nós de energia. Estes valores foram adotados porque a quantidade de dados a ser analisados (eixo x) ainda permite uma interpretação visual fácil e portanto uma rápida interpretação dos resultados obtidos.

4.5.1 Aplicação da WTP – Motores NGD

A figura 4.12, mostra o gráfico dos coeficientes obtidos pela aplicação da WPT para o sinal de vibração do motor em condições normais de funcionamento, mostrado anteriormente na figura 4.7.

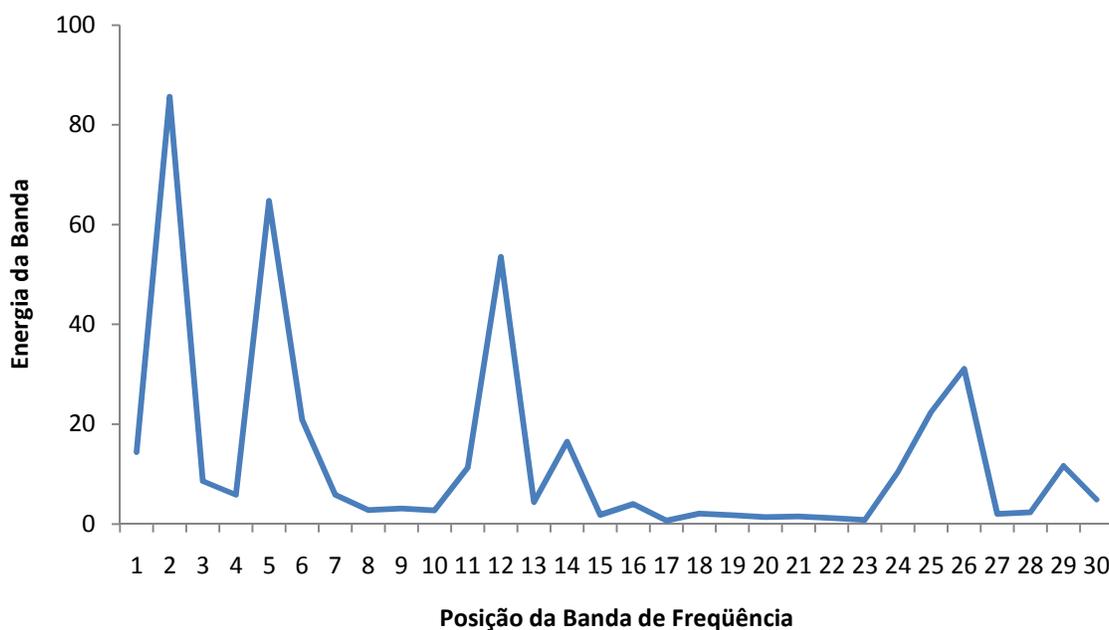


Figura 4.12 – Níveis de energia em cada banda da WTP, a 4000 rpm, com limite de medição a 2 kHz.

Observa-se que as bandas 1 e 2 representam o primeiro nível de divisão do sinal de 2 kHz, adquirido originalmente. A banda 1 é chamada de aproximação (A) e a banda 2 de detalhe (D). Na seqüência temos novamente a divisão das bandas 1 nas bandas 3 e 4 e para a banda 2 em 5 e 6. Logo a banda 3 contém as informações relativas à aproximação da banda 1 e a banda 4 as

relativas aos detalhes da 1 original. Este procedimento continua para todos os demais níveis de explosão da árvore. Esta análise segue a teoria da Análise de Multiresolução de Mallat - MRA, que divide o sinal em filtros de passa-baixa e passa-alta frequência, descrita no capítulo 2.

A tabela 4.1, mostra uma relação entre os nós (packets) que estamos analisando, em relação à fração da frequência do sinal contida no nó em questão.

Tabela 4.1 – Faixa de frequência analisada em cada uma dos nós.

1	[0 - 1000 Hz]	3	[0 - 500 Hz]	7	[0 - 250 Hz]	15	[0 - 125 Hz]		
						16	[125 - 250 Hz]		
				8	[250 - 500 Hz]	17	[250 - 375 Hz]		
						18	[375 - 500 Hz]		
		4	[500 - 1000 Hz]	9	[500 - 750 Hz]	19	[500 - 625 Hz]		
						20	[625 - 750 Hz]		
				10	[750 - 1000 Hz]	21	[750 - 875 Hz]		
						22	[875 - 1000 Hz]		
						5	[1000 - 1500 Hz]	11	[1000 - 1125 Hz]
								24	[1125 - 1250 Hz]
12	[1250 - 1500 Hz]	25	[1250 - 1375 Hz]						
		26	[1375 - 1500 Hz]						
		6	[1500 - 2000 Hz]	27	[1500 - 1625 Hz]				
				28	[1625 - 1750 Hz]				
14	[1750 - 2000 Hz]	29	[1750 - 1875 Hz]						
		30	[1875 - 2000 Hz]						

Conforme foi definido, a decomposição da WTP, foi realizada em 4 níveis (de energia), conforme indicado na tabela 4.1. Isto significa que o sinal adquirido foi dividido em 30 pacotes de energia (frações do sinal original).

Os valores de vibração em aceleração analisados a seguir foram adquiridos até o limite de 2.000 Hz. As medições foram realizadas conforme definido nos capítulos 3 e 4.

Uma vez definidos os critérios de medição, iniciamos a coleta de dados de motores considerados normais. Após a aplicação da WTP aos valores de vibração, percebeu-se que motores em condições normais de funcionamento apresentam níveis de energia muito semelhante

em cada um dos nós, em sua respectiva rotação. A figura 4.13 ilustra os resultados obtidos para dois motores do grupo 1 da família de motores NGD.

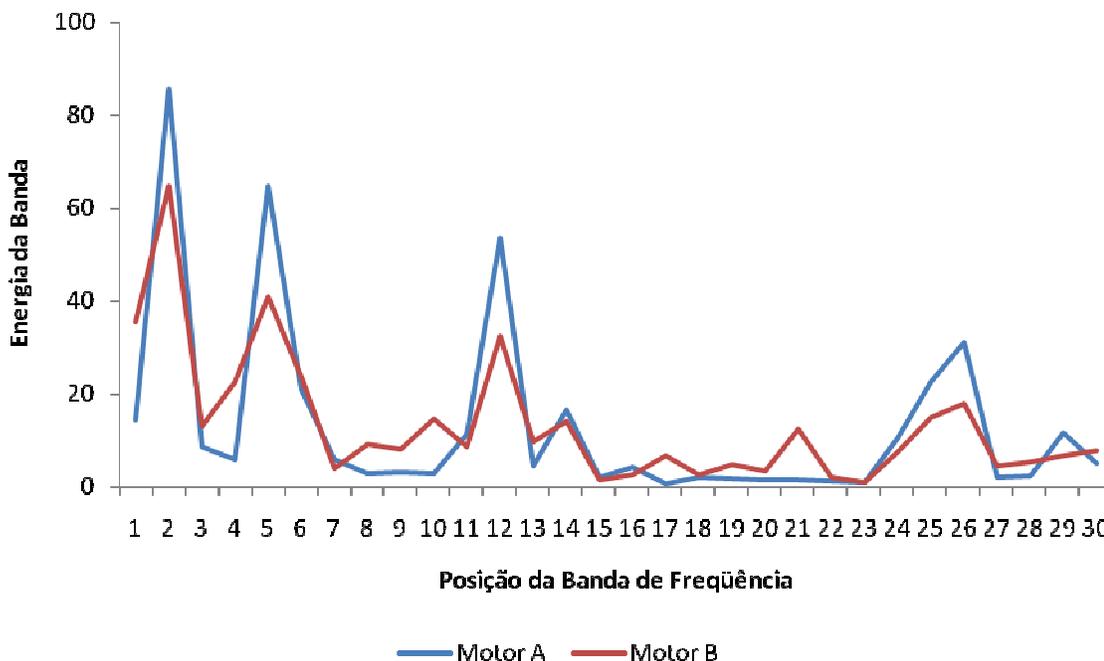


Figura 4.13 - Semelhança entre os níveis de energia de motores 2 motores , rodando a 4000 rpm em condições normais de funcionamento.

Além disso, a figura 4.12 indica que os picos de energia concentram-se nas bandas 2, 5, 12 e 26. Analisando a divisão do sinal mostrado na tabela 4.1, podemos verificar que as bandas citadas estão relacionadas entre si, compondo então uma das ramificações da árvore da WTP.

Uma análise de correlação foi utilizada para comprovar a semelhança da distribuição dos coeficientes de energia dos nós da WTP dos dois motores A e B para diferentes rotações medidas.

A equação 4.1, foi utilizada para análise de correlação dos coeficientes da WTP.

$$\frac{r_{AB}}{\sqrt{r_{AA} \cdot r_{BB}}} \quad (4.1)$$

O resultado obtido para os coeficientes de energia mostrados na figura 4.13 foi de 0,895. Isto significa uma correlação direta muito forte entre os motores analisados.

Conforme mencionado, a análise de correlação foi realizada para todas as condições de rotações avaliadas dos motores A e B e podem ser vistas na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Coeficientes de correlação para os resultados da WTP dos motores “A” e “B”.

RPM	3800	3600	3400	3200	3000	2800	2600	2400	2200	2000	1800	1600	1400	1200	1000
Coefic. de Correlação	0,863	0,969	0,969	0,971	0,875	0,978	0,987	0,897	0,929	0,964	0,963	0,97	0,823	0,976	0,905

Os coeficientes de correlação obtidos através da comparação entre os coeficientes de energia da WTP indicam que existe forte correlação entre ambos os motores analisados, para todas as faixas de rotação.

A próxima etapa foi a medição do espectro de vibração de um motor defeituoso. Para isto, foi introduzido um defeito conhecido no motor.

O defeito que simulamos no motor, foi um início de agarramento entre a bronzina de biela e o virabrequim. A figura 4.14, indica com detalhes o nível de desgaste do virabrequim utilizado. O defeito foi incluído em uma interface virabrequim com mancal. Neste caso a frequência de ocorrência do defeito no espectro será a própria frequência de rotação do virabrequim.



Figura 4.14 – Virabrequim do motor com sinais de agarramento, junto à posição de montagem da bronzina.

Na figura 4.15, temos o detalhamento dos níveis de energia obtidos pela aplicação da WTP para o motor defeituoso (Motor G – grupo 3), trabalhando a 4000 rpm na condição de máximo torque.

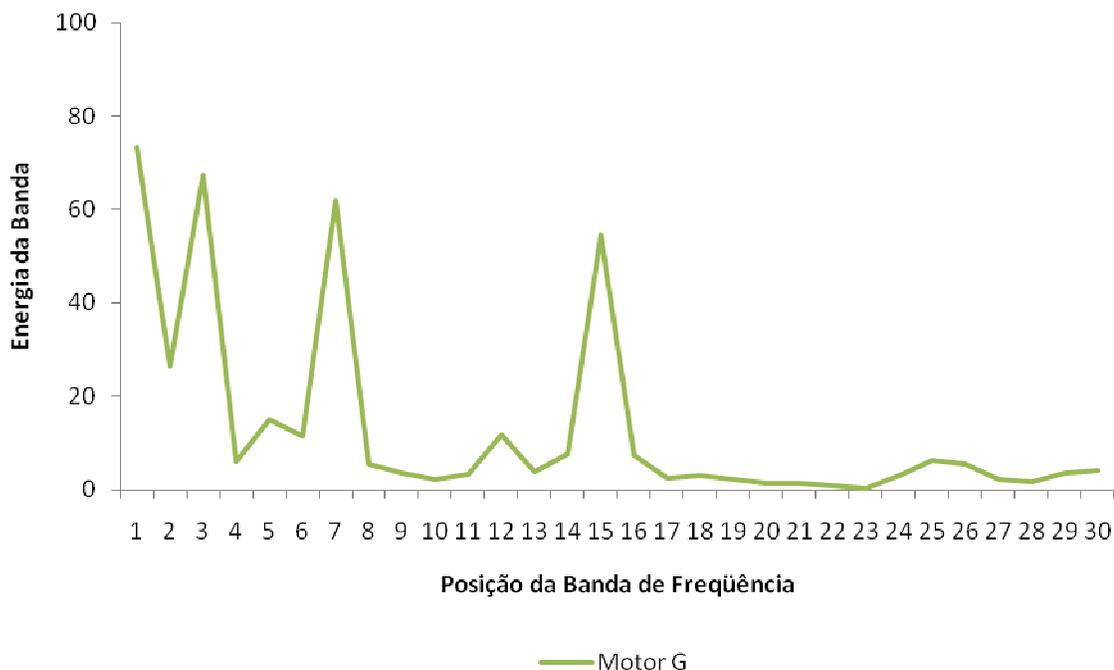


Figura 4.15 – Níveis de energia de aceleração para o motor (com início de agarramento) funcionando a 4000 rpm em máximo torque, obtido com base na WTP.

O espectro dos coeficientes de energia da figura 4.15 foi adquirido com o motor funcionando a 4000 rpm, o que representa uma frequência de rotação de 66,7 Hz. O defeito presente no espectro do motor analisado acima é um agarramento de mancal de biela, como o defeito existe em apenas uma das bielas, a frequência de ocorrência deste, será a mesma frequência de rotação do virabrequim do motor.

Como pode ser observado na figura 4.15, o sinal de vibração do motor apresentou picos de energia nas bandas 1, 3, 7 e 16. Comparando com os resultados mostrados na figura 4.13, podemos verificar que a distribuição de energia do motor com defeito, ocorre de forma diferente dos motores normais.

Com o objetivo de validar os resultados encontrados na análise do motor defeituoso, um segundo motor com o mesmo tipo de defeito foi preparado, sendo este submetido às mesmas

condições de teste. Os sinais de vibração foram novamente adquiridos para este novo motor e aplicou-se então a WTP as mesmas faixas de rotação. A partir dos resultados da WTP, utilizamos novamente a Análise de Correlação a ambos os motores defeituosos (G e H), obtendo então uma correlação de 91,2%, indicando forte correlação entre os resultados obtidos para os motores defeituosos, na condição de 4000 rpm, como pode ser visto na figura 4.16.

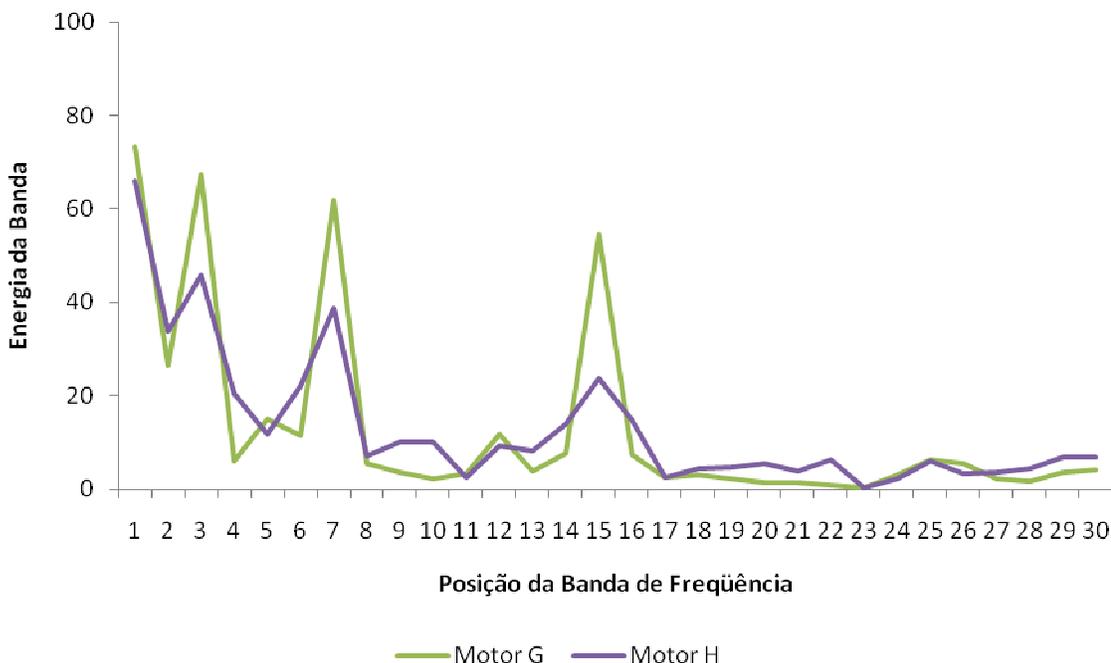


Figura 4.16 - Níveis de Energia para a condição de 4000 rpm, em máximo torque, de motores defeituosos.

Os resultados da análise de correlação para as demais condições de rotação dos motores “G” e “H” estão indicados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Coeficientes de correlação para os resultados da WTP para os motores “G” e “H”.

RPM	3800	3600	3400	3200	3000	2800	2600	2400	2200	2000	1800	1600	1400	1200	1000
Coefic. de Correlação	0,938	0,947	0,664	0,963	0,964	0,833	0,792	0,908	0,305	0,801	0,902	0,731	0,908	0,907	0,880

Uma vez que temos os espectros de vibração em aceleração para duas condições funcionais diferentes de um mesmo tipo de motor, grupo 1 e grupo 3, podemos sobrepor os espectros de vibração. Dessa forma será possível fazer uma comparação visual direta entre os

níveis de energia de motores com funcionamento normal para os motores com defeito (agarramento).

A seguir serão mostrados alguns gráficos dos níveis de energia dos motores analisados. A partir destes gráficos podemos fazer uma comparação, rápida e visual, das diferenças nos níveis de energia entre os motores normais e os motores defeituosos. Os motores com agarramento estão identificados nos gráficos a seguir como G e H, referentes ao grupo 3. Cada gráfico a seguir representa uma condição diferente de rotação do motor. Para todos os motores foram adquiridos os valores de vibração em dezesseis condições de rotação e na seqüência serão mostradas apenas as condições principais para não tornar a análise dos gráficos demasiadamente repetitiva. Portanto, apesar do grupo 1 ser constituído pelos motores A, B, C, D e E, serão mostrados apenas os resultados dos motores A e B deste grupo.

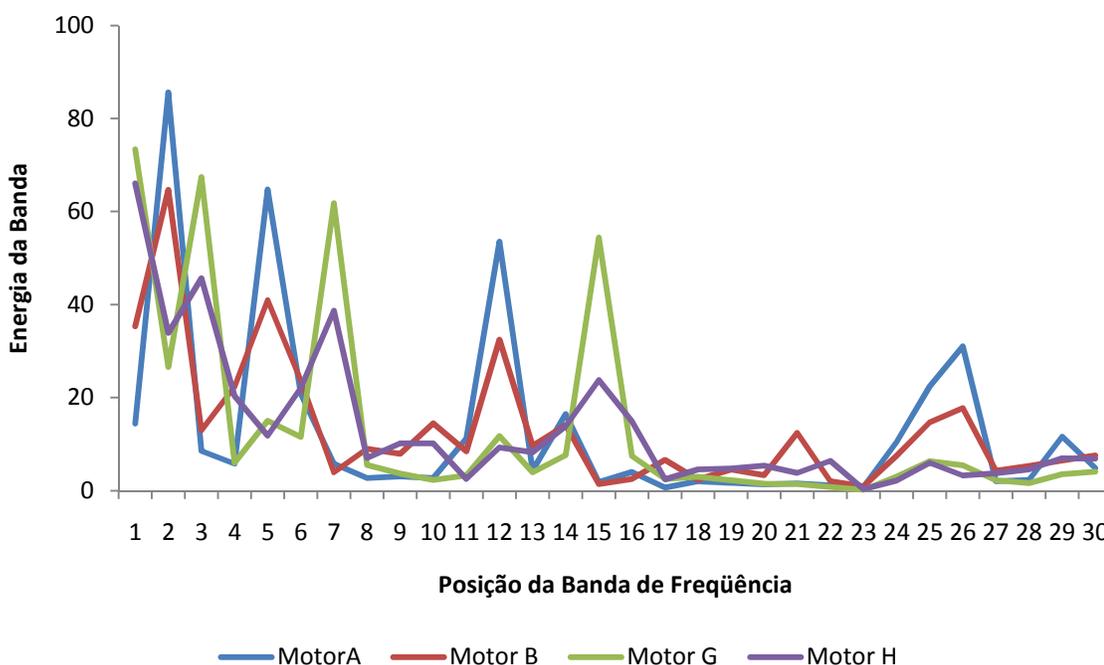


Figura 4.17 - Níveis de energia para a condição de 4000 rpm, em máximo torque.

Na figura 4.17 é possível identificar a diferença entre motores bons e o motor com agarramento através da distribuição dos picos de energia. Nos motores normais A e B (grupo 1), os valores máximos de energia encontram-se nas bandas 2, 5, 12 e 26. Para os motores com

agarramento G e H (grupo 3), os valores máximos de energia encontram-se nas bandas 1, 3, 7 e 15.

A análise de correlação dos resultados mostrados na figura 4.17, indica uma correlação superior a 89% entre os motores em condições normais de funcionamento e 91% entre os motores com agarramento. Quando comparamos motores normais em relação a motores com agarramento, o nível máximo de correlação é de 45%, indicando baixa correlação entre resultados. Índices de correlação inferiores a 70% não são considerados correlacionáveis.

Tomando como base a tabela 4.1, é possível construir um diagrama indicando a distribuição dos nós de máxima energia em cada um dos níveis de desdobramento da WTP, como pode ser visto na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Representação esquemática dos nós de maior energia de motores normais versus motores defeituosos para condição de 4000 rpm em cada um dos níveis de decomposição da WTP.

1										2					
3				4				5			6				
7		8		9		10		11		12		13		14	
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Motores Normais
 Motores com agarramento

Utilizando as mesmas condições de teste, porém agora para a faixa de 3600 rpm, todos os motores ensaiados apresentam valores máximos de energia nas bandas 2, 5, 12, 25 e 26, onde se encontram os valores máximos de energia de motores normais. Dessa forma, para esta condição de funcionamento (3600 rpm) não é possível identificar o motor com agarramento por estes critérios, como pode ser visto na figura 4.18.

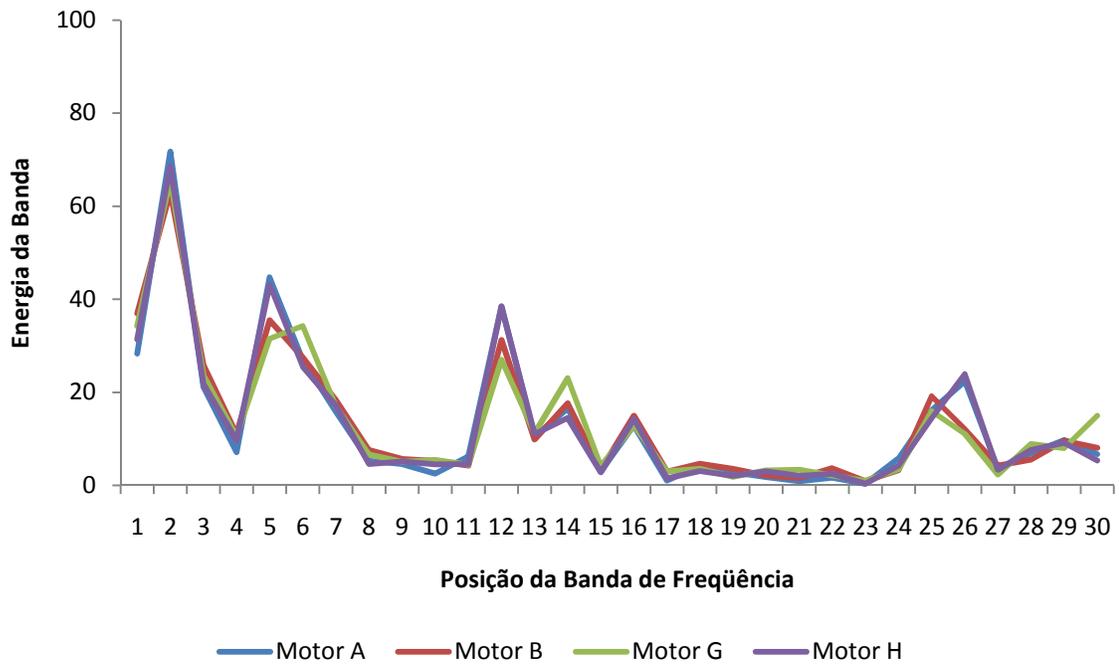


Figura 4.18 - Níveis de energia para a condição de 3600 rpm, em máximo torque.

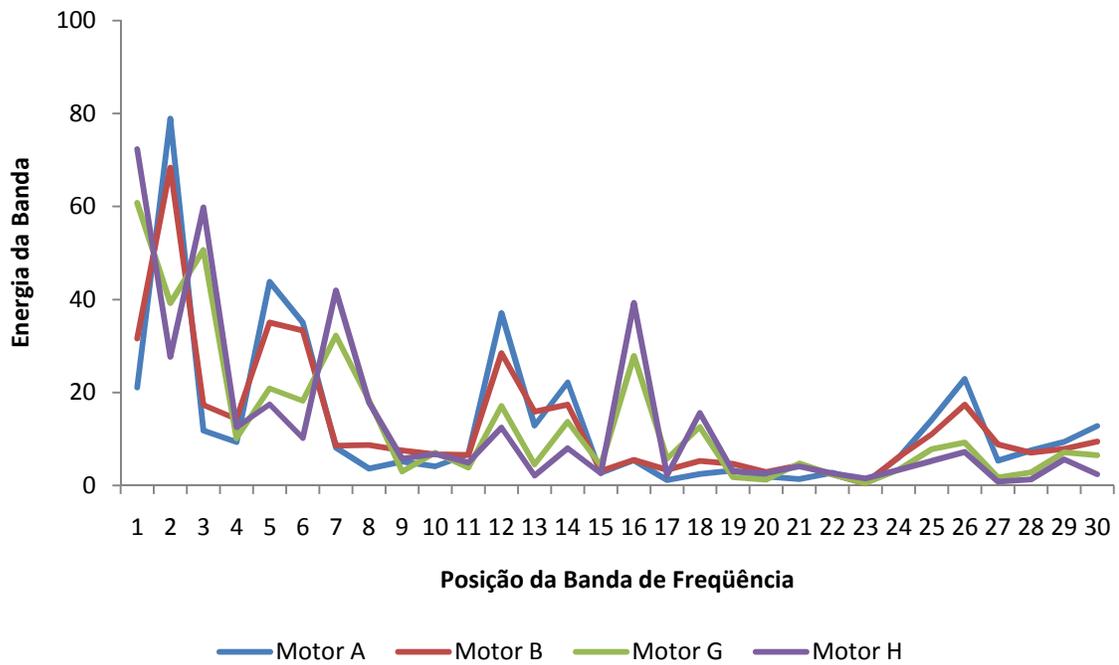


Figura 4.19 - Níveis de energia para a condição de 3200 rpm, em máximo torque.

Para a figura 4.19, agora na condição de 3200 rpm, novamente identifica-se uma distribuição de energia muito similar à observada na figura 4.17. Podemos perceber a diferença na localização dos nós de máxima energia em cada um dos quatro níveis de desdobramento da WTP.

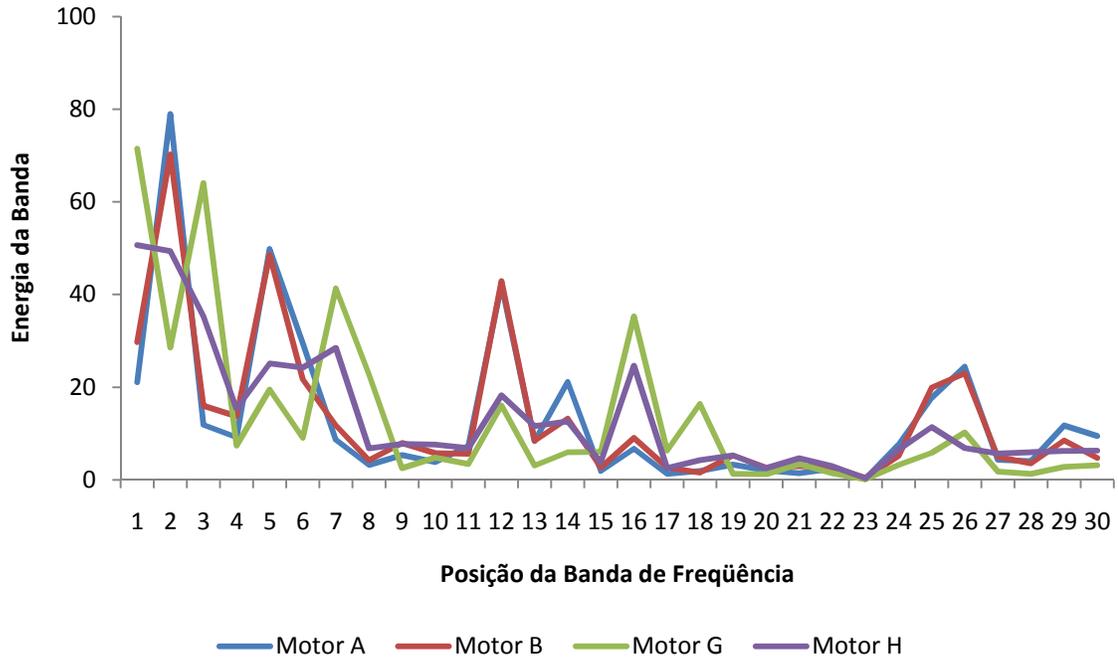


Figura 4.20 - Níveis de energia para a condição de 2800 rpm, em maximo torque.

A figura 4.20, agora na condição de 2800rpm, indica a mesma condição descrita para a figura 4.19.

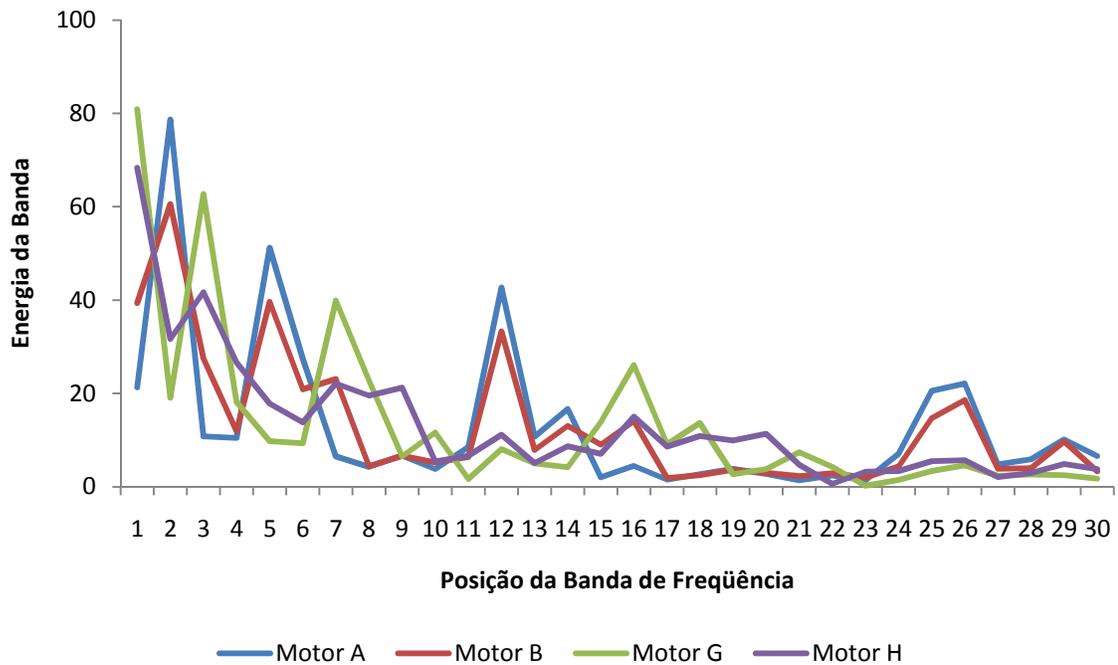


Figura 4.21 - Níveis de energia para a condição de 2400 rpm, em máximo torque.

A figura 4.21, agora na condição de 2400rpm, também mostra que existe uma diferença entre os coeficientes da WTP obtidos entre motores normais e motores defeituosos. A diferença de distribuição dos nós de máxima energia da WTP pode ser percebida nas faixas de rotação de 3200 até 2400 rpm, conforme foi indicado nas figuras 4.19, 4.20 e 4.21. Fora desta faixa de rotação, não foi possível afirmar que temos diferenças entre os motores analisados.

A figura 4.22 agora na condição de 2000rpm mostra os coeficientes da WTP obtidos para motores normais e motores defeituosos. Analisando a figura, percebe-se que também não é possível separar os motores normais dos motores defeituosos a partir dos coeficientes da WTP para esta condição de funcionamento do motor.

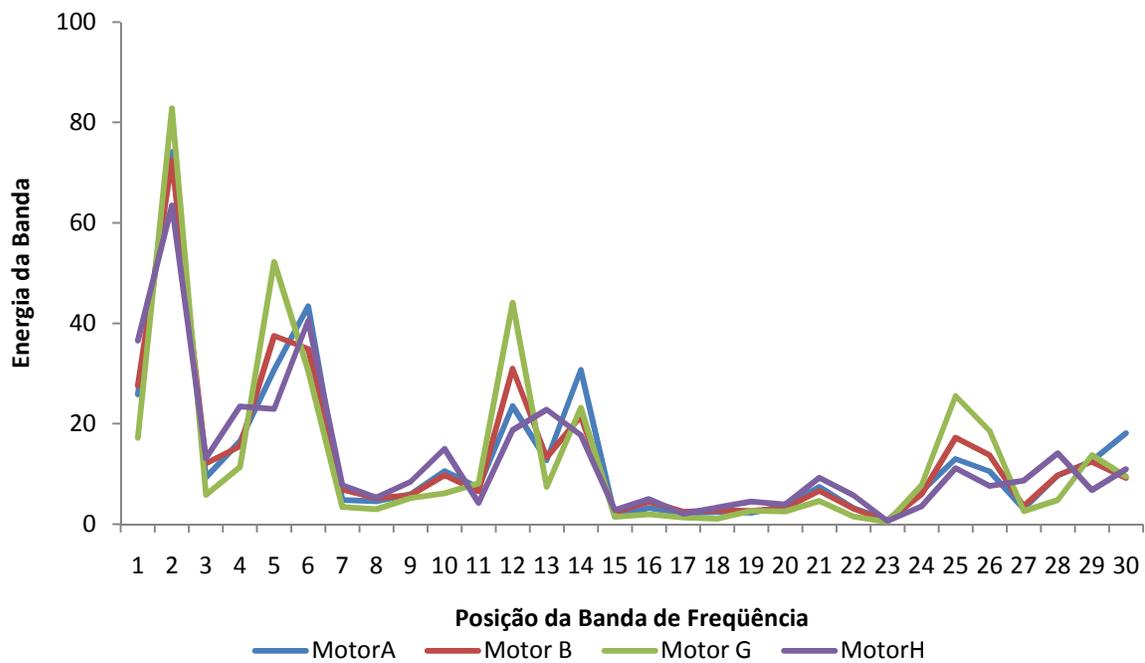


Figura 4.22 - Níveis de energia para a condição de 2000 rpm, em máximo torque

A figura 4.23 agora na condição de 1600rpm novamente indica a mesma observação da figura 4.22, onde não é possível fazer a identificação dos motores.

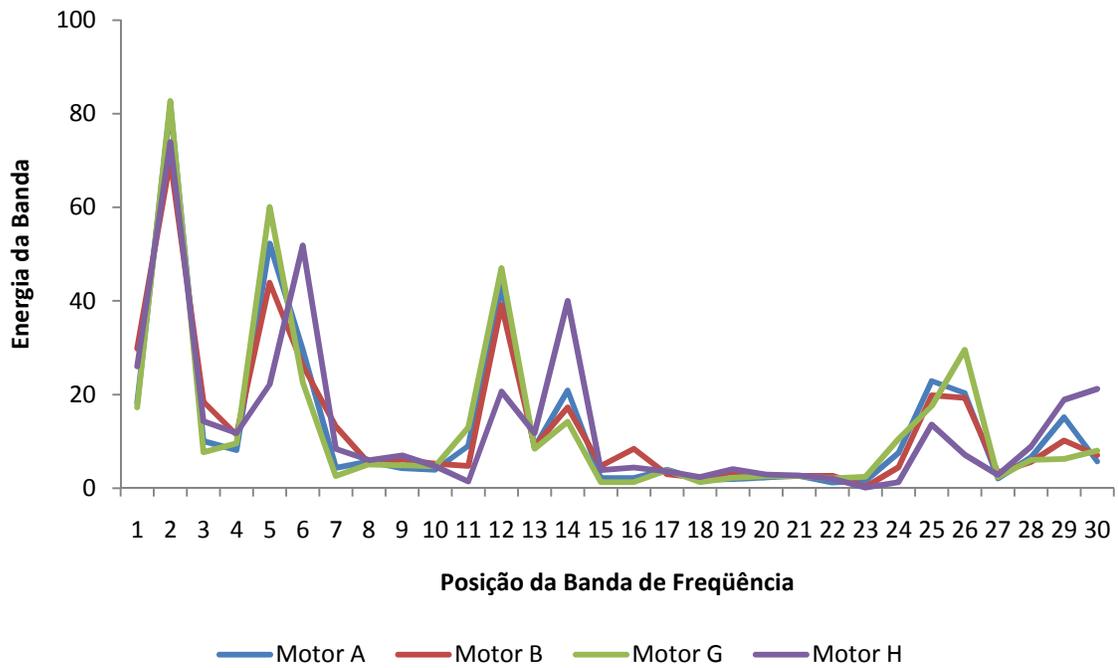


Figura 4.23 - Níveis de energia para a condição de 1600 rpm, em máximo torque.

A tabela 4.2 indicou que existe correlação dentro do grupo 1, composto por motores normais. A tabela 4.3 também indicou que existe correlação dentro do grupo 3, de motores defeituosos. Dessa forma na tabela 4.5 foi utilizado apenas um motor de cada um dos grupos para mostrar que existem condições de rotação, onde podemos identificar os motores defeituosos (correlação fraca) e outras onde não é possível fazer a separação (correlação forte).

Tabela 4.5 – Coeficientes de correlação para os resultados da WTP para os motores “A” e “G”.

RPM	3800	3600	3400	3200	3000	2800	2600	2400	2200	2000	1800	1600	1400	1200	1000
Coefic. de Correlação	0,750	0,950	0,573	0,471	0,463	0,280	0,140	0,103	0,063	1,000	0,986	0,980	0,929	0,987	0,976

4.5.2 Aplicação da WTP - Motores Sprint

Para este novo estudo de caso, utilizamos quatro motores do modelo Sprint, sendo dois deles em condições normais de uso (referentes ao grupo 1) e dois defeituosos (referentes ao grupo 3) onde ambos os motores defeituosos foram devolvidos por clientes. O fato de se utilizar motores com defeitos reais, sem ter de introduzi-los nos motores, foi de grande relevância para as análises. Os defeitos reclamados pelos clientes estão relacionados a ruídos durante o funcionamento, provavelmente originados pelo sistema de transmissão da caixa de engrenagens.

Os motores defeituosos foram submetidos ao teste de liberação de produção novamente, onde os mesmos foram considerados em condições de envio para o cliente. Isto reforça o fato mencionado na introdução, de que métodos objetivos de detecção de defeitos devem ser empregados, pois não existe uma padronização da percepção dos operadores, uma vez que esta percepção depende da habilidade dos mesmos.

Para este segundo grupo de motores, as medições de vibração foram executadas em uma faixa de 1200 a 3600 rpm. A faixa de rotação de medição teve de ser reduzida em função destes motores apresentarem características construtivas diferentes dos anteriores, não sendo possível medições a 1000 rpm e também acima de 3600 rpm.

Diferentemente da frequência máxima de análise de 2.000 Hz utilizada para os motores NGD, para os motores Sprint foi necessário trabalhar com uma faixa de frequência de análise de 10.000 Hz. Neste caso, para esta frequência de análise, utilizou-se uma frequência de amostragem de 25.000Hz.

A seguir serão mostrados os resultados obtidos para a implementação da WTP para os quatro motores Sprint, representando os grupos 1 e 3.

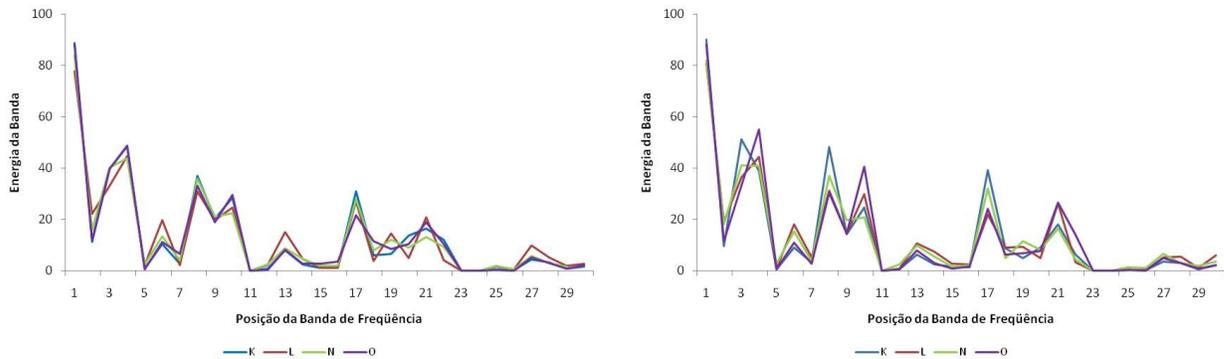


Figura 4.24 – Níveis de energia em cada um dos nós da WTP para (a) 3600 rpm (b) 3200 rpm.

A figura 4.24 indica os resultados obtidos para cada um dos quatro motores. Todos os motores são construtivamente similares, a diferença entre eles é que o motor *K* e o motor *O* são utilizados em aplicação veicular (passeio). O motor *L* e o motor *N*, são motores de aplicação pesada (caminhão). Os motores com reclamação de ruído são os motores *N* e *O*, referentes ao grupo 3. As condições de rotação da figura 4.24, não indicam diferenças nos níveis de energia, que permitam identificar os motores do grupo 1 em relação ao grupo 3.

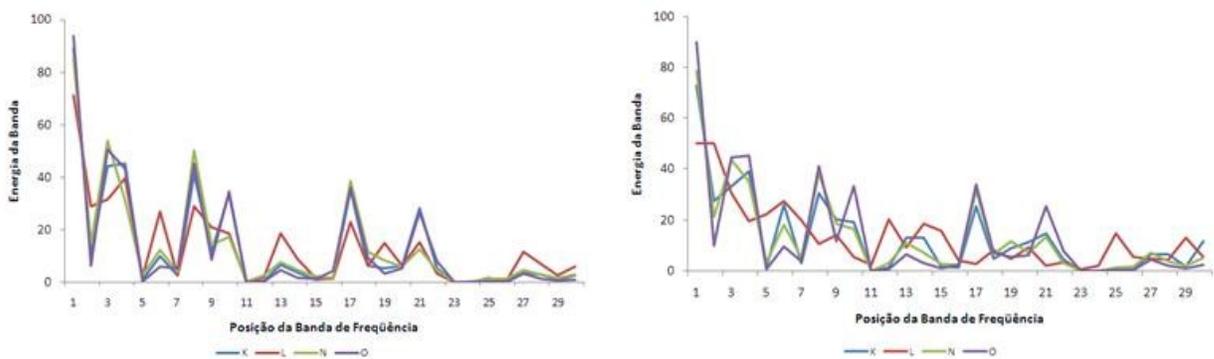


Figura 4.25 – Níveis de energia em cada um dos nós da WTP para (a) 2800 rpm (b) 2400 rpm

Para a condição de rotação indicadas na figura 4.25a, não é possível identificar diferenças nos níveis de energia obtidos pela WTP. Para a Figura 4.25b, é possível perceber algumas diferenças nos níveis de máxima energia, mas estes não são identificados para ambos os motores defeituosos.

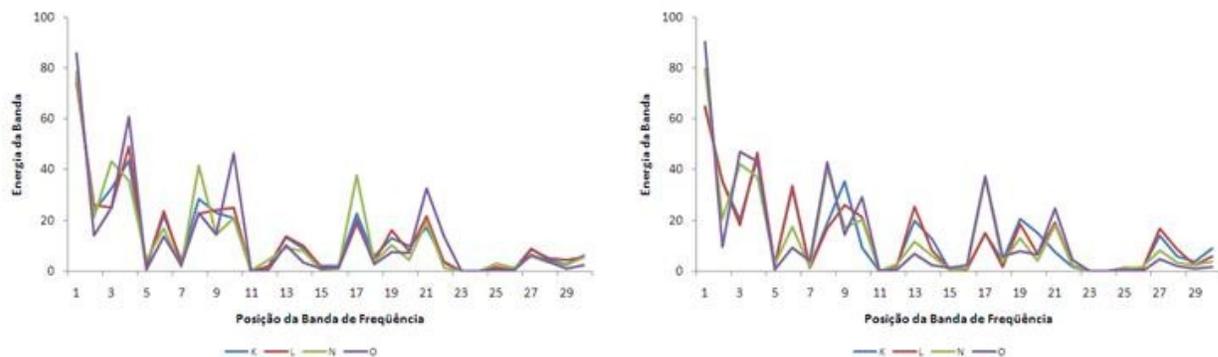


Figura 4.26 – Níveis de energia em cada um dos nós da WTP para (a) 2000 rpm (b) 1600 rpm

Na figura 4.26a e 4.26b, é possível identificar algumas diferenças nas distribuições dos níveis de máxima energia, principalmente para o nível de decomposição $j = 4$, representados pelos nós 15 a 30 da WTP. Essas diferenças, porém não são tão evidentes

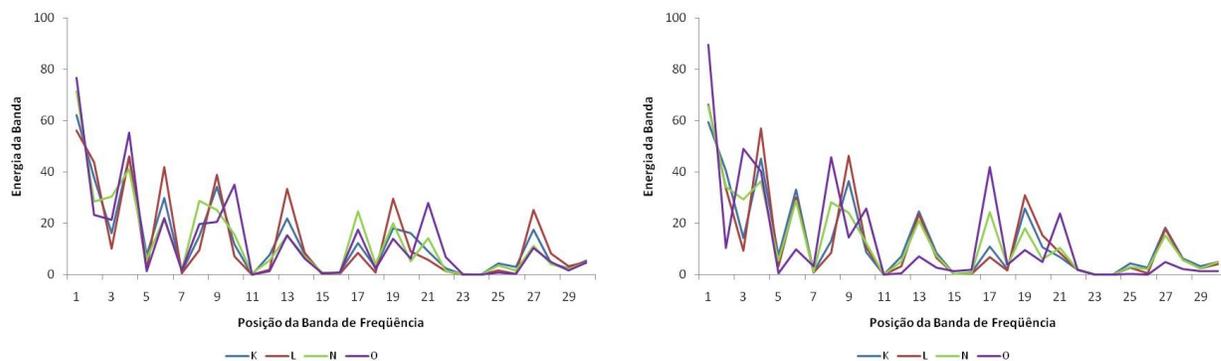


Figura 4.27 – Níveis de energia em cada um dos nós da WTP para (a) 1400 rpm (b) 1200 rpm.

A figura 4.27, mostra a distribuição dos coeficientes de energia para as condições de 1400rpm, figura 4.27a e 1200rpm para a figura 4.27b, onde não é possível identificar um padrão de distribuição dos coeficientes de energia que diferencie os motores do grupo 1 em relação ao grupo 3.

Para a faixa de rotação dos motores Sprint de 1.200 a 3600rpm aplicamos a mesma análise de correlação utilizada para os motores NGD. A tabela 4.6 mostra os resultados de correlação encontrados para os motores do grupo 1.

Tabela 4.6 – Coeficientes de correlação para os resultados da WTP para os motores “K” e “L”, grupo 1.

RPM	3600	3400	3200	3000	2800	2600	2400	2200	2000	1800	1600	1400	1200
Coefic. de Correlação	0,969	0,985	0,951	0,962	0,911	0,891	0,646	0,949	0,987	0,966	0,963	0,951	0,978

Os coeficientes mostrados na tabela 4.6 indicaram que existem forte correlação em praticamente toda a faixa de rotação analisada para os motores do grupo 1.

A análise de correlação foi realizada da mesma forma para os motores do grupo 3. Os resultados estão indicados na tabela 4.7

Tabela 4.7 – Coeficientes de correlação para os resultados da WTP para os motores “N” e “O”, grupo 3.

RPM	3600	3400	3200	3000	2800	2600	2400	2200	2000	1800	1600	1400	1200
Coefic. de Correlação	0,988	0,945	0,950	0,926	0,964	0,954	0,962	0,950	0,872	0,974	0,980	0,932	0,861

Para os motores do grupo 3, mostrados na tabela 4.7, obtivemos forte correlação para todas as condições de funcionamento.

Considerando que foram encontradas fortes correlação dentro dos grupos 1 e 3, utilizou-se apenas um motor de cada grupo para calcular a correlação entre grupos. Os resultados estão descritos na tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Coeficientes de correlação para os resultados da WTP para os motores “K “ e “N”, grupo 1 versus grupo 3.

RPM	3600	3400	3200	3000	2800	2600	2400	2200	2000	1800	1600	1400	1200
Coefic. de Correlação	0,968	0,959	0,978	0,871	0,879	0,900	0,472	0,802	0,943	0,848	0,774	0,764	0,614

Diferentemente dos resultados encontrados para motores NGD, a análise de correlação entre os resultados dos grupos 1 e 3 dos motores Sprint, mostrados na tabela 4.8 indica que existe correlação em praticamente todas faixa de rotação. Em alguns patamares de rotação a correlação está próxima ao limiar para considerarmos os resultados correlacionáveis.

4.6 Análise de Componentes Principais – ACP

Para ajudar nas análises, o método proposto também prevê a Análise de Componentes Principais - ACP, a qual pode reduzir o tamanho original da matriz de dados e ainda gerar polinômios de resposta, contribuindo assim na análise e criando uma resposta padrão.

4.6.1 Definição da Assinatura Padrão para Motores NGD

A ACP considera cada uma das condições de funcionamento do motor como um vetor de 30 dimensões. Isto ocorre em função de termos 30 colunas de dados, referentes aos 30 nós de energia obtidos da WTP.

As análises iniciais, executadas com a aplicação da WTP para o primeiro grupo de motores, incluíam dois motores normais e dois motores defeituosos.

Como a idéia com a ACP é criarmos um polinômio de resposta característico para classificarmos motores normais e ainda separarmos de motores defeituosos, no primeiro momento não serão utilizados motores defeituosos nas análises.

Para a aplicação da ACP utilizamos três grupos de motores, diferentemente da WTP onde apenas 2 grupos foram utilizados.

O primeiro grupo será utilizado para desenvolver o polinômio de resposta, que será utilizado como assinatura mecânica dos motores. Neste grupo serão utilizados apenas motores em condições normais de funcionamento, grupo 1.

O segundo grupo será utilizado para validar a resposta do polinômio. Este grupo também será composto apenas por motores em condições normais de funcionamento, pois o objetivo desta

análise é obter uma distribuição dos valores das componentes principais, similar ao primeiro grupo.

Um terceiro grupo será utilizado para verificar a capacidade do polinômio de identificar motores com defeitos, ou seja, apresentar uma distribuição visual dos valores das componentes principais diferentes das dos motores normais, logo este grupo será composto pelos motores devolvidos por nossos clientes.

Para elaboração do polinômio de resposta, utilizamos os motores NGD do grupo 1. A partir dos dados obtidos pela aplicação da WTP a este grupo de motores, aplicamos a ACP para a obtenção do conjunto de autovalores referentes aos 30 nós da WTP. A partir dos autovalores e com os coeficientes de energia da WTP, obtemos os autovetores e dessa forma escrevemos as equações das componentes principais.

Definidas as componentes principais, selecionamos as componentes principais significativas, a partir do somatório da representatividade das variâncias todas, conforme descrito no capítulo 2.

Para o grupo 1 dos motores NGD, CP1 representa 52,3% da variância total, a CP2 representa 23,8% da variância total e a CP3 equivale a 10,8% da variância total. O somatório das variâncias das três primeiras componentes principais equivale a 86,9% da variância total, que está de acordo com o critério do capítulo 2, onde definimos que as componentes significativas devem responder por 80 a 90% da variância total dos dados originais.

Uma vez conhecidas e determinadas as componentes principais que serão utilizadas, é possível gerar um gráfico de dispersão das resultantes das componentes principais referente a cada condição de funcionamento dos motores do grupo 1.

A figura 4.28 mostra a distribuição no plano ($CP1; CP2; CP3$) para as condições de funcionamento dos motores utilizados no desenvolvimento do polinômio de resposta.

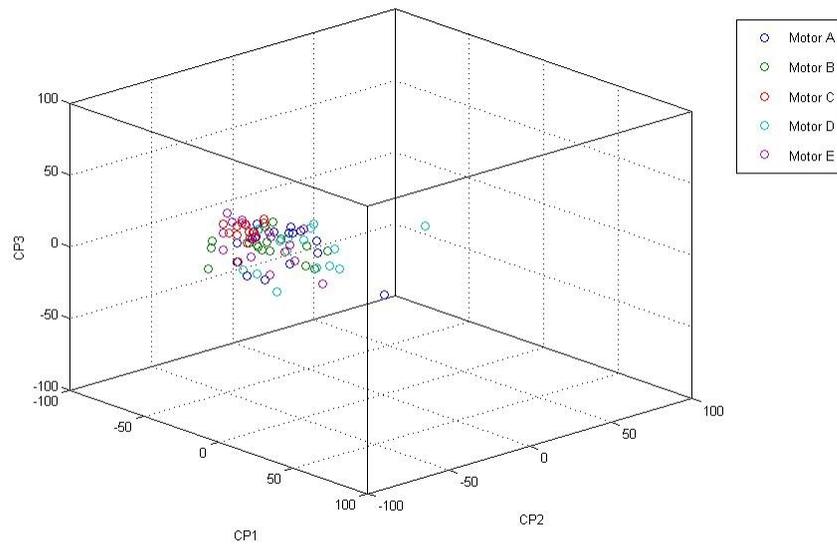


Figura 4.28 - Resultados obtidos a partir da Análise de Componentes Principais para 5 motores (grupo 1) em condições normais de funcionamento, no plano (CP1; CP2; CP3).

Aplicando as equações definidas a partir do grupo 1 ao grupo 2, que é similar ao 1, podemos comparar visualmente a distribuição das resultantes das componentes principais definidas.

A distribuição das resultantes das componentes principais relativas a grupo 2 estão indicadas na figura 4.29.

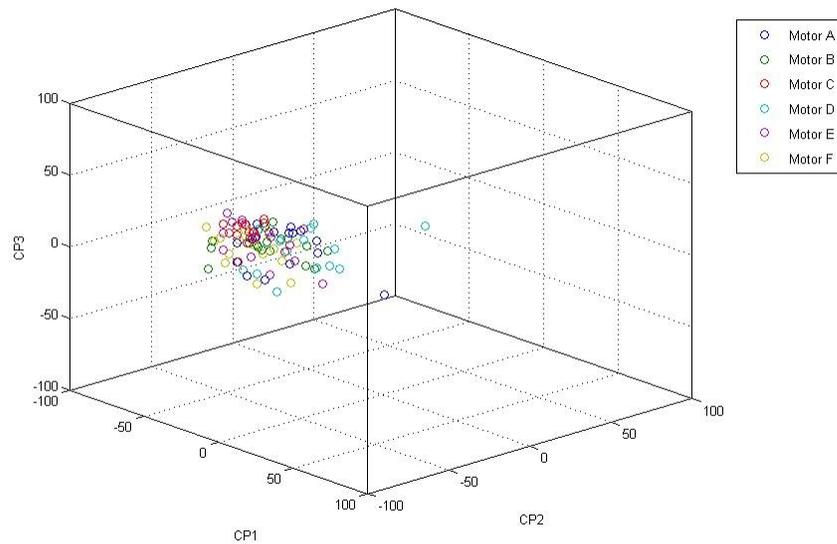


Figura 4.29 – Validação do polinômio de resposta. Motores *A, B, C, D, E* foram utilizados na elaboração do polinômio. Os vetores $CP1 \times CP2 \times CP3$ para o motor *F* foram obtidos a partir do polinômio já elaborado, no plano ($CP1; CP2; CP3$).

Os motores *A, B, C, D, E* são os mesmos indicados nas figuras 4.28 (grupo 1). O motor identificado como *F*, também é um motor em condições normais de funcionamento (grupo 2) e foi utilizado para validar a resposta obtida a partir do polinômio composto pelas equações das componentes principais selecionadas, indicado na figura 4.29.

Uma vez que o polinômio esteja adequadamente estabelecido e validado, para motores em condições normais de funcionamento (motores grupo 1 e 2), é necessário verificar a capacidade de resposta do polinômio quando os dados de entrada da WTP representem motores defeituosos. Para esta análise, utilizaram-se os motores do grupo 3, que apresentavam agarramento de biela.

As componentes principais referentes aos motores *A, B, C, D, E* e *F* serão mantidas no gráfico, formando assim uma assinatura padrão para os motores.

As componentes principais obtidas a partir da aplicação do polinômio estabelecido, aos resultados anteriormente obtidos para a WTP nos motores defeituosos estão indicadas na figura 4.30, como motores *G* e *H*:

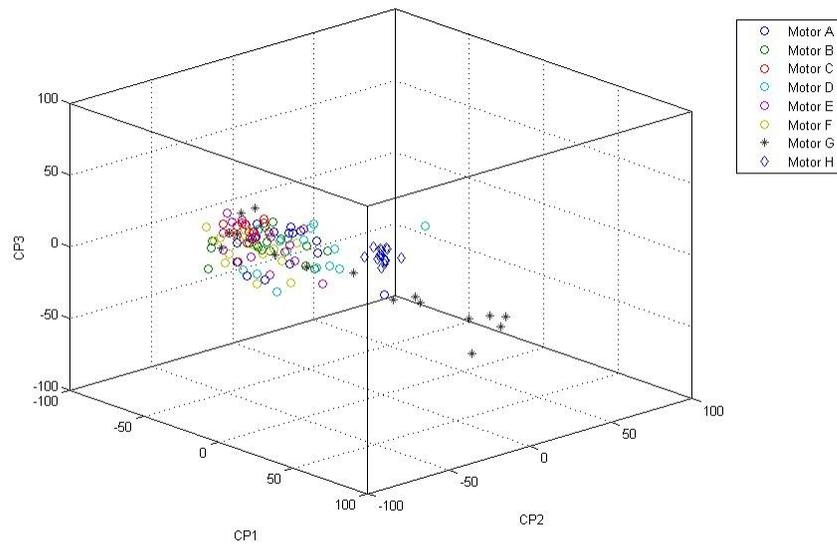


Figura 4.30 – Polinômio validado com motores defeituosos - Motores *A, B, C, D, E, F* são motores em condições normais de funcionamento. Os motores *G, H* são motores que apresentam agarramento de bronzina de biela, no plano (*CP1; CP2; CP3*).

Ao compararmos visualmente a distribuição das componentes principais para os motores *G* e *H*, podemos observar que tanto a localização quanto a dispersão dos valores são diferentes dos demais motores analisados até o momento. Esta condição confirma a capacidade do polinômio, obtido através dos coeficientes da ACP, de identificar e separar motores em condições normais de funcionamento de motores apresentando agarramento de bronzina de biela.

4.6.2 Definição da Assinatura Padrão para Motores Sprint

Assim como foi executado para os motores NGD, utilizaremos a ACP em conjunto com os resultados da WTP para um conjunto de motores Sprint. A família de motores Sprint também será dividida em três grupos de motores, da mesma forma que fizemos anteriormente.

O primeiro grupo será utilizado para desenvolver o polinômio de resposta, que será utilizado como assinatura mecânica dos motores. Neste grupo serão utilizados apenas motores em condições normais de funcionamento, grupo 1.

O segundo grupo será utilizado para validar a resposta do polinômio. Este grupo também será composto apenas por motores em condições normais de funcionamento, pois o objetivo desta análise é obter uma distribuição dos valores das componentes principais, similar ao primeiro grupo.

Um terceiro grupo será utilizado para verificar a capacidade do polinômio de identificar motores com defeitos, logo este grupo será composto pelos motores devolvidos pelos clientes.

Para definição do polinômio de resposta, foram utilizados dois motores correspondente ao grupo 1, em condições normais de funcionamento. A partir dos resultados das condições de funcionamento destes motores, foram obtidos os autovalores e as componentes principais. Utilizando o mesmo conceito para seleção das componentes principais significativas, utilizado anteriormente no item 4.6.1, foram selecionadas duas componentes principais, que correspondem a 82,1% da variância total dos dados, sendo a componente 1 equivalente a 70,1% e a componente 2 a 12,0%. Assim então, obtem-se os autovalores usados para definição das equações das duas componentes principais selecionadas, que formarão o polinômio de resposta para os motores.

A figura 4.31, mostra a distribuição no plano ($CP1$; $CP2$) das componentes principais, para os motores utilizados para definição do polinômio de resposta, grupo 1.

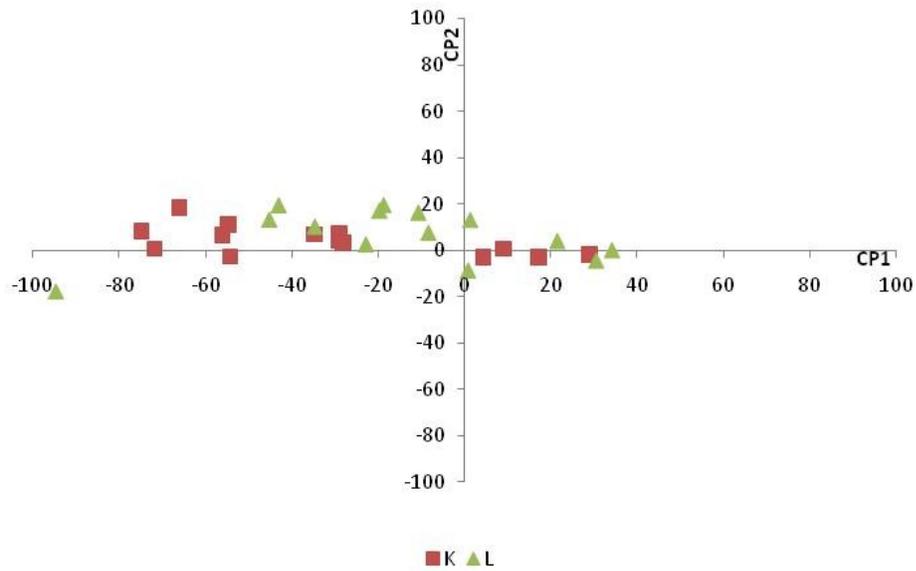


Figura 4.31 - Resultados obtidos a partir da Análise de Componentes Principais para motores Sprint, em condições normais de funcionamento, no plano bidimensional (CP1;CP2).

Definido o polinômio de resposta para verificação dos motores, uma validação do mesmo é necessária. Esta validação foi executada utilizando-se os coeficientes da WTP obtidos do grupo 2.

A partir do polinômio anteriormente definido, obtém-se as componentes principais significativas, para o motor M, referente ao grupo 2. A figura 4.32 mostra que a distribuição das componentes principais deste motor, é semelhante à do grupo de motores usados na determinação do polinômio de resposta.

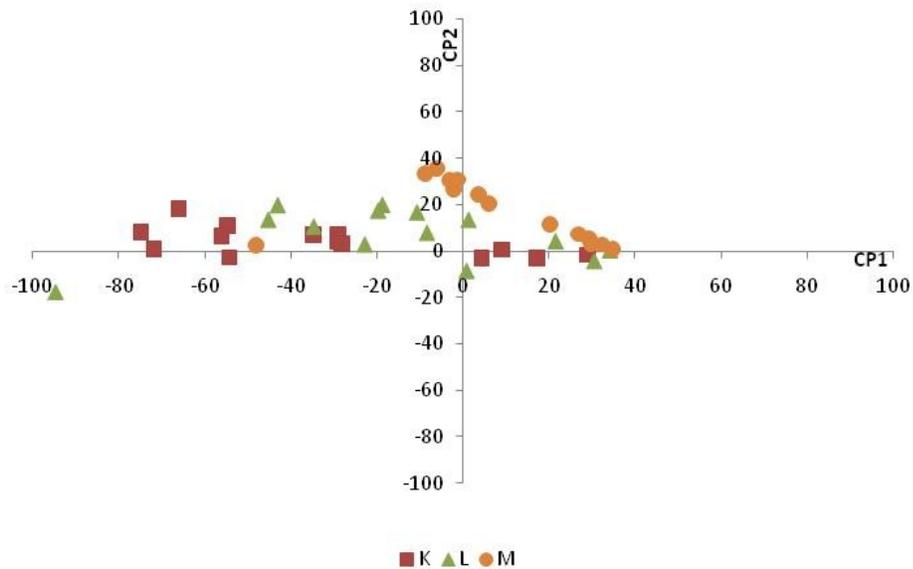


Figura 4.32 – Validação do polinômio de resposta. Motores K, L foram utilizados na elaboração do polinômio. Os resultados obtidos para o motor M utilizaram o polinômio já elaborado.

Concluída a definição e validação do polinômio de resposta para motores com funcionamento normal, grupos 1 e 2, verificaremos a capacidade de identificação do polinômio para motores defeituosos. Para isto, o polinômio de resposta será aplicado aos coeficientes da WTP obtidos para os motores do grupo 3.

A figura 4.33, mostra as componentes principais para os motores K, L que serão a base da assinatura mecânica, juntamente com o motor M utilizado na validação da assinatura. Além destes estarão indicados os motores defeituosos, representados como motores N e O .

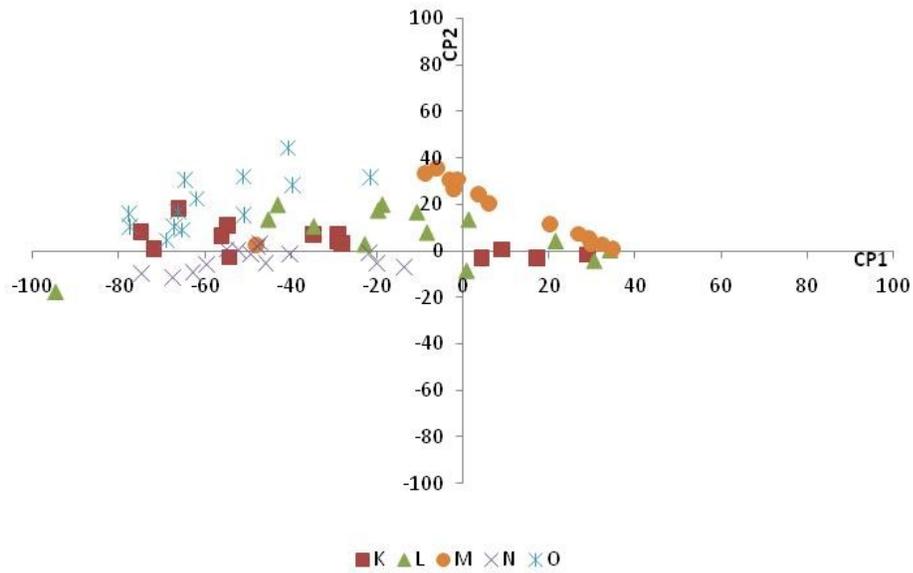


Figura 4.33 - Polinômio validado e verificado com os motores *K, L, M*. Os motores *N* e *O* são motores que apresentam ruído e foram devolvidos pelo clientes, indicado no plano bidimensional *CP1, CP2*.

A diferença percebida entre os motores normais utilizados para desenvolvimento e teste do polinômio de resposta e os motores defeituosos, foi que os motores normais apresentam uma maior dispersão das componentes principais em relação ao eixo *CP1*. Nenhum dos resultados referente aos motores defeituosos cruzou o ponto 0 do eixo *CP1*.

4.7 Discussão dos Resultados

Os resultados apresentados nas figuras 4.17, 4.19, 4.20 e 4.21 mostram que a WTP, indicou diferença nos níveis máximos de energia do motor defeituoso em relação aos motores NGD normais para praticamente toda a faixa de 2400 a 4000 rpm. Dentro desta faixa de rotação, não foi possível identificar diferenças entre os níveis de energia para as rotações de 3600 e 3800 rpm. Para faixa de rotação igual ou inferior a 2000 rpm, como ilustrado na figura 4.22 e 4.23, a WTP não apresentou resultados satisfatórios. Esta observação pode ser comprovada através da análise dos coeficientes de correlação indicados na tabela 4.5.

Para os motores Sprint, também foi percebido uma distribuição diferentes dos nós de máxima energia da WTP em cada um dos níveis. Esta diferença, porém não foi tão acentuada e constante quanto para os motores NGD.

A aplicação da WTP mostrou que os picos de energia ocorrem em nós de energia diferentes em algumas condições de funcionamento, quando comparamos motores em condições normais versus motores defeituosos. Essa condição foi melhor visualizada nas análises realizadas em motores da família NGD. Isso possibilitou que construíssemos um perfil de distribuição dos nós de maior energia em cada um dos níveis da WTP.

Percebeu-se também que em determinadas faixas de rotação não há separação de dados entre motores normais e motores defeituosos, esta percepção foi comprovada através da análise dos coeficientes da WTP identificada principalmente nos motores da família Sprint. Isso implica na necessidade de analisar toda a faixa de rotação utilizada na obtenção dos valores de vibração, para então verificar a condição de funcionamento do motor onde ocorram divergências.

A aplicação da WTP a famílias de motores construtivamente diferentes (NGD versus Sprint) apresentou uma distribuição dos nós de máxima energia diferentes, caracterizando assim que as avaliações com base na energia contida nos nós da WTP devem ser realizadas somente entre motores construtivamente semelhantes.

A utilização da ACP como um método em que seja possível analisar todas as condições de funcionamento do motor de forma simultânea, superou a falta de discriminação da WTP para algumas condições de funcionamento para a família de motores NGD.

A criação de um polinômio de resposta a partir dos coeficientes obtidos pela aplicação da ACP a um conjunto de motores conhecidos, em condições normais de funcionamento, mostrou-se um método eficaz de análise comparativa para os motores NGD. Isso foi comprovado com a aplicação do polinômio a um grupo de motores com defeito conhecido. Pode-se observar que a distribuição das componentes principais no plano ($CP1, CP2, CP3$) para o grupo de motores defeituosos é diferente do conjunto de motores considerados como referência. Entretanto para a família de motores Sprint, não foi possível assegurar a separação dos motores normais em relação aos motores defeituosos.

A utilização ACP requer que um grupo padrão de resultados seja estabelecido, sendo então esta uma análise comparativa. Este grupo padrão de resultados pode ser considerado como um assinatura padrão para um determinado tipo de motor.

5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

A WTP mostrou-se um método muito importante na análise dos padrões de vibração dos motores ensaiados, podendo ser aplicada como método de análise. Os resultados obtidos na WTP indicam que motores com características construtivas diferentes, precisam ser separados em grupos por similaridade construtiva para posterior análise.

Apesar de ser possível analisar diretamente os resultados dos motores a partir dos valores de energia obtidos pela aplicação da WTP, a mesma não apresenta capacidade de classificação dos motores para todas as faixas de rotação analisadas, o que dificulta sua implementação direta.

Como a WTP não apresentou condições de classificar os motores diretamente, a partir dos seus níveis máximos de energia nos nós, a utilização de algum método de pós-tratamento de dados torna-se bastante importante na análise dos resultados.

A utilização da ACP, como método de pós-tratamento de dados no caso dos motores NGD com o defeito de agarramento de bronzina, permitiu elaborar um polinômio capaz de diferenciar com clareza, motores em condições normais de funcionamento dos motores defeituosos. Dessa forma, foi possível estabelecer assinatura mecânica para os motores NGD a partir dos dados obtidos da WTP.

A utilização da ACP para os motores Sprint não apresentou o mesmo nível de classificação obtido para os motores NGD. Um dos motivos deste problema, pode estar relacionado ao tamanho de amostra utilizado para definição do polinômio, para os motores Sprint o número de amostras foi 2,5 vezes menor que o utilizado para os motores NGD. Além disso, para os motores NGD o defeito analisado foi introduzido e pode ser repetido. Para os motores Sprint foram utilizados defeitos reais dos motores e devido ao fato da disponibilidade baixa do mesmo tipo de defeito, isto pode ter influenciado na aplicação do método.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros nesta área, podemos sugerir os seguintes assuntos:

Aumentar os tamanhos de amostra utilizada para definição do polinômio de resposta, principalmente para os motores Sprint, permitindo assim um teste de normalidade dos resultados.

A simulação de outros tipos de defeitos, extrapolando assim os estudos utilizando a ACP para além de identificar os motores defeituosos, verificar a possibilidade de classificar o tipo de defeito a partir da distribuição dos vetores das componentes principais.

Implementar intervalos de confiança para os resultados obtidos através da ACP, definindo assim as áreas características de distribuição dos vetores, determinando assim uma forma totalmente objetiva de análise dos resultados.

Refazer as análises apresentadas neste trabalho, utilizando-se outras faixas de frequência limite de medição para os tipos de motores utilizados.

Referências

BARELLI, L., BIDINI, G., BURATTI, C., MARIANI, R. Diagnosis of internal combustion engine through vibration and acoustic pressure non-intrusive measurements. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, pp.1707-1713, 2009.

BRADLEY, J. N., BRISLAWN, C. M. Wavelet/scalar quantization compression standard for digital fingerprint images. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 1994, London, **Proceedings**.

CALVO, J. A., DÍAZ, V., SAN ROMAN, J. L, GAUCHÍA, A. Procedure for determining manufacturing defects in a diesel engine in a workshop. **Applied Acoustic**, v. 71, pp.140-146, 2010.

CHAN, Y. T. **Wavelet basics**. Boston: Kluwer Academic Publisher, 1995. 134p.

CHANG, Y., HU, Y. Fault diagnosis of marine diesel engine based on blind source separation. ICCAE International Conference on Computer and Automation Engineering, 2010, Singapore, **Proceedings**.

CHEN, A., DAI, X. Internal combustion engine vibration analysis with short –term Fourier transform. CIPS International Congress on Image and Signal Processing, 2010, Yantai, **Proceedings**.

CHUI, C. K. **An introduction to wavelets**. San Diego: Academic Press, 1992. 266p.

COIFMAN, R. R., WICKERHAUSER, M. V. Entropy- Based algorithms for best basis selection. **IEEE Transactions on Information Theory**, v.38, pp.713-718, 1992.

DAUBECHIES, I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. **IEEE Transactions on Information Theory**, v.36, pp.961-1005, 1990.

GENG, Z., CHEN, J., HULL, J. B. Analysis of engine vibration and design of an applicable diagnosing approach. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 45, pp. 1391-1410, 2003.

GRAPS, A. An Introduction to Wavelets. **IEEE Computacional Science & Engineering**, pp. 50-61, 1995.

HUBBARD, B. B. **The world according wavelets**, Natick: A K Peters, 1998. 330p.

JOHNSON, R. A., WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. Ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 767p.

LIMA, P. C. **Wavelets: Uma introdução**. Departamento de Matemática, ICEX , Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.

LIN, J. Feature extraction of machine sound using wavelet and its application in fault diagnostic. **NTD&E International**, v. 34, pp. 25-30, 2001.

LOPES, Luis F. Dias. **Análise de componentes principais aplicada à confiabilidade de sistemas complexos**, 2001. 138p. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MALLAT, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. **IEEE Pattern Analysis and machine Intelligence**, v.11, pp. 674-693, 1989.

MARTINA, Maurizio; TERRENO, Andrea; VACCA, Fabrizio. Real-time Implementation of a Time-frequency Analysis Scheme. 17th Great Lakes Symposium on VLSI, 2007, Stresa-Lago Maggiore, **Proceedings**

MIRANDA, Ubatan A. **Aplicação de métodos de análise tempo-freqüência ao estudo de sistemas rotativos**, 2002. 140p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi, J.-M. **Wavelet Toolbox – User’s Guide**. The MathWorks, Inc. 2011.

PENHA, Rosani M. Libardi. **Análise de sinais em regime transiente aplicando a técnica de wavelet**, 1999. 95p. Dissertação de Mestrado - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PERCIVAL, D. P., WALDEN, A. T. Wavelet methods for time series analysis

PINTO, L. A., GALVÃO, R. K. H. Combinação de modelos obtidos por regressão no domínio da wavelet. **Anais do CNMAC** v.2.

PRABAKAR, S., MOHANTY, A. R., SEKKAR, A. S. Application of discrete wavelet transform for detection of ball racing race faults. **Tribology International**, v.38, pp 793-800, 2002.

PRUVOST, L., LECLÈRE, Q., PARIZET, E. Diesel engine combustion and mechanical noise separation using an improved spectrofilter. **Mechanical System and Signal Processing**, v. 23, pp. 2072-2087, 2009.

RIOUL, O., VETTERLI, M. Wavelets and signing processing. **IEEE Signal Processing Magazine**, v. 8, pp 14-38, 1991

ROWE, A. C. **Engine defect source identification by enhanced signature analysis**. 1994. XXp. MSC application - Department of Mechanical, Automotive and Materials Engineering, University of Windsor, CITY.

SAMIMY, B., RIZZONI, G. Mechanical signature analysis using time-frequency signal processing: application to internal combustion engine knock detection. **IEEE**. V.84, pp. 1330-1343, 1996. **Proceedings**

SANTIAGO, Darley F. Arruda. **Diagnóstico de falhas em máquinas rotativas utilizando a transformada de wavelet e redes neurais artificiais**, 2004. 138p. Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SCHEFFER, C., HEYNS, P. S.. Wear Monitoring in turning Operations Using Vibration and Strain Measurements. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v.15, pp. 1185-1202, 2001.

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria a prática**, 2005. 215p. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

YEN, G. G., LIN, K. Wavelet packet feature extraction for vibration monitoring. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v.47, pp. 650-617, 2000.

ZHAN, YO-LONG; SHI, Zhu-Bin; SHWE, Theingi; WANG, Xiao-Zhong. Fault diagnosis of marine main engine cylinder cover based on vibration signal. Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2007, Hong Kong. **Proceedings**

ZHAN-FENG, Liu; JIAN-JIANG, Liu; PEI, Zheng. Study on engine vibration signal collection Method. 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science - **Proceedings**, ICIECS 2010.

ZHANG, L., XIAO, Y., ZHAO, Y., LUO, S. Technical research on unsteady vibration signal acquisition from automotive engine. **IEEE**, pp. 461-464, 2010. **Proceedings**