

11/00
121/5/11
9492x
TEC/MEM

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O MONITORAMENTO DE MOTORES DE
COMBUSTÃO INTERNA ATRAVÉS DA ANÁLISE DE SINAIS DE
PRESSÃO SONORA E VIBRAÇÃO**

DIRBI/UFU



1000189106

Dissertação apresentada
à Universidade Federal de Uberlândia por:

RICARDO CAMPOS VELOSO

como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica

Aprovada por:

Prof. Ph.D. Elias Bitencourt Teodoro – UFU

Eng. Marcos César – FIAT

Prof. Dr. Marcus Antônio Viana Duarte – UFU – Orientador

Prof. Ph.D. Samir Nagi Yousri Gerges – UFSC



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA
Av . João Naves de Ávila 2160 Campus Santa Mônica Uberlândia - MG 38408-100
Fone: 0342394149- FAX: 034 2394282

ALUNO: RICARDO CAMPOS VELOSO

NÚMERO DE MATRÍCULA: 5971615-8

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MECÂNICA DOS SÓLIDOS E VIBRAÇÕES

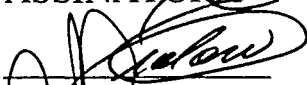



PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

Uma Contribuição para o Monitoramento de Motores de Combustão
Interna Através da Análise de Sinais de Pressão Sonora e Vibração

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcus Antonio Viana Duarte

A Dissertação foi APROVADA em reunião pública, realizada no Anfiteatro do Bloco 1X do Campus Santa Mônica, em 15 de junho de 1999, as 7 horas e 30 min , com a seguinte Banca Examinadora:

NOME	ASSINATURA
Elias Bitencourt Teodoro, Prof. Dr.	UFU 
Marcos Cézar de Lima e Souza, Prof. Dr.	FIAT  AUTOMOVEIS S/A
Marcus Antonio Viana Duarte, Prof. Dr.	UFU 
Samir Nagi Yousri Gerges, Prof. Dr.	UFSC 

Uberlândia, 15 de junho de 1999.

Meus agradecimentos:

- Ao professor Marcus Antônio Viana Duarte, pelo apoio, incentivo e amizade demonstrados durante o desenvolvimento do trabalho;
- À FIAT AUTOMÓVEIS S/A, por ceder os motores para o estudo realizado e pelo apoio técnico;
- Ao técnico da FIAT, Lúcio e ao funcionário da UFU, Benedito, que foram responsáveis pelo preparo dos motores;
- À FAPEMIG e FIEMG pelo suporte financeiro;
- A todos os companheiros que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	ix
SIMBOLOGIA	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUÇÃO	01
1 – MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	04
1.1 HISTÓRICO	04
1.2 RUÍDOS E VIBRAÇÕES EM MOTORES	08
1.2.1 PROCESSO DE GERAÇÃO DE VIBRAÇÃO E RUÍDO NOS MOTORES	09
2 – TÉCNICAS UTILIZADAS EM ANÁLISE DE SINAIS	12
2.1 MÉDIA NO DOMÍNIO DO TEMPO (TIME DOMAIN AVERAGE – TDA)	12
2.2 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FAST FOURIER TRANSFORM - FFT)	13
2.2.1 “ALIASING” (FANTASMAS)	15
2.2.2 “LEAKAGE” (VAZAMENTO)	16
2.3 CEPSTRUM	16
2.3.1 CEPSTRUM DE POTÊNCIA	17
2.3.2 CEPSTRUM COMPLEXO	17
2.4 TRANSFORMADA DE HILBERT	18
2.5 TÉCNICA DO ENVELOPE	20
3 – PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	22
3.1 DEFEITOS SIMULADOS	25

3.1.1 TENSOR DO ALTERNADOR RUMOROSO	25
3.1.2 TENSOR DA DISTRIBUIÇÃO RUMOROSO	26
3.1.3 BATIDO DE VÁLVULA	27
3.2 METODOLOGIA UTILIZADA	29
3.3 COMPORTAMENTO VIBRATÓRIO DO MOTOR EM FREQUÊNCIA	30
3.4 FREQUÊNCIAS CRÍTICAS DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DOS MOTORES	31
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 MOTOR BOM	33
4.2 TENSOR DA DISTRIBUIÇÃO RUMOROSO	43
4.3 TENSOR DO ALTERNADOR RUMOROSO	55
4.4 BATIDO DE VÁLVULA	68
4.5 TENSORES DO ALTERNADOR E DA DISTRIBUIÇÃO RUMOROSO	83
5 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA NOVOS TRABALHOS	100
5.1 CONCLUSÕES GERAIS	100
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

LISTA DE FIGURAS

	PÁGINA
1.1 - Fases do ciclo de quatro tempos	06
1.2 - Fases do ciclo de dois tempos	07
1.3 - Processo de geração de vibração e ruído nos motores	10
2.1 - Esquema da Média no Domínio do Tempo	13
2.2 - Ilustração do fenômeno de Aliasing	15
2.3 - Esquema da Técnica do Envelope	21
3.1 - Motor montado na UFU	22
3.2 - Esquema da montagem dos equipamentos	23
3.3 - Posicionamento do acelerômetro no motor	24
3.4 - Posicionamento do Medidor de Nível de Pressão sonora em relação ao motor	24
3.5 - Localização do Tensor do Alternador	26
3.6 - Localização do Tensor da Distribuição	26
3.7 - Esquema do posicionamento da pastilha entre a came e o tucho	28
3.8 - Esquema mostrando a distância entre o came e a pastilha	28
4.1 - Sinal de aceleração no domínio do tempo de um motor bom (850 rpm)	32
4.2 - Espectro de potência em bandas de 1/3 de oitava de um motor bom a 850 rpm	34
4.3 - Espectro simples de aceleração de um motor bom a 850 rpm	34
4.4 - "Zoom" na região de baixa frequência do espectro de aceleração do motor bom a 850 rpm	35
4.5 - Cepstrum do motor bom a 850 rpm	36
4.6 - Sinal de aceleração no domínio do tempo de um motor bom (3100 rpm)	37
4.7 - Espectro de potência em bandas de 1/3 de oitava de um motor bom a 3100 rpm	38
4.8 - Espectro simples de aceleração de um motor bom a 3100 rpm	38
4.9 - "Zoom" na região de 0 a 1000 Hz no espectro de aceleração de um motor bom a 3100 rpm	39
4.10 - Cepstrum do motor bom a 3100 rpm (aceleração)	39
4.11 - Sinal de pressão sonora no domínio do tempo de um motor bom (3100 rpm)	40
4.12 - Espectro de potência em bandas de 1/3 de oitava de um motor bom a 3100 rpm	41

4.13 - Espectro simples de pressão sonora de um motor bom a 3100 rpm	41
4.14 - "Zoom" na região de 0 a 1000 Hz no espectro de pressão sonora do motor bom a 3100 rpm	42
4.15 - Cepstrum do motor bom a 3100 rpm (pressão sonora)	42
4.16 - Sinais de aceleração de um motor bom e um com tensor da distribuição rumoroso, no domínio do tempo, a uma rotação de 850 rpm	43
4.17 - Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso	44
4.18 - Espectros dos motores bom e defeituoso	44
4.19 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 600$ Hz e $f_2 = 900$ Hz)	45
4.20 - Espectros dos envelopes dos sinais	45
4.21 - Sinal no tempo após uso do filtro ($f_1 = 2700$ Hz e $f_2 = 3700$ Hz)	46
4.22 - Espectros dos envelopes dos sinais	47
4.23 - Cepstrum dos sinais	47
4.24 - Sinais de aceleração de um motor bom e um com tensor da distribuição rumoroso, no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm	48
4.25 - Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso	49
4.26 - Espectros dos motores bom e defeituoso	49
4.27 - Sinal no tempo após uso do filtro ($f_1 = 2800$ Hz e $f_2 = 3600$ Hz)	50
4.28 - Espectro do envelope dos sinais	50
4.29 - Cepstrum dos sinais	51
4.30 - Sinais de pressão sonora de um motor bom e um com tensor da distribuição rumoroso, no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm	52
4.31 - Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso	52
4.32 - Espectros dos motores bom e defeituoso	53
4.33 - Sinais no tempos após uso do filtro ($f_1 = 7200$ Hz e $f_2 = 8000$ Hz)	53
4.34 - Espectros dos envelopes dos sinais	54
4.35 - Cepstrum dos sinais	55
4.36 - Sinais de aceleração de um motor bom e um com tensor do alternador rumoroso, no domínio do tempo, a uma rotação de 850 rpm	55
4.37 - Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso	56
4.38 - Espectros dos motores bom e defeituoso	56
4.39 - "Zoom" da região onde se tem as maiores variações	57
4.40 - Sinais no tempos após uso do filtro ($f_1 = 2800$ Hz e $f_2 = 3600$ Hz)	57
4.41 - Espectros dos envelopes dos sinais	58
4.42 - Cepstrum dos sinais	59

4.43 - Sinais de aceleração de um motor bom e um com tensor do alternador rumoroso, no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm	59
4.44 - Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso	60
4.45 - Espectros dos motores bom e defeituoso	60
4.46 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 2800$ Hz e $f_2 = 3800$ Hz)	51
4.47 - Espectros dos envelopes dos sinais	61
4.48 - Cepstrum dos sinais	62
4.49 - Sinais de pressão sonora de um motor bom e um com tensor do alternador rumoroso, no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm	63
4.50 - Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso	63
4.51 - Espectros dos motores bom e defeituoso	64
4.52 - "Zoom" das regiões onde ocorrem as principais variações	64
4.53 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_c = 1000$ Hz)	65
4.54 - Espectros dos envelopes dos sinais	65
4.55 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 1300$ Hz e $f_2 = 1900$ Hz)	66
4.56 - Espectros dos envelopes dos sinais	66
4.57 - Cepstrum dos sinais	67
4.58 - Sinais de aceleração de um motor bom e um com batido de válvula, no domínio do tempo, a uma rotação de 850 rpm	68
4.59 - Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso	69
4.60 - Espectros de um motor bom e um defeituoso	69
4.61 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 600$ Hz e $f_2 = 800$ Hz)	70
4.62 - Espectros dos envelopes dos sinais	71
4.63 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 1200$ Hz e $f_2 = 2000$ Hz)	72
4.64 - Espectros dos envelopes dos sinais	72
4.65 - Cepstrum dos sinais	73
4.66 - Sinais de aceleração de um motor bom e um com batido de válvula no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm	74
4.67 - Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso	74
4.68 - Espectros dos motores bom e defeituoso	75
4.69 - "Zoom" da região onde ocorrem variações entre os espectros	75
4.70 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 600$ Hz e $f_2 = 900$ Hz)	76
4.71 - Espectros dos envelopes dos sinais	77
4.72 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 3000$ Hz e $f_2 = 4000$ Hz)	78
4.73 - Espectros dos envelopes dos sinais	78
4.74 - Cepstrum dos sinais	79

4.75 - Sinais de pressão sonora de um motor bom e um com batido de válvula, no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm	80
4.76 - Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso	80
4.77 - Espectros dos motores bom e defeituoso	81
4.78 - "Zoom" das regiões onde ocorrem as principais variações	81
4.79 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 600$ Hz e $f_2 = 900$ Hz)	82
4.80 - Espectros dos envelopes dos sinais	82
4.81 - Cepstrum dos sinais	83
4.82 - Sinais de aceleração de um motor bom e um com tensores do alternador e da distribuição rumorosos, no domínio do tempo, a uma rotação de 850 rpm	84
4.83 - Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso	84
4.84 - Espectros dos motores bom e defeituoso	85
4.85 - "Zoom" das regiões onde ocorrem as principais variações	85
4.86 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 600$ Hz e $f_2 = 700$ Hz)	86
4.87 - Espectros dos envelopes dos sinais	86
4.88 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 2800$ Hz e $f_2 = 3700$ Hz)	87
4.89 - Espectros dos envelopes dos sinais	88
4.90 - Cepstrum dos sinais	88
4.91 - Sinais de aceleração de um motor bom e um com tensores do alternador e da distribuição rumorosos, no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm	89
4.92 - Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso	90
4.93 - Espectros dos motores bom e defeituoso	90
4.94 - "Zoom" da região onde ocorre a principal variação	91
4.95 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 2800$ Hz e $f_2 = 3800$ Hz)	91
4.96 - Espectros dos envelopes dos sinais	92
4.97 - Cepstrum dos sinais	93
4.98 - Sinais de pressão sonora de um motor bom e um com tensores do alternador e da distribuição rumorosos, no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm	94
4.99 - Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso	94
4.100 - Espectros dos motores bom e defeituoso	95
4.101 - "Zoom" das regiões onde ocorrem as principais variações	95
4.102 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 1150$ Hz e $f_2 = 1350$ Hz)	96
4.103 - Espectros dos envelopes dos sinais	96
4.104 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 7200$ Hz e $f_2 = 7800$ Hz)	97
4.105 - Espectros dos envelopes dos sinais	98
4.106 - Cepstrum dos sinais	99

LISTA DE TABELAS

	PÁGINA
3.1 - Freqüências naturais de alguns componentes do motor	30
3.2 - Freqüências de ressonância excitadas pelas possíveis fontes de rumorosidade dos motores	31
3.3 - Dimensões e rotação das polias e tensores	31
3.4 - Freqüências fundamentais de passagem dos rolamentos do motor	32
4.1 - Quefrências (e freqüências) relativas às polias e tensores, observadas a partir da Análise Cepstral	36
5.1 - Comportamento das técnicas utilizadas em relação aos defeitos estudados	100

4.75 - Sinais de pressão sonora de um motor bom e um com batido de válvula, no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm	80
4.76 - Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso	80
4.77 - Espectros dos motores bom e defeituoso	81
4.78 - "Zoom" das regiões onde ocorrem as principais variações	81
4.79 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 600$ Hz e $f_2 = 900$ Hz)	82
4.80 - Espectros dos envelopes dos sinais	82
4.81 - Cepstrum dos sinais	83
4.82 - Sinais de aceleração de um motor bom e um com tensores do alternador e da distribuição ruidosos, no domínio do tempo, a uma rotação de 850 rpm	84
4.83 - Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso	84
4.84 - Espectros dos motores bom e defeituoso	85
4.85 - "Zoom" das regiões onde ocorrem as principais variações	85
4.86 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 600$ Hz e $f_2 = 700$ Hz)	86
4.87 - Espectros dos envelopes dos sinais	86
4.88 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 2800$ Hz e $f_2 = 3700$ Hz)	87
4.89 - Espectros dos envelopes dos sinais	88
4.90 - Cepstrum dos sinais	88
4.91 - Sinais de aceleração de um motor bom e um com tensores do alternador e da distribuição ruidosos, no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm	89
4.92 - Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso	90
4.93 - Espectros dos motores bom e defeituoso	90
4.94 - "Zoom" da região onde ocorre a principal variação	91
4.95 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 2800$ Hz e $f_2 = 3800$ Hz)	91
4.96 - Espectros dos envelopes dos sinais	92
4.97 - Cepstrum dos sinais	93
4.98 - Sinais de pressão sonora de um motor bom e um com tensores do alternador e da distribuição ruidosos, no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm	94
4.99 - Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso	94
4.100 - Espectros dos motores bom e defeituoso	95
4.101 - "Zoom" das regiões onde ocorrem as principais variações	95
4.102 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 1150$ Hz e $f_2 = 1350$ Hz)	96
4.103 - Espectros dos envelopes dos sinais	96
4.104 - Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 7200$ Hz e $f_2 = 7800$ Hz)	97
4.105 - Espectros dos envelopes dos sinais	98
4.106 - Cepstrum dos sinais	99

LISTA DE TABELAS

	PÁGINA
3.1 - Frequências naturais de alguns componentes do motor	30
3.2 - Frequências de ressonância excitadas pelas possíveis fontes de rumoridade dos motores	31
3.3 - Dimensões e rotação das polias e tensores	31
3.4 - Frequências fundamentais de passagem dos rolamentos do motor	32
4.1 - Quefrências (e frequências) relativas às polias e tensores, observadas a partir da Análise Cepstral	36
5.1 - Comportamento das técnicas utilizadas em relação aos defeitos estudados	100

SIMBOLOGIA

a	Amplitude do sinal
A_n	Amplitude do cosseno
B	Intervalo de frequência
$C_c(t)$	Cepstrum Complexo
$C_p(t)$	Cepstrum de potência
$e(t)$	Envelope de $x(t)$
f	Frequência
f_c	Frequência de corte
f_{max}	Frequência de amostragem
$f_i(t)$	Frequência instantânea
f_1	Frequência inferior do filtro passa-banda
f_2	Frequência superior do filtro passa-banda
m	Razão de duração do sinal do período
M	Número de pontos por período
N	Número de períodos, Número de pontos
p	Parte inteira do sinal
q	Parte não inteira do sinal
t	Variável de tempo
t'	Variável de tempo
T	Tempo total
T_m	Período do sinal
T_p	Período básico
$x(iT)$	Períodos
$x(t)$	Amplitude do sinal amostrado no domínio do tempo
$\tilde{x}(t)$	Transformada de Hilbert
$X(f)$	Amplitude do sinal no domínio da frequência
$y(iT)$	Período médio
$z(t)$	Sinal analítico
Δt	Intervalo de tempo
ϕ	Fase do sinal
\mathfrak{F}	Operador da Transformada de Fourier
$\theta_i(t)$	Fase instantânea

VELOSO, R. C., 1999, "Uma contribuição para o Monitoramento de Motores de Combustão Interna Através da Análise de Sinais de Pressão Sonora e Vibração", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia MG

RESUMO

Pesquisas realizadas em Identificação, tanto de modelos quanto de parâmetros, são importantes e imprescindíveis à viabilização da utilização de procedimentos matemáticos-computacionais no desenvolvimento e aprimoramento de produtos industriais. Neste trabalho estudou-se a correlação existente entre a vibração e o ruído emitido, com os principais defeitos nos motores de combustão interna, tais como: batimentos de válvulas e tensores rumorosos. [A metodologia utilizada baseou-se em Análise de Assinaturas, onde foram utilizadas técnicas espectrais e de deconvolução para a identificação de fontes de rumorosidade.] As técnicas estudadas consistiram em: Análise Espectral, Análise Cepstral e Técnica do Espectro do Envelope. Através da comparação das respostas de motores com falhas, com as de motores em boas condições de uso, foi possível identificar e diagnosticar os defeitos existentes. Verificou-se a viabilidade da Análise Espectral e da Técnica do Espectro do Envelope para identificar e diagnosticar falhas em motores de combustão interna, sendo que a Análise Cepstral se mostrou ineficiente para os casos estudados.

Palavras Chave: Vibração, Ruído, Análise de Assinaturas, Motores.

VELOSO, R. C., 1999, " A Contribution for Internal Combustion Engines Monitoring Through Vibration and Sound Pressure Signals Analysis", M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG

ABSTRACT

Research in identification of models as well as parameters, are important and essential to make possible the use of mathematician-computational procedures in the development and improvement of industrial products. In this work the existing correlation between vibration and noise for the main defects in internal combustion engines, such as: valves chatter and noise tensors were studied. The methodology used was based on Signatures Analysis, with spectral and deconvolution techniques for the identification of noise sources. The studied techniques consisted of spectral analysis, Cepstral analysis and the Envelope Spectrum Technique. Through matching the responses of faulty engines with the responses of engines in good conditions, was possible to identify and to diagnosis the existing defects. Viability of the Spectral Analysis and the envelope spectrum technique to identify and to diagnosis faults in internal combustion engines was verified, and the Cepstral Analysis showed to be inefficient for the cases studied.

Keywords: Vibration, Noise, Signature Analysis, Engines.

INTRODUÇÃO

Atualmente o julgamento das condições de funcionamento dos motores testados em salas de prova ainda é feita de uma maneira subjetiva, onde o controle é realizado através da audição humana. A sensibilidade do ouvido humano em identificar ruídos é devidamente comprovada, porém é muito dependente de fatores externos e emocionais, além de ser baseado em critérios subjetivos de avaliação e não em critérios quantitativos e mensuráveis. Com o crescente aumento da tecnologia e das novas normalizações de qualidade, nos dias atuais, torna-se imprescindível o uso de ferramentas mais confiáveis no controle das linhas de produção das indústrias, de modo a se obter o melhor rendimento possível. Sendo assim, a busca por melhorias é uma constante que deve ser almejada sempre e a busca por novas ferramentas que melhorem o controle de qualidade e manutenção tornam-se de suma importância para o desenvolvimento das indústrias. O uso da Análise de Assinaturas como um meio de controle de qualidade de produção, é uma das técnicas que podem ser utilizadas para este fim.

Alguns pesquisadores tem utilizado a Análise de Assinaturas como um meio de detecção de fontes de defeitos em motores de combustão interna. Botton et al (1998), utilizou a Análise de assinaturas de Vibração como um método de detectar falhas em motores, tais como posicionamento incorreto da vela de ignição e motor fora do ponto. Um outro método que está sendo utilizado para a detecção de fontes de ruídos e vibração em motores é a Transformada de Wavelet. Vilarroel e Ágren (1997) mostram em seu trabalho que ruído de combustão e batida de pistão podem ser bem detectadas utilizando este procedimento.

A Transformada de Wavelet permite uma análise localizada em ambos os domínios do tempo e da frequência (Mamede, 1997), entretanto trata-se de uma ferramenta recente, foi desenvolvida por volta de 1980, sendo que poucos trabalhos nesta área (detecção de fontes de ruídos e vibração) foram realizados.

Há ainda outros métodos que vem sendo utilizado de modo a se predizer o ruído e a vibração proveniente dos motores. Seybert et al (1997), utilizam o Método de elementos de contorno e integral de Rayleigh para predizer o ruído radiado dos componentes dos motores, sendo que os resultados obtidos por ambos os métodos são compatíveis com os experimentais. Para a análise da vibração e do ruído impulsivo, emitido pelos motores de combustão interna, Lee e White (1997) utilizam um ALE (Adaptive Line Enhancer) de dois estágios, o qual tem a capacidade de realçar os sinais que estão misturados em um sinal ruidoso. Este método é usado para pré-processar os sinais para uma análise tempo-frequência

via métodos bilineares tais como distribuição de Wigner-Ville e distribuição de Choi-Williams (Lee e White, 1997).

A metodologia de Análise de Assinaturas é uma técnica bem conhecida, sendo que a análise de vibrações e ruídos são métodos amplamente utilizados, tanto em manutenção preditiva, como na parte de controle de qualidade de produção (Braun, 1986). Apesar de ser uma ferramenta de ampla utilização, a análise de vibrações ainda não é largamente utilizada como uma ferramenta de diagnóstico para máquinas alternativas, como motores de combustão interna, sendo que o seu uso, nesta categoria de máquinas, se restringe mais como uma ferramenta de manutenção (Botton et al, 1998). A explicação para este fato se deve a natureza complexa de tais máquinas, que envolvem um grande número de partes que se movem, tornando complicado a identificação das fontes de falhas.

Sistemas mecânicos os quais contém partes móveis, tais como motores de combustão interna, são constituídos por um sistema elástico o qual oscila em resposta à excitações, tais como variações de pressão nos cilindros, forças de impacto dos pistões e forças de inércia entre outras (Botton et al, 1998). Em condições normais de operação, é possível distinguir vários modos característicos de vibração e de emissão de ruído nos motores. Cada um destes modos é caracterizado por suas frequências e um padrão de amplitudes relativas refletindo as características físicas do sistema, como sua rigidez, sua massa, tolerâncias de ajuste e outros parâmetros que são inerentes a cada sistema. Partindo deste princípio, qualquer condição irregular de operação que resulte de variações das excitações ou mudanças nas características do sistema, teoricamente, será detectado através de uma comparação entre a Análise de Assinatura (Braun, 1986 e Botton et al, 1998) de motores em condições regulares e a de motores em condições irregulares, o que permite a identificação do tipo de falha, sendo portanto possível correlacionar o ruído emitido, com os principais defeitos nos motores de explosão, tais como: batimentos de válvulas, desbalanceamentos, folgas e outras falhas de montagem.

Tendo-se correlacionado os principais defeitos com os sinais obtidos, pode-se desenvolver uma série de procedimentos analítico-computacionais e experimentais a serem utilizados para a identificação de possíveis fontes de falhas nos motores de explosão montados numa bancada de teste.

Com este trabalho pretende-se verificar se é possível, a partir de testes realizados com motores de combustão interna trabalhando em vazio (sem carga), identificar falhas precoces nos mesmos utilizando as técnicas clássicas de Manutenção Preditiva.

Para atingir este objetivo, este trabalho está dividido nos seguintes capítulos:

- Capítulo I – Motores de Combustão Interna: É feita uma introdução sobre motores de combustão interna, onde se mostra o princípio básico de seu funcionamento, seu histórico e sobre vibração e ruídos em motores;
- Capítulo II – Técnicas Utilizadas em Análise de Sinais: Neste capítulo faz-se uma breve revisão das principais técnicas que são utilizadas em análise de sinais, tais como: Média no Domínio do Tempo, Transformada de Fourier, Cepstrum, Transformada de Hilbert e Técnica do Espectro do Envelope;
- Capítulo III – Procedimentos Experimentais: Este capítulo mostra os métodos utilizados para a aquisição dos sinais, o equipamento utilizado, os defeitos com os quais se trabalhou, a metodologia utilizada e algumas características físicas dos motores, freqüências naturais de alguns componentes e rotações de polias e tensores;
- Capítulo IV – Resultados e Discussão: Traz os resultados obtidos a partir das análises feitas e a discussão dos mesmos;
- Capítulo V – Conclusões e Propostas para Novos Trabalhos: São apresentadas as conclusões gerais obtidas a partir da realização deste trabalho, bem como propostas para futuros trabalhos;
- Capítulo VI – Referências Bibliográficas: Relação das referências bibliográficas utilizadas durante a execução deste trabalho.

CAPÍTULO I

MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

1.1 HISTÓRICO

Os motores de combustão interna tem como princípio de funcionamento, a geração de um trabalho mecânico obtido por intermédio da conversão físico/química de um material combustível, aproveitando a propriedade de expansão dos gases para mover um pistão, dentro de um cilindro, e converter este movimento linear em circular, por meio de manivelas (Baxa, 1982).

Apesar de apresentar perdas mecânicas no processo de conversão de movimentos e de requerer uma série de dispositivos para funcionar, ainda é o processo mais prático, adequado e que apresenta maior durabilidade. Já foram desenvolvidos motores de pistão livre, de pistões opostos sem cabeçote, turbinas, radiais, e motores *Wankel*, apresentando pouco ou nenhum sucesso.

Os motores de combustão interna podem ser classificados de vários modos:

- a) Pelo sistema de ignição do combustível:
 - Motores de ignição por centelha (tipo Otto)
 - Motores de auto-ignição do combustível (conhecidos como Diesel)

- b) Pelo ciclo operativo:
 - Motores de quatro tempos
 - Motores de dois tempos

- c) Pelo sistema de admissão do combustível:
 - Motores de carburação
 - Motores de injeção

Os primeiros avanços em relação ao desenvolvimento do motor de combustão interna, datam de antes do século XVIII. Durante a década de 1670, o cientista holandês, Cristhian Huygens, mostrou que trabalho útil poderia ser realizado explodindo pólvora em um recipiente

com um topo móvel. Alguns princípios básicos do motor a pólvora foram utilizados pelo francês Jean de Hautefeuille na mesma época. A complexidade de carregar o cilindro do motor com pólvora e a falta de controle sobre o processo de combustão, dificultavam seriamente a operação do motor, sendo que o mesmo não obteve propósitos práticos.

Em 1794, o inglês Robert Street patenteou o primeiro motor de combustão interna reciprocante que queimava um combustível gasoso e mistura de ar. Este motor necessitava para o seu funcionamento, de uma operação manual durante o processo que requeria grande atenção.

No fim do século XVIII e na primeira metade do século XIX, uma grande variedade de motores experimentais foram desenvolvidos ao redor do mundo por diversos cientistas e inventores. Entre 1860 e 1865, o francês Jean J. Etienne Lenoir, construiu e adaptou cerca de 500 motores. O motor de Lenoir assemelhava-se a um motor a vapor de dupla ação. Era um simples cilindro, horizontal, reciprocante com um eixo-manivela e um volante. Apresentava ignição por centelha elétrica e a mistura ar-combustível em cada corrida do pistão, sendo que o mesmo não tinha compressão.

Em 1866, Nikolaus August Otto e Eugen Langen desenvolveram um motor comercial de cilindro vertical, na Alemanha. Cerca de 5000 motores Otto-Langen foram produzidos.

Ao longo do século XIX, os cientistas tornaram-se mais atentos à baixa eficiência térmica e pobre economia do combustível dos primeiros motores de combustão interna. Muitas recomendações para melhorar a eficiência do motor foram feitas. O francês Beau de Rochas publicou um manuscrito em 1862, onde recomendava, para aumentar a eficiência do motor, um simples cilindro, com o seguinte ciclo de quatro fases:

- Admissão: Permite a entrada do combustível com o ar atmosférico no cilindro.
- Compressão: Comprime a mistura para aumentar a eficiência do processo.
- Combustão e expansão: Ignição do combustível provocando a expansão dos gases, gerando trabalho.
- Exaustão: Exaustão dos gases queimados.

Cada fase corresponde aproximadamente a uma corrida do pistão (figura 1.1).

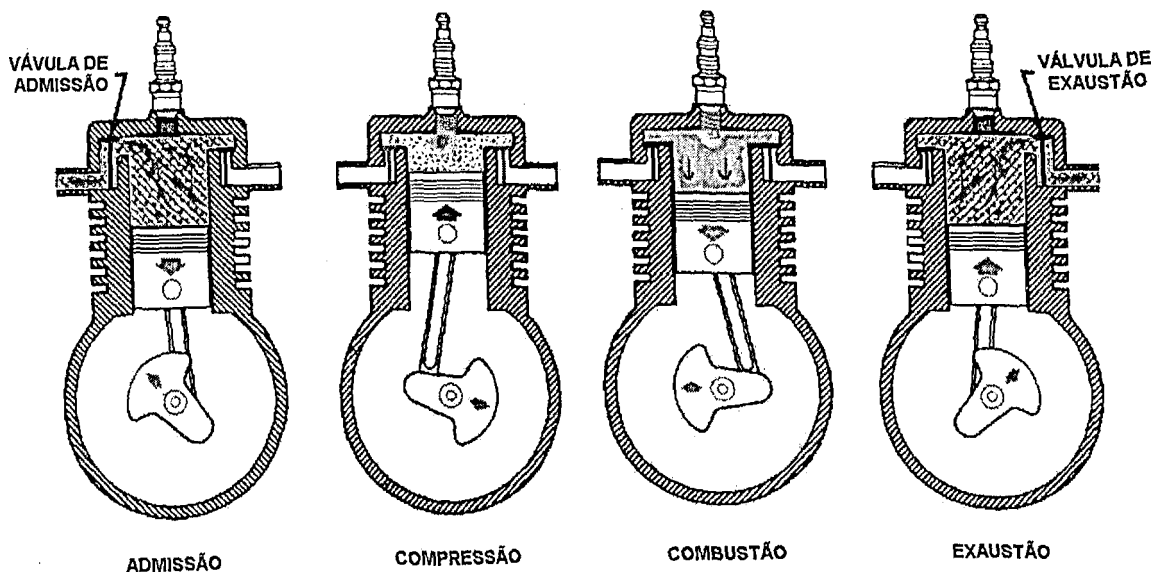


Figura 1.1: Fases do ciclo de quatro tempos.

Embora Beau de Rochas tenha formulado o ciclo de quatro tempos, ele nunca construiu um motor baseado na sua teoria. O conceito foi originalmente implementado por Nikolaus Otto, que em 1876 construiu um motor desenhado com os mesmos princípios básicos de Beau de Rochas. Em 1878, o motor de Otto, foi formalmente introduzido no mundo, e em 1890 cerca de 50000 motores de quatro tempos foram produzidos. Devido ao fato de Otto ter sido o primeiro a implementar o conceito de quatro tempos, motores baseados neste ciclo são comumente chamados de motores de ciclo Otto.

A operação básica dos motores de ignição por centelha de quatro tempos, permanece até hoje, sendo que vários desenvolvimentos ocorreram, como o aumento da velocidade de operação, acréscimo de eficiência e redução do tamanho e peso.

Em 1880, vários inventores tinham aplicado com sucesso o conceito de ciclo de dois tempos, para os motores de combustão interna. O motor com ciclo de dois tempos combina as etapas exaustão e admissão perto do fim do processo de combustão e expansão (figura 1.2).

Na maioria dos casos, o motor dois tempos não tem válvulas. A carga de combustível entra, e os gases são expelidos, através de portas nas paredes do cilindro. Um ciclo começa quando ocorre a ignição do gás comprimido, perto do ponto morto superior do pistão. Os gases em expansão empurram o pistão para baixo. Perto do ponto inferior do pistão, as portas de admissão e exaustão se abrem, expelindo os gases queimados do cilindro e transferindo nova mistura de ar-combustível para dentro do cilindro. As portas de exaustão e de admissão são novamente fechadas durante o processo de compressão. Durante o processo de combustão, uma nova carga da mistura ar-combustível é também admitida. Este processo pode ser visualizado pela figura 1.2.

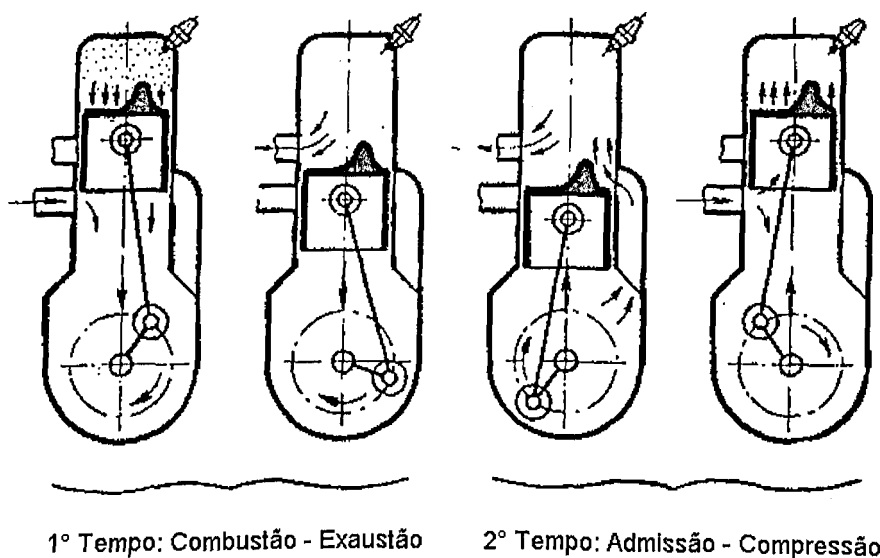


Figura 1.2: Fases do ciclo de dois tempos.

Os motores de dois tempos em geral são mais simples e baratos de se construir do que os motores de quatro tempos, além de apresentarem uma taxa de peso/potência mais alta. Entretanto eles tem uma grande desvantagem, apresentam uma menor eficiência de combustível o que resulta em níveis maiores de poluentes do ar.

Em 1892, o cientista alemão, Rudolf Diesel propôs um motor de quatro tempos que poderia queimar querosene sem faísca de ignição. Seu primeiro motor bem sucedido foi completado em 1897.

O ciclo Diesel é similar ao ciclo Otto, exceto que uma taxa muito maior de compressão é requerida, e o ar sozinho, ao contrário da mistura combustível, entra no cilindro durante a admissão. Durante a compressão, o ar no cilindro é comprimido a uma alta pressão. Esta rápida compressão promove um aumento de temperatura que é suficiente para promover a ignição espontânea do combustível, o qual é injetado dentro do cilindro perto do começo da fase de expansão.

Rudolf Diesel é tido como o responsável pelo desenvolvimento dos motores de auto-ignição do combustível, sendo por isto que estes motores são conhecidos como motores Diesel.

1.2 RUÍDOS E VIBRAÇÕES EM MOTORES

Em motores de combustão interna, o ruído emitido é geralmente classificado como gerado pela estrutura e gerado pelo ar (Lee e White, 1997). Ruído gerado pela estrutura é aquele gerado pela vibração de objetos, os quais são excitados através dos caminhos de transmissão entre a localização das forças motoras e os pontos de medição. Ruído gerado pelo ar é aquele originado pelo fluxo turbulento de ar.

As forças de excitação podem ser classificadas em três classes:

- Forças de Combustão: São aquelas induzidas pela ignição da mistura ar/combustível e são repetidas a cada duas revoluções do virabrequim.
- Forças Inerciais: Decorrente da inércia dos componentes.
- Forças Mecânicas: São forças geradas pelo impacto entre os componentes e aumentam a medida que se tem um acréscimo da distância entre os componentes, ou a medida que se aumenta a velocidade das partes em movimento.

As forças de combustão geram componentes de meia ordem e seu espectro é distribuído sobre um largo intervalo de frequência, com o decaimento da energia como uma função da frequência (Lee e White, 1997). Já no caso das forças inerciais, os componentes de primeira e segunda ordem dominam os termos de ordem superior.

A cabeça do cilindro, pistão e biela são tão rígidos, considerando os caminhos de transferência, que não são excitados significativamente pelas forças de combustão e de impacto. Já o virabrequim, o bloco do motor e válvulas de admissão e escape, são menos rígidos e podem ter frequências naturais na região de interesse. Estes componentes são excitados em vibração pelas forças de combustão e inerciais, seu espectro tem harmônicos com um período de duas vezes a taxa de rotação e picos nas suas frequências naturais. Esta vibração excita componentes tais como a tampa e reservatório de óleo. A partir desta análise pode-se verificar a existência de várias fontes de ruído em motores, entretanto pode-se classificar os ruídos em cinco grupos principais (Lee e White, 1997):

- Ruídos Periódicos: Caracterizados por harmônicos na velocidade de rotação do motor;
- Ruídos gerados pela vibração de ressonância das estruturas com baixo amortecimento: Espectros são bandas limitadas com linhas espectrais discretas;
- Sinais tonais de alta frequência: Espectros com componentes de alta frequência, são gerados por componentes em rotação tais como ventilador do radiador e alternador;

- Ruídos de banda larga: Presença de harmônicos na velocidade de rotação do motor, gerados pelo fluxo de ar de admissão e exaustão;
- Ruídos impulsivos: Gerados pelo impacto de abertura e fechamento das válvulas e impacto dos pistões entre outros.

O ruído em motores de combustão interna pode também ser classificado através de outros métodos (Baxa, 1982). Dois modos típicos de ser classificar o ruído são os seguintes:

- Classificado pelas características do ruído:
 - Ruído aerodinâmico: Incluem o ruído de exaustão e admissão dos gases, bem como o ruído gerado pelos ventiladores de refrigeração, ventiladores auxiliares e outros.
 - Ruído de Combustão: Refere ao ruído emitido da vibração das superfícies da estrutura do motor, dos componentes do motor e acessórios excitados pelas forças de combustão.
 - Ruído Mecânico: Refere ao ruído gerado pela vibração das superfícies do motor, dos componentes e acessórios excitados pela rotação e movimento recíprocante dos componentes.
- Classificado pela fonte do ruído:
 - Ruído do sistema de exaustão: Inclui o ruído dos pulsos do gases de exaustão saindo, e o ruído emitido pela vibração das superfícies dos componentes do sistema de exaustão.
 - Ruído dos sistema de admissão: Inclui o ruído gerado pelo fluxo de ar através do sistema de entrada e o ruído emitido pela vibração dos componentes do sistema de admissão.
 - Ruído do sistema de refrigeração: Ruído gerado pelo ventilador do radiador e seus componentes.
 - Ruído da superfície do motor: Refere ao som emitido da vibração dos componentes do motor e acessórios. As forças de excitação são originadas da combustão e impacto dos componentes em rotação e movimento.

1.2.1 PROCESSO DE GERAÇÃO DE VIBRAÇÃO E RUÍDO NOS MOTORES

A pressão do gás no cilindro aplicada ao pistão e à cabeça do cilindro por compressão, combustão e expansão do ar e do combustível na câmara de combustão produzem forças de excitação, as quais geram vibração e ruído de combustão. Já o ruído mecânico é aquele que ocorre devido à vibração gerada pelo impacto entre partes móveis, tais como batida do pistão e impacto das cames do comando de válvula, e os impactos gerados pelo movimento através das folgas dos mancais.

As forças aplicadas interagem com a estrutura causando transmissão de vibração para as superfícies externas do motor, que são radiadoras de ruído. Este processo pode ser visualizado de modo esquemático na figura 1.3.

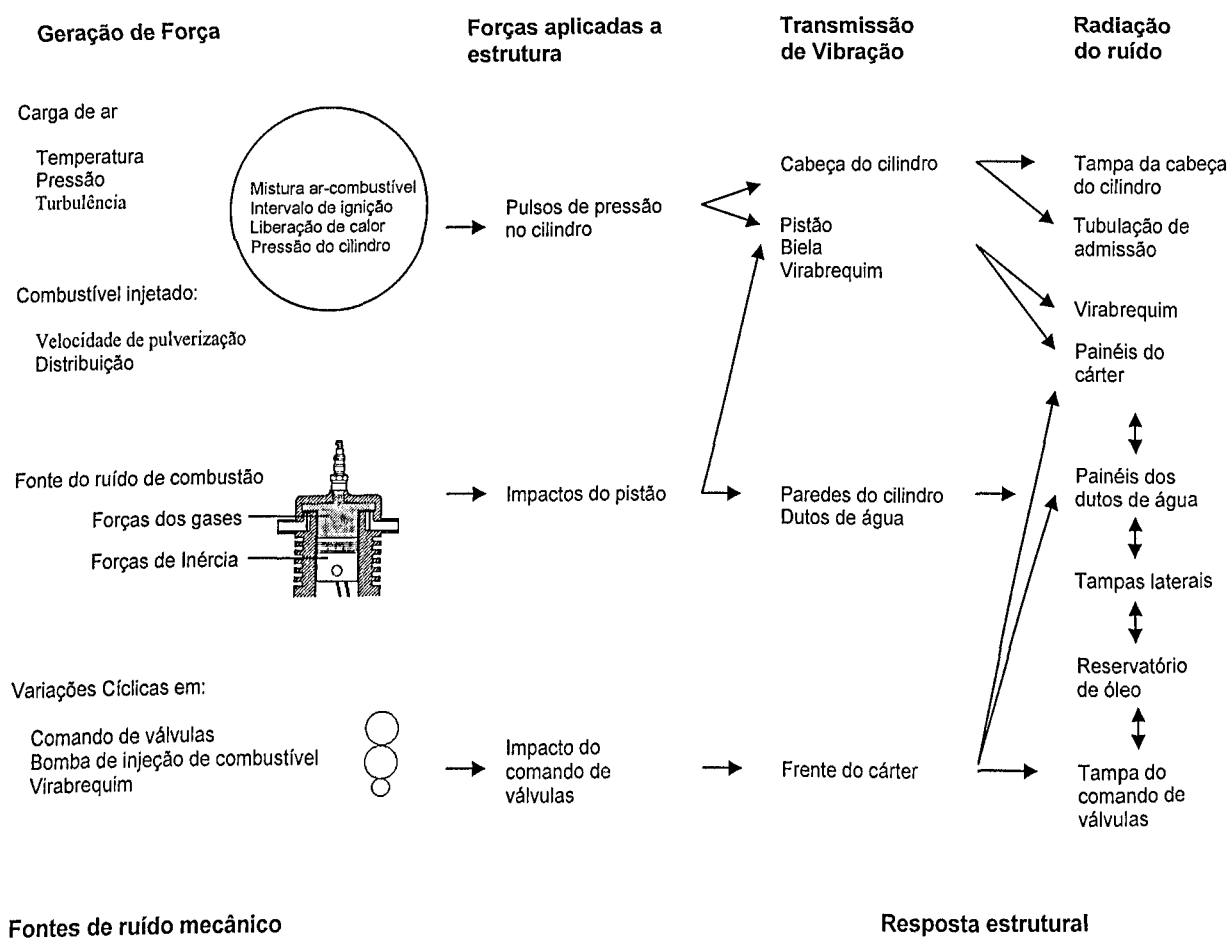


Figura 1.3: Processo de geração de vibração e ruído nos motores (modificado de Baxa, 1982).

Durante o ciclo do motor, na câmara de combustão ocorre o aparecimento de pulsos de pressão, os quais atuam na cabeça do cilindro, no pistão, na biela e no virabrequim. Isto

produz vibração nestes componentes, gerando assim ruído que se propaga através de outros componentes do motor, como pode ser visto na figura 1.3.

Ocorre também a geração de forças produzidas pelo impacto do pistão, o que causa vibração nas paredes do cilindro e nos dutos de água, ocasionando ruído, que são irradiados.

Devido às variações cíclicas que se tem durante o funcionamento do motor, tem-se a produção de força, que são geradas, por exemplo, pelo impacto das cames do comando de válvulas com as válvulas. Estas forças produzem vibração, o que gera ruído, o qual se propaga através da tampa do comando de válvulas, do reservatório de óleo e outros componentes.

CAPÍTULO II

TÉCNICAS UTILIZADAS EM ANÁLISE DE SINAIS

Durante um processo de medição, tem-se sempre a aquisição de dados, e o seu tratamento, bem como a análise detalhada dos dados obtidos. Para se poder fazer uma análise dos dados coletados, na maioria das vezes é necessário fazer uma preparação do sinal, uma vez que geralmente tem-se o sinal em função do tempo, o que torna difícil a sua análise devido ao fato de se ter a presença de ruído, a dificuldade de verificar as frequências características e outros. De modo a se facilitar o processo de análise, existem algumas técnicas que podem ser utilizadas para a redução dos dados, ou seja, extrair da história do sinal, as informações mais importantes. Neste capítulo serão apresentadas as técnicas utilizadas neste trabalho.

2.1 MÉDIA NO DOMÍNIO DO TEMPO (TIME DOMAIN AVERAGE - TDA)

A TDA consiste basicamente em se fazer uma média em um sinal onde se tem a repetição de vários períodos, de modo a se obter um período médio. A TDA é representada pela equação 2.1, e a figura 2.2 representa o seu princípio.

$$y(iT) = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x(iT - rMT) \quad (2.1)$$

Onde $x(iT)$ são os períodos, $y(iT)$ o período médio, M é o número de pontos por período, N é o número de períodos e T é o tempo.

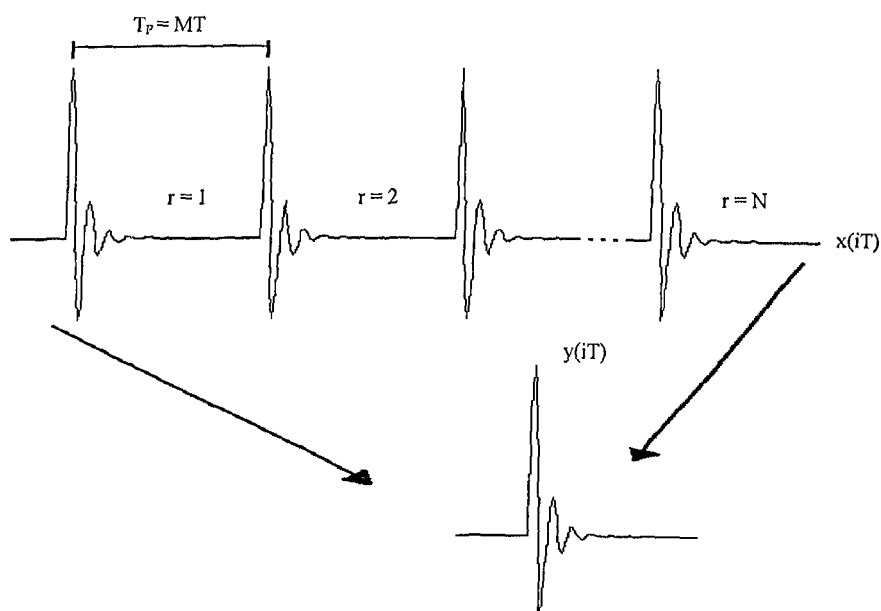


Figura 2.1: Esquema da Média no Domínio do Tempo.

O uso da TDA permite promover uma filtragem linear do sinal, além de uma alta redução de dados, uma vez que somente um período do sinal é retido.

2.2 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FAST FOURIER TRANSFORM - FFT)

Um modo de facilitar a compreensão do sinal temporal, é passando este para o domínio da frequência e uma maneira de se fazer isso é através da Transformada de Fourier, ou para o caso de sinais amostrados, através da FFT (Transformada rápida de Fourier).

A Transformada contínua de Fourier é dada pela equação 2.2:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.2)$$

Pode-se verificar que esta equação somente é válida para um sinal contínuo e infinito, pois os limites de integração são de $-\infty$ a $+\infty$, sendo assim, essa formulação se torna inviável para situações reais.

Para se evitar este problema pode-se supor que o sinal amostrado $x(t)$ de um processo qualquer, exista para o intervalo de tempo de 0 até T, e vale zero para todos os outros valores de T. Para este caso a Transformada de Fourier é dada por:

$$X(f) = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.3)$$

Através da equação 2.3 é possível obter a resposta em frequência para um determinado sinal. Para sinais discretos, utiliza-se a FFT para promover a transformação do sinal. Por expansão de séries de Fourier tem-se:

$$x(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} A_n e^{\frac{j2\pi nt}{T}} \quad (2.4)$$

sendo:

$$A_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{\frac{j2\pi nt}{T}} dt \quad (2.5)$$

Da equação (2.3), tem-se:

$$X\left(\frac{n}{T}\right) = \int_0^T x(t) e^{\frac{-j2\pi nt}{T}} dt = TA_n \quad (2.6)$$

Então $X\left(\frac{n}{T}\right)$ determina A_n e, portanto, $x(t)$ para todo tempo t . Do mesmo modo, determina $X(f)$ para todas as frequências f . Este resultado é o Teorema da amostragem no domínio da frequência. O incremento de frequência fundamental $1/T$ é o chamado Co-intervalo de Nyquist.

Assumindo que o sinal amostrado $x(t)$ exista somente para o intervalo de 0 a T segundos, e supondo também que a Transformada de Fourier $X(f)$ exista somente no intervalo de frequência de $-B$ a $+B$ Hz (sendo B um valor de frequência finito) e que as funções $x(t)$ e $X(f)$ são restritas nas suas propriedades no tempo e na frequência, somente um número finito de amostras discretas de $x(t)$ ou $X(f)$ são necessárias para descrever completamente $x(t)$ para todos os t . Pela amostragem de $X(f)$ nos pontos $1/T$ do co-intervalo de Nyquist, independente da escala de frequência de $-B$ a $+B$, o número de pontos necessários para descrever $x(t)$ é:

$$N = 2BT \quad (2.7)$$

Disso tem-se que o máximo intervalo amostrado para amostras igualmente espaçadas é $\Delta t = 1 / (2B)$, ou seja, a frequência de amostragem $f_{\text{máx}} = 1 / \Delta t$, deve ser maior ou igual ao dobro da maior frequência a ser analisada pela Transformada de Fourier.

As duas considerações feitas anteriormente, não são teoricamente possíveis, por causa do Princípio da Incerteza (Bendat e Piersol, 1986). Na prática, entretanto, isto pode ser bem aproximando com um intervalo de tempo finito e filtros de passa banda.

Quando se trabalha com a FFT, é necessário se tomar alguns cuidados de modo a evitar que ocorram certos problemas como "Aliasing" e "Leakage".

2.2.1 "ALIASING" (FANTASMAS)

Se um sinal for amostrado com um intervalo de tempo maior que $1/(2B)$, irá ocorrer uma mistura entre as componentes de baixa e alta frequência dos dados originais (figura 2.2). A este problema dá-se o nome de "Aliasing". Ele constitui um erro potencial que é inerente em todo processamento digital que é precedido por um conversor analógico-digital.

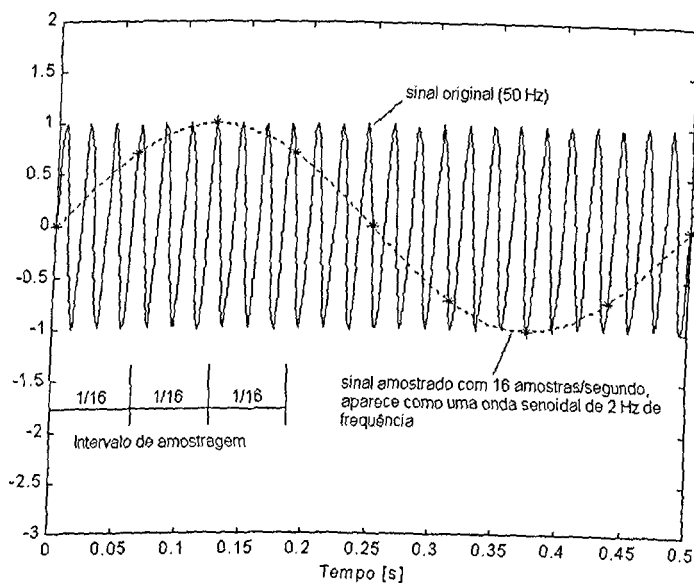


Figura 2.2: Ilustração do fenômeno de "Aliasing".

Pode-se verificar que para um sinal com taxa de amostragem de $1/\Delta t$, a mais alta frequência que pode ser amostrada é $f_c = 1/(2\Delta t)$. Para qualquer frequência f que pertença ao intervalo $0 \leq f \leq f_c$, as mais altas frequências serão rebatidas nas seguintes frequências:

$$(2f_c \pm f), (4f_c \pm f), \dots, (2nf_c \pm f), \dots$$

2.2.2 "LEAKAGE" (VAZAMENTO)

O problema de "Leakage" ocorre na transformação de um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. Este problema pode ocorrer para dois casos diferentes.

Quando se promove a Transformada de Fourier de um sinal, tem-se uma integração do sinal ao longo do tempo, trabalhando com uma amostra finita de tempo, a qual tem o efeito de repetir a mesma ao longo do tempo. Na transformação do sinal $x(t)$ para $X(f)$, sendo $x(t)$ discretizado dentro de uma janela de comprimento T , onde a mesma percorre um número incompleto de períodos do sinal, o mesmo é tomado como periódico dentro de cada janela. Assim, tal sinal, além de ser descrito em termos de suas frequências fundamentais, será descrito também em função de componentes de frequências que são múltiplas das frequências fundamentais do sinal. Logo, a energia do sinal não se distribui somente nas suas frequências fundamentais, aparecendo picos nos harmônicos destas, caracterizando assim um tipo de vazamento.

O fenômeno de "Leakage" também pode ocorrer quando um sinal com frequência f é discretizado utilizando-se um determinado Δf , de tal modo que f não é múltiplo deste Δf ($f \neq n \cdot \Delta f$, sendo n um número inteiro diferente de zero). Para estes casos, a energia do sinal no espectro de frequência não aparece somente em f , mas também nas frequências próximas de f e nas múltiplas de Δf .

Portanto o fenômeno de "Leakage" consiste no aparecimento de componentes espectrais nas frequências diferentes da do sinal harmônico.

2.3 CEPSTRUM

Cepstrum é geralmente definido como o espectro de um espectro logaritmo (amplitude logarítmica, mas escala de frequência linear). A análise cepstral pode ser utilizada para a detecção de periodicidade em um espectro, detecção de eco, recuperação de onda e identificação de fontes de sinal. Devido a sua escala logarítmica, ocorre uma ênfase da estrutura harmônica de um espectro e a redução da influência dos vários caminhos de transmissão entre a fonte do sinal e o ponto de medição deste.

2.3.1 CEPSTRUM DE POTÊNCIA

O Cepstrum de Potência foi originalmente definido como o espectro de potência do logaritmo do espectro de potência (Randall e Tech), o que pode ser representado pela equação 2.8:

$$C_p(t) = |\mathfrak{F}\{\log F_{xx}(f)\}|^2 \quad (2.8)$$

onde: $F_{xx}(f)$ é o espectro de potência do sinal no tempo $f_x(t)$

$$F_{xx}(f) = |\mathfrak{F}\{f_x(t)\}|^2 \quad (2.9)$$

$\mathfrak{F}\{\}$ representa a Transformada de Fourier da quantidade entre colchetes.

Mais tarde uma nova definição foi dada, como "Transformada Inversa do logaritmo do espectro de potência:

$$C_p(t) = \mathfrak{F}^{-1}\{\log F_{xx}(f)\} \quad (2.10)$$

A variável independente, t , do cepstrum, tem as dimensões de tempo, mas é conhecida como quefrência. Esta é uma terminologia útil para interpretação de sinais no tempo, em termos de seu conteúdo em frequência. Uma alta quefrência, representa rápidas flutuações no espectro e uma baixa quefrência, lentas variações no espectro.

2.3.2 CEPSTRUM COMPLEXO

O Cepstrum Complexo é a transformada inversa do logaritmo do espectro complexo (Randall e Tech), sendo representado pela equação 2.11:

$$C_c(t) = \mathfrak{F}^{-1}\{\log F_x(f)\} \quad (2.11)$$

onde: $F_x(f)$ é o espectro complexo do sinal no tempo $f_x(t)$

$$F_x(f) = \mathfrak{F}\{f_x(t)\} = a_x(f) + jb_x(f) \quad (2.12)$$

O Cepstrum Complexo retém informações de fase, o que permite operações inversas, ou seja, a partir dele é possível recuperar o sinal original, o que não é possível de se realizar com o Cepstrum de Potência, uma vez que o mesmo perde as informações de fase.

2.4 TRANSFORMADA DE HILBERT

A transformada de Hilbert de um sinal $x(t)$ de valor real no domínio do tempo é outro sinal de valor real no domínio do tempo, denotado por $\tilde{x}(t)$, tal que $z(t) = x(t) + j\tilde{x}(t)$ é um sinal analítico. Pode-se observar que o sinal analítico é um sinal complexo com a parte imaginária sendo a Transformada de Hilbert da parte real.

O sinal analítico $z(t)$ é definido pela equação 2.13:

$$z(t) = 2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} X(f) e^{jft} df \quad (2.13)$$

Onde $X(f)$ é o espectro de $x(t)$, ou seja:

$$X(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-jft} dt \quad (2.14)$$

A partir disso pode-se obter a forma explícita de $z(t)$ em termos do sinal real $x(t)$:

$$z(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x(t') e^{j f(t-t')} dt' df \quad (2.15)$$

Definindo $\int_{-\infty}^{\infty} e^{jft} df = \pi\delta(t) + \frac{j}{t}$ (Cohen, 1995) e substituindo em 2.15, obtém-se:

$$z(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t') \left[\pi\delta(t-t') + \frac{j}{t-t'} \right] dt' \quad (2.16)$$

Então:

$$z(t) = x(t) + \frac{j}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(t')}{t-t'} dt' \quad (2.17)$$

Sendo assim, a Transformada de Hilbert é definida pela equação 2.18:

$$\tilde{x}(t) = H\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(t')}{\pi(t-t')} dt' \quad (2.18)$$

Então $\tilde{x}(t)$ é a integral de convolução de $x(t)$ e $\left(\frac{1}{\pi t}\right)$, escrita como:

$$\tilde{x}(t) = x(t) \otimes \left(\frac{1}{\pi t}\right) \quad (2.19)$$

onde \otimes representa convolução.

A Transformada de Hilbert tem várias propriedades, entretanto a propriedade de interesse aqui se relaciona a sinais modulados: se $E(f) = 0$ para $f > f_0$ (isto é, $e(t)$ é limitado em banda), e se:

$$x(t) = e(t) \cos(2\pi f_0 t) \quad (2.20a)$$

então:

$$\tilde{x}(t) = e(t) \sin(2\pi f_0 t) \quad (2.20b)$$

Tem-se então que:

$$e(t) = [x^2(t) + \tilde{x}^2(t)]^{\frac{1}{2}} \quad (2.21)$$

A modulação $e(t)$ é o envelope de $x(t)$. Aplicando a equação 2.21, é possível computar o envelope de sinais.

A partir destas considerações pode-se conceituar fase instantânea $\theta_i(t)$ e frequência instantânea $f_i(t)$:

$$\theta_i(t) = \arctan\left(\frac{\tilde{x}(t)}{x(t)}\right) \quad (2.22a)$$

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i}{dt} \quad (2.22b)$$

As equações 2.22a e 2.22b aplicadas as equações 2.20a e 2.20b, resultam em $\theta_i(t) = \omega_0 t$ e $f_i(t) = f_0$.

Outra propriedade importante da Transformada de Hilbert é em relação a sinais casuais: As partes reais e imaginárias de sua Transformada de Fourier forma o par da Transformada de Hilbert.

2.5 TÉCNICA DO ENVELOPE

A técnica do envelope é capaz de mostrar picos de vibração correspondentes a defeitos oriundos de falhas que geram impactos e que se repetem periodicamente, provocando vibração. Muitas vezes, a simples medição do espectro falha em detectar estes picos, devido aos altos níveis de vibração provenientes de outras fontes.

Esta técnica possibilita tanto detectar como diagnosticar falhas. Para o caso de falhas em rolamentos, a mesma é tida como uma das mais poderosas ferramentas para a sua detecção.

A técnica do envelope é representada pela figura 2.3.

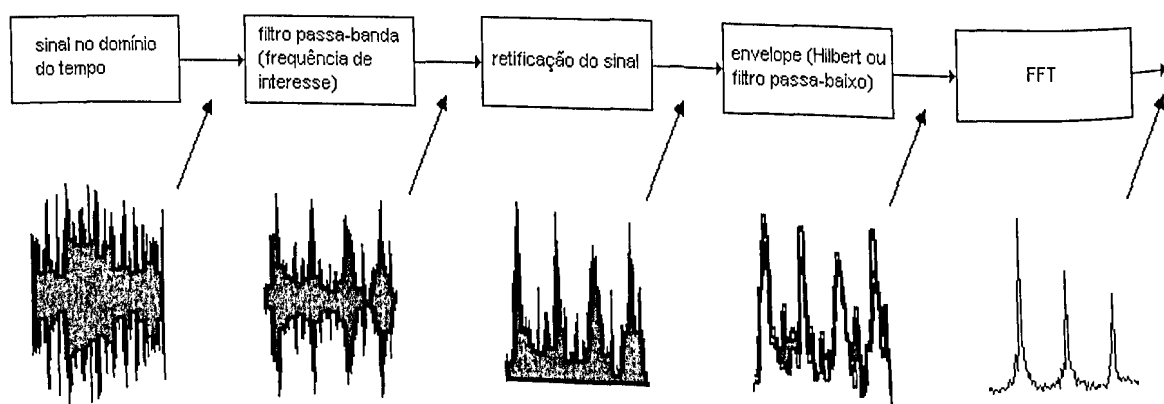


Figura 2.3: Esquema da Técnica do Envelope.

Primeiramente obtém-se o sinal no tempo, em seguida filtra-se o sinal com um filtro passa-banda de modo a se isolar a região que contém a banda de frequência de interesse. Após este passo, promove-se a retificação do sinal filtrado, ou seja, faz-se o módulo do sinal. Em seguida utiliza-se ou um filtro passa-baixo ou a Transformada de Hilbert de modo a se obter o envelope do sinal, o qual contém as componentes de frequência de baixa modulação relacionadas com as razões de impacto. Tendo o envelope, realiza-se a FFT do mesmo, de modo a se identificar a frequência da portadora (frequência de impacto).

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para a realização dos experimentos utilizou-se motores FIASA 1500, de 4 cilindros. Foram coletados dados a partir de testes realizados em dois motores, os quais foram montados numa bancada de teste (figura 3.1) na Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

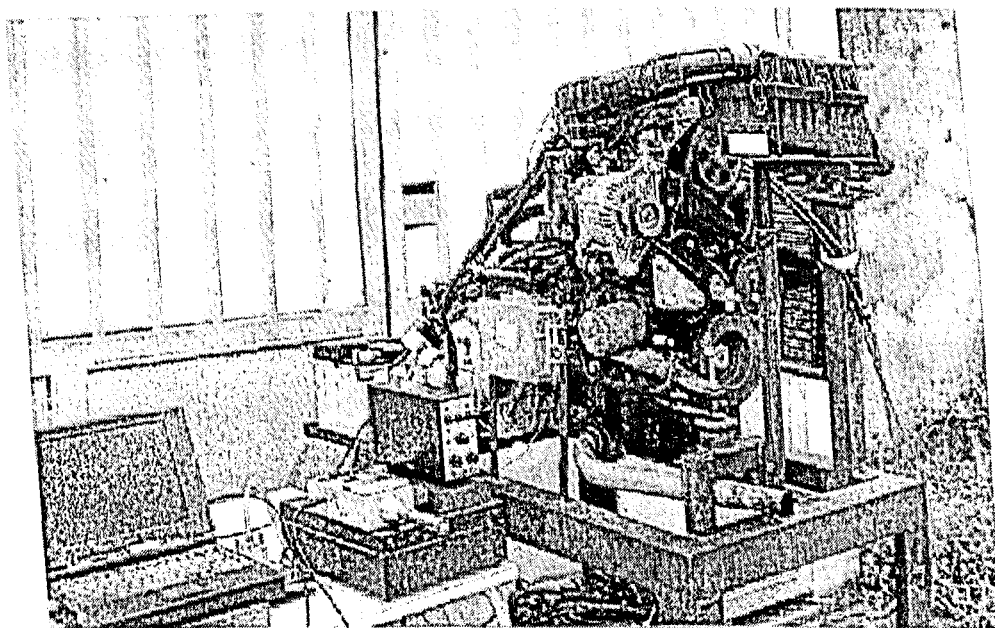


Figura 3.1: Motor montado na UFU.

Para a aquisição dos dados trabalhou-se com os motores em duas condições:

- Motores a 850 rpm (marcha lenta)
- Motores a 3100 rpm

Para a situação de 850 rpm, coletou-se apenas sinais referentes a vibração, já para o motor a 3100 rpm, foram adquiridos tanto vibração como pressão sonora. A rotação de 3100 rpm foi escolhida para a identificação das causas de rumorosidade (define-se rumorosidade como níveis de pressão sonora e vibração) em função de simulações realizadas com o modelo modal obtido via técnica de elementos finitos, realizado por alunos de iniciação científica (Duarte, 1999).

Para a aquisição dos sinais foram utilizados os seguintes equipamentos:

- **Acelerômetro**
Bruel & Kjaer Type 4367 – N° Série: 932602 – Sensibilidade: 1.97 pC/m/s²
- **Amplificador**
Bruel & Kjaer Charge Amplifier Type 2635 – N° Série: 1355955
- **Placa de Aquisição**
Placa Analógica A/DC100 Pico Technology – faixa de aquisição: 0 a 100 Khz
- **Medidor de Nível de Pressão Sonora**
ETELBRA ETB140 – Série: 11A

Tanto o acelerômetro como o Medidor de Nível de Pressão Sonora foram calibrados utilizando-se calibradores da Bruel & Kjaer. Os equipamentos foram montados conforme o esquema representado na figura 3.2.

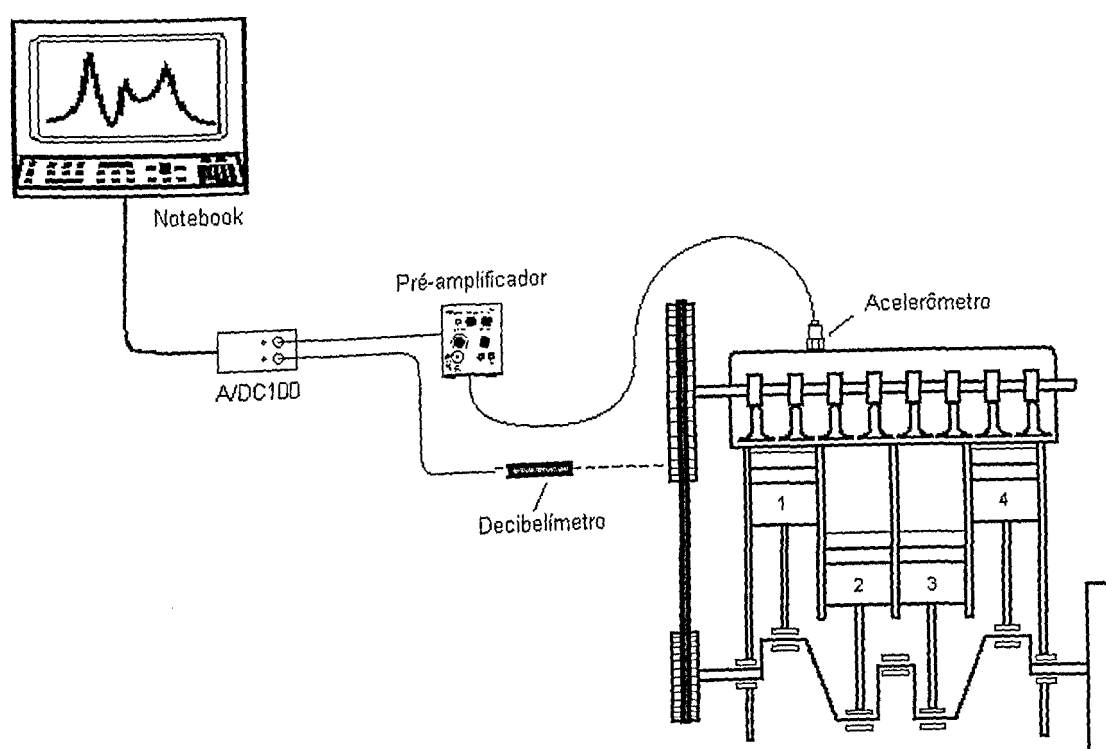


Figura 3.2: Esquema da montagem dos equipamentos.

O acelerômetro foi colocado na tampa do comando de válvula, entre os cilindros 1 e 2 (figura 3.3). Para sua fixação utilizou-se um suporte ao qual o mesmo era acoplado, sendo que este suporte era fixado, via elemento roscador, à tampa do comando de válvula.

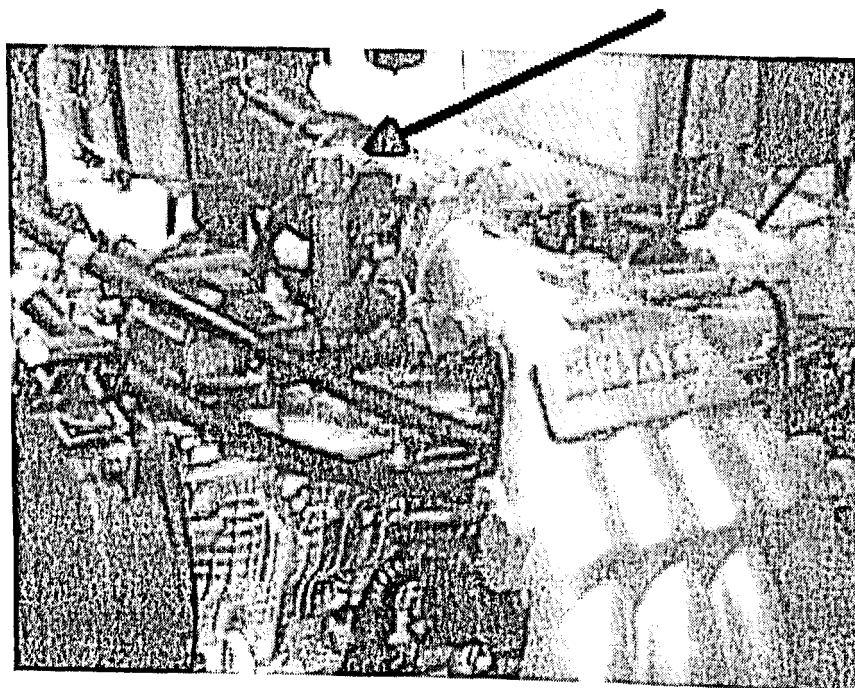


Figura 3.3: Posicionamento do acelerômetro no motor.

O Medidor de Nível de Pressão Sonora foi posicionado à aproximadamente 40 cm do motor, de frente para a roda fônica, na altura da parte superior da mesma, o que pode ser visto na figura 3.4.



Figura 3.4: Posicionamento do Medidor de Nível de Pressão sonora em relação ao motor.

Para a aquisição dos dados, foi utilizado um programa desenvolvido em Visual C[®]++, que permite a coleta contínua de dados durante o intervalo de tempo desejado, bem como a frequência de aquisição definida. Para as aquisições, utilizou-se o valor de 10 segundos como intervalo de tempo, e uma frequência de aquisição de 16384 Hz, sendo assim, cada amostra obtida tinha 163840 pontos. A escolha do valor de frequência de 16384 Hz, deve-se ao fato do mesmo ser potência de dois e de permitir trabalhar com uma frequência de análise de 8192 Hz, o que engloba a faixa mais importante da região audível pelo homem.

3.1 DEFEITOS SIMULADOS

Os defeitos simulados foram os seguintes:

- Tensor do Alternador Rumoroso
- Tensor da Distribuição Rumoroso
- Batido de Válvula
- Tensor do Alternador e da Distribuição Rumorosos

A escolha destes defeitos deve-se ao fato deles serem os mais comuns na linha de produção.

Para simular estes defeitos nos motores na UFU, um técnico da FIAT veio à Uberlândia e preparou os motores de modo que os mesmos apresentassem tais defeitos. Após a realização das todas as aquisições, os motores foram novamente regulados de modo a trabalharem nas condições normais.

3.1.1 TENSOR DO ALTERNADOR RUMOROSO

O Tensor do alternador (figura 3.5, indicado pela seta preta) tem como função propiciar a correta tensão na correia que passa pela polia do alternador. O defeito dito Tensor do Alternador Rumoroso consiste, como o próprio nome indica, em alguma falha localizada neste tensor. Tais falhas podem ser ocasionadas por defeitos no rolamento do tensor ou mesmo tensão incorreta na correia, no caso uma tensão superior à indicada no projeto do motor. Quando se tem a tensão superior à correta, o defeito é semelhante ao produzido por falhas no rolamento. No caso estudado, o defeito foi introduzido substituindo-se o tensor em condições normais de uso por um com defeito no rolamento.

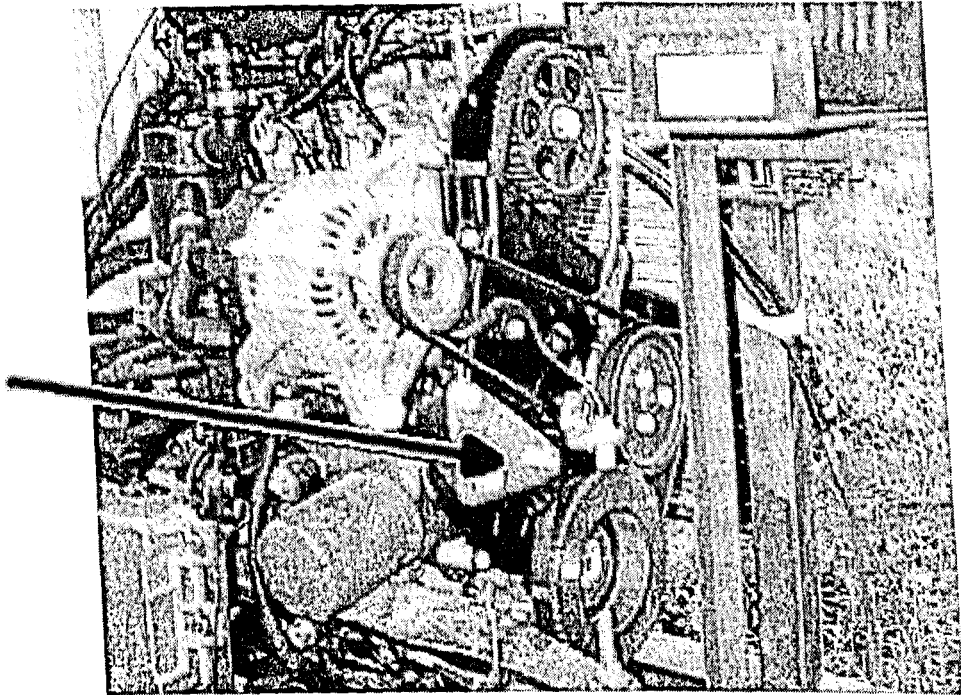


Figura 3.5: Localização do Tensor do Alternador.

O problema de tensor rumoroso é facilmente identificado pela audição, uma vez que o mesmo gera um "chiado" característico, que pode ser facilmente percebido (por técnicos especializados).

3.1.2 TENSOR DA DISTRIBUIÇÃO RUMOROSO

O Tensor da distribuição tem por finalidade dar a correta tensão na correia dentada. Assim como no problema "tensor do alternador rumoroso", quando se tem uma incorreta tensão na correia ou falhas no rolamento, tem-se o defeito chamado de Tensor da distribuição rumoroso. Para este caso, o defeito foi introduzido aumentando demasiadamente a tensão da correia dentada. Na figura 3.6 tem-se a localização do tensor da distribuição.

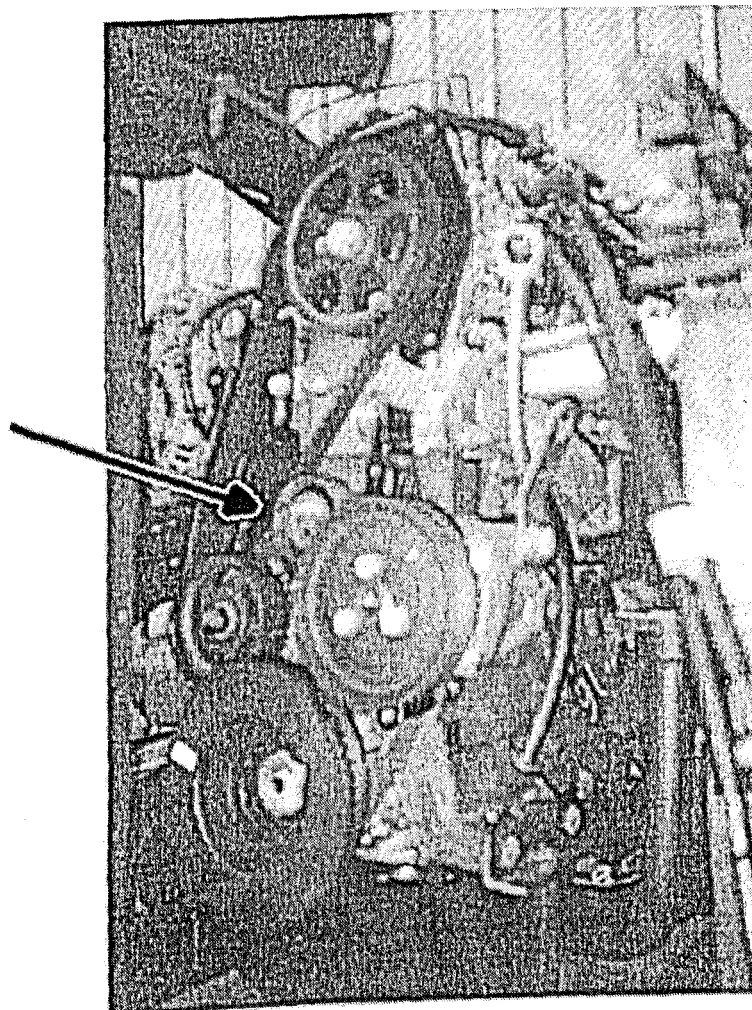


Figura 3.6: Localização do Tensor da Distribuição.

A identificação deste defeito é semelhante ao caso do tensor do alternador rumoroso, uma vez que ambos os problemas tem natureza parecida, só mudando a localização do tensor que apresenta o defeito.

3.1.3 BATIDO DE VÁLVULA

O problema de batido de válvula é ocasionado, entre outros motivos, por um ajuste mecânico incorreto da pastilha que se situa entre o came e o tucho, geralmente devido a erros de espessura da pastilha. A figura 3.7 representa um esquema do sistema.

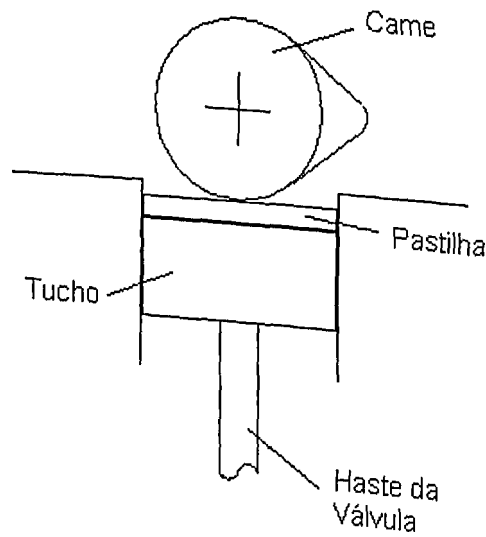


Figura 3.7: Esquema do posicionamento da pastilha entre o came e tucho.

Quando se tem uma espessura incorreta da pastilha, ocorre uma descontinuidade no perfil envolvente entre o came e a pastilha. Pela figura 3.8, pode-se observar que quando se tem uma menor espessura da pastilha, ocorre um aumento da distância entre a came e a mesma (distância e), isto ocasiona um impacto entre os elementos no momento do contato (figura 3.8b), ao contrário do caso onde esta distância é correta, quando se tem um contato suave (figura 3.8a). Quando se tem uma maior espessura da pastilha, ocorre um impacto quando o came deixa de estar em contato com a pastilha. Este impacto que ocorre quando se tem pastilhas incorretas, produz uma força que atua no comando de válvulas, provocando sua excitação, o que resulta em elevação dos níveis de vibrações e, conseqüentemente, nos níveis de ruído.

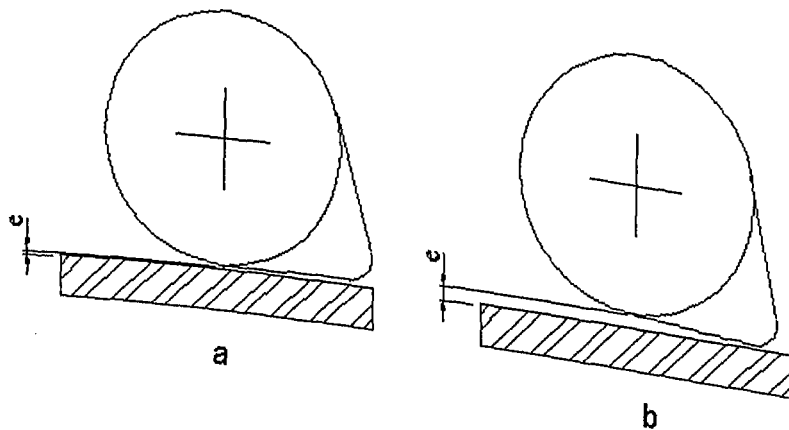


Figura 3.8: Esquema mostrando a distância entre o came e a pastilha.

Para simular este defeito, foram trocadas pastilhas de espessura correta por outras com diferentes espessuras, ocasionando assim o defeito.

3.2 METODOLOGIA UTILIZADA

A metodologia utilizada foi baseada em uma Análise de Assinaturas, onde utilizou-se Análise Espectral, Análise Cepstral e Técnica do espectro do envelope (Braun, 1986).

Durante a aquisição dos dados, observou-se oscilações na rotação do motor, uma vez que o mesmo é testado sem carga, sendo assim, ocorreram variações de até 5% da rotação média (42.5 rpm para 850 rpm e 155 rpm para 3100 rpm). Devido a este problema utilizou-se uma análise espectral do sinal, em bandas de 1/3 de oitava, de 31.6 a 8000 Hz, de modo a se comparar os resultados independentemente das pequenas oscilações que ocorreram.

Em um primeiro momento, tentou-se utilizar a técnica da média no domínio do tempo, de modo a promover um tratamento prévio do sinal, entretanto não foi possível utiliza-la, devido a problemas em sincronizar o sinal adquirido com a rotação do motor.

A análise espectral do sinal foi realizada utilizando a Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform - FFT). As curvas de mérito foram obtidas a partir dos sinais dos motores considerados bons. Além da análise espectral em bandas de 1/3 de oitava, realizou-se também a análise espectral simples, de modo a se verificar de modo mais detalhado as possíveis variações que possam ter ocorrido nos espectros. Os espectros foram obtidos utilizando 16384 pontos, sendo assim, cada amostra gerou 10 espectros (cada amostra tem 163840 pontos), e a partir da média destes, obteve-se o espectro final. Como a frequência de corte utilizada foi de 8192 Hz, a resolução em frequência foi de 1 Hz.

Após a análise espectral, realizou-se a Técnica do Espectro do Envelope, de modo a se verificar a possível influência de forças de impacto repetitivas no espectro. Para se filtrar os sinais durante a realização desta técnica, utilizou-se um filtro Butterworth de 4ª ordem.

Utilizou-se também a análise Cepstral para a detecção de periodicidade no espectro, detecção de eco, recuperação de onda e identificação de fontes de sinal, com o intuito de correlacionar isto com possíveis falhas nos motores.

Os resultados foram obtidos a partir de 4 médias, uma vez que este foi o número de amostras coletadas para cada uma das diferentes condições do motor.

Neste trabalho foram apresentados resultados quantitativos, apenas qualitativos, sendo assim, não foram apresentadas as unidades de pressão sonora e aceleração, tendo-se apenas o termo genérico "ref.".

Nos estudos, utilizou-se como ferramenta de apoio o "toolbox" de Análise de Sinais do software MatLab®, versão 5.0.

3.3 COMPORTAMENTO VIBRATÓRIO DO MOTOR EM FREQUÊNCIA

Para se conhecer o comportamento vibratório do motor utilizado, foram determinadas (por alunos de iniciação científica) as frequências naturais de seus principais componentes, utilizando as técnicas de elementos finitos e de estimação de Funções de Resposta em Frequência cruzada (Duarte, 1999). Os resultados destes procedimentos são mostrados na tabela 3.1 e 3.2. Neste trabalho, o intervalo de frequência analisada foi de 0 a 8192 Hz, sendo assim, alguns valores de frequências fora deste intervalo que se encontram nas tabelas seguintes, são apresentados apenas a caráter informativo.

Tabela 3.1: Frequências naturais de alguns componentes do motor.

Modo	Frequência Natural (Hz)				
	Comando de Válvulas	Virabrequim	Válvula	Biela	Tampa do Cáter
1	2718,40	3873,90	2106,90	759,77	618,61
2	2842,10	4573,20	2114,20	1705,50	658,26
3	3279,00	5202,00	5778,40	2032,80	728,60
4	3613,00	5405,50	5782,30	2659,50	795,51
5	5524,70	5579,20	5880,00	7368,70	834,31
6	6561,00	5745,60	11250,00	7613,90	866,78
7	7107,70	6320,10	11463,00	8136,40	894,45
8	7254,30	6737,60	17740,00	9368,40	916,85
9	8835,40	6833,30		11222,00	962,02
10		6998,90		11296,00	1044,70
11		7379,30		12150,00	1138,00
12		8252,50		15009,00	1185,20
13		8529,50		17709,00	1235,40

Tabela 3.2: Freqüências de ressonância excitadas pelas possíveis fontes de rumorosidade dos motores.

Mecanismo	Freqüências de Ressonância [Hz] (FRF Cruzada)	Mecanismo	Freqüências de Ressonância [Hz] (FRF Cruzada)
Biela	1770	Virabrequim	1778
Alternador (excitação polia)	415	Alternador (excitação correia)	415
	810		810
	1209		1209
	1470		1470
	1597		1597
Bomba D'água (excitação polia)	1044	Bomba D'água (excitação correia)	1044
	1186		1186
	1786		1786
Motor de partida	1674	Eixo Comando de Válvulas	1470
	1900		
Tensor da correia do alternador (excitação rolamento)	462	Tensor da correia do alternador (excitação correia)	336
	552		361
	1447		
	1592		
	2105		
Tensor da correia sincronizadora (excitação correia)	373	Tensor da correia sincronizadora (excitação rolamento)	1835
	767		2731
	1537		2940
	1776		5268
			6222
Polia do Comando (excitação polia)	1770	Polia do Comando (excitação correia)	1770
	2791		
	5176		

3.4 FREQÜÊNCIAS CRÍTICAS DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DOS MOTORES

Medindo-se as relações de transmissão entre o virabrequim e os componentes móveis do motor, monta-se a tabela 3.3, que mostra as dimensões e rotações das principais polias e tensores, de acordo com a rotação do motor.

Tabela 3.3: Dimensões e rotação das polias e tensores.

Correia	Identificação da Polia	Diâmetro (mm)	Rotação (Hz)	
			850 rpm	3100 rpm
Alternador	Virabrequim	137,1	14,17	51,67
	Tensor	80,3	24,19	88,21
	Bomba d'água	119,3	16,28	59,38
	Alternador	60,0	32,37	118,06
	Virabrequim	59,8	14,17	51,67
Sincronizador	Virabrequim	61,0	13,89	50,65
	Tensor	120,2	7,05	25,70
	Comando de Válvula	90,3	9,38	34,22
	Polia (Eixo de distribuição.)			

A tabela 3.4 mostra as freqüências fundamentais de passagem para os rolamentos existentes no motor, de acordo com sua rotação.

Tabela 3.4: Freqüências fundamentais de passagem dos rolamentos do motor.

ROLAMENTO	COMPONENTE	FREQÜÊNCIA [HZ]	
		850 rpm	3100 rpm
Tensor da correia do alternador	Passagem da esfera na pista externa	140,05	510,96
	Passagem da esfera na pista interna	95,84	349,67
	Passagem do conjunto	9,58	34,97
Tensor da correia do sincronizador	Passagem da esfera na pista externa	87,30	318,51
	Passagem da esfera na pista interna	62,18	226,88
	Passagem do conjunto	5,65	20,63
Rolamento de rolos da bomba d'água	Passagem da esfera na pista externa	53,59	195,51
	Passagem da esfera na pista interna	89,31	325,85
	Passagem do conjunto	5,95	21,72
Rolamento de esferas da bomba d'água	Passagem da esfera na pista externa	32,36	118,05
	Passagem da esfera na pista interna	62,91	229,52
	Passagem do conjunto	5,39	19,68

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos através da análise dos sinais de aceleração e pressão sonora dos motores. Cada subcapítulo mostra os resultados referentes a um determinado tipo de condição do motor.

Os resultados apresentados a seguir, foram corroborados a partir da análise de dados obtidos na FIAT AUTOMÓVEIS S/A, localizada em Betim, Minas Gerais. Esta análise foi realizada utilizando-se a mesma metodologia empregada neste trabalho.

4.1 MOTOR BOM

- Motor em marcha lenta (850 rpm):

O sinal no domínio do tempo de um motor considerado bom, a 850 rpm, tem o aspecto mostrado na figura 4.1.

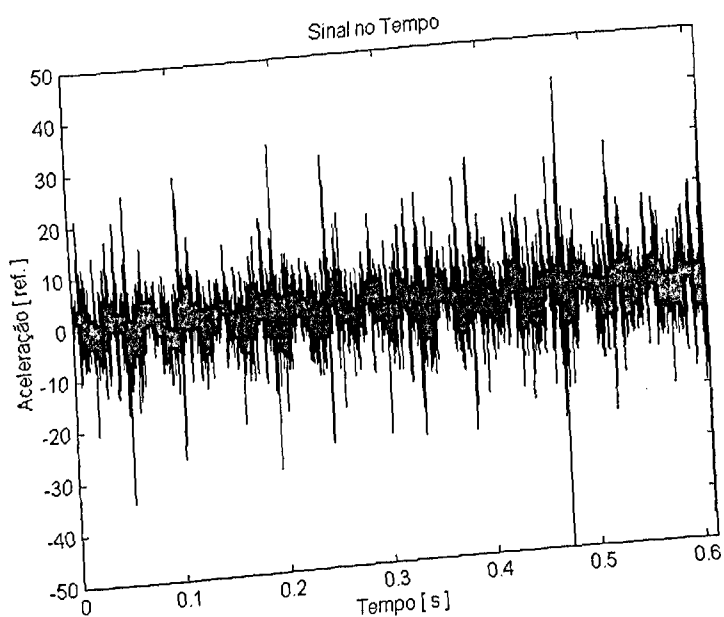


Figura 4.1: Sinal de aceleração no domínio do tempo de um motor bom (850 rpm).

Através do sinal no domínio do tempo, é possível verificar a presença de picos, os quais se destacam, uma vez que suas amplitudes são mais elevadas. Tais picos são referentes ao processo de combustão que ocorre durante o ciclo do motor.

A figura 4.2 representa o espectro de potência da aceleração em bandas de 1/3 de oitava.

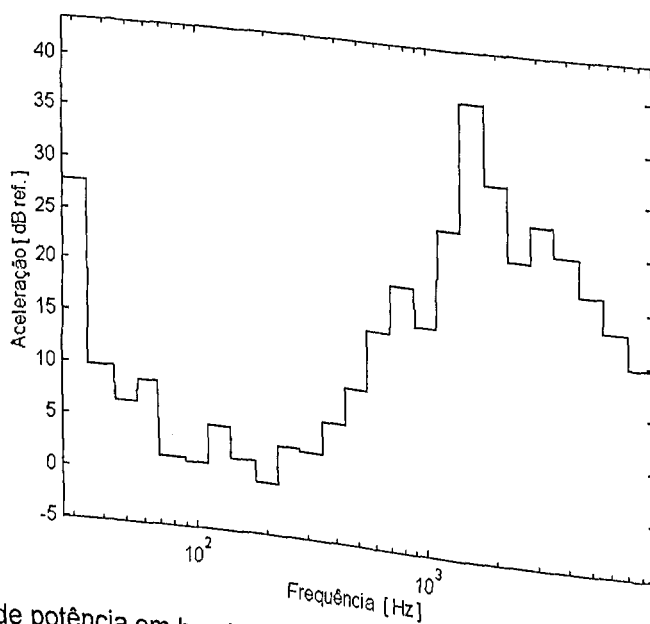


Figura 4.2: Espectro de potência em bandas de 1/3 de oitava de um motor bom a 850 rpm.

Verifica-se que os maiores níveis de energia ocorrem para a primeira faixa de frequência (31,6 Hz), o que corresponde à frequência de combustão do motor, e para a região de 1700 Hz. O espectro simples é representado pela figura 4.3.

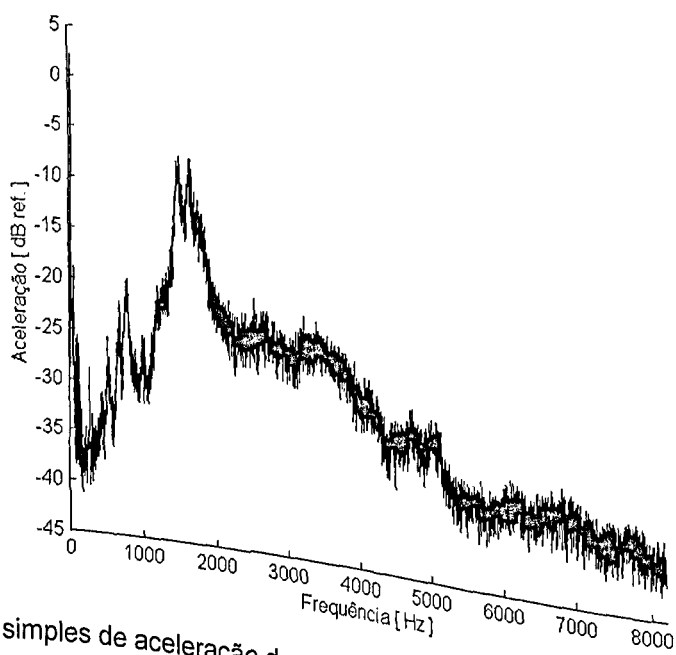


Figura 4.3: Espectro simples de aceleração de um motor bom a 850 rpm.

Pode-se observar que a região localizada entre 600 a 1000 Hz apresenta picos de energia, e entre 1500 a 1800 Hz, tem-se uma região com maior nível de energia, que é a região de ressonância da tampa do comando de válvulas e da biela. Através da figura 4.4, pode-se observar a presença do pico que se situa na frequência de combustão, o que equivale a duas vezes a rotação do motor. Tal fato é explicado por ocorrer duas explosões a cada rotação do motor.

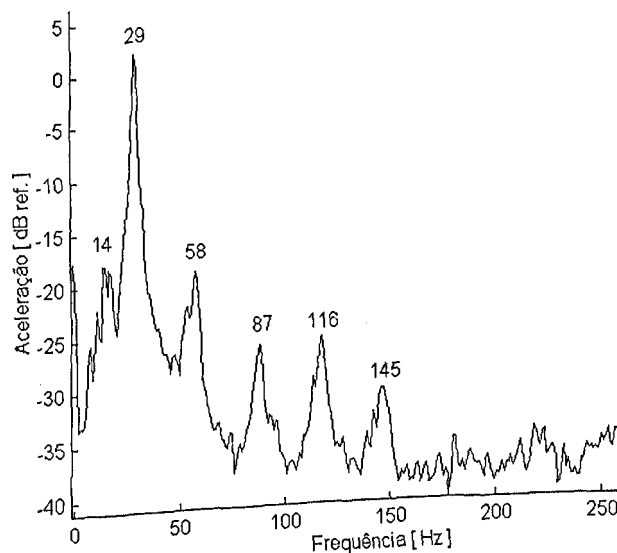


Figura 4.4: "Zoom" na região de baixa frequência do espectro de aceleração do motor bom a 850 rpm.

Além do pico situado na frequência de combustão (29 Hz), tem-se a presença de seus 4 primeiros harmônicos (58, 87, 116 e 145 Hz). Também é possível observar que na frequência de rotação do motor (14 Hz), tem-se a presença de um pico, sendo que o mesmo tem menor nível de energia que o do situado em 29 Hz.

O Cepstrum do sinal relativo ao motor bom a 850 rpm é representado pela figura 4.5. Pode-se verificar que o gráfico não apresenta os picos relativos às baixas frequências (0 até 0.005 s), uma vez que esta região corresponde às altas frequências e não foi de interesse neste trabalho analisa-las utilizando-se Cepstrum.

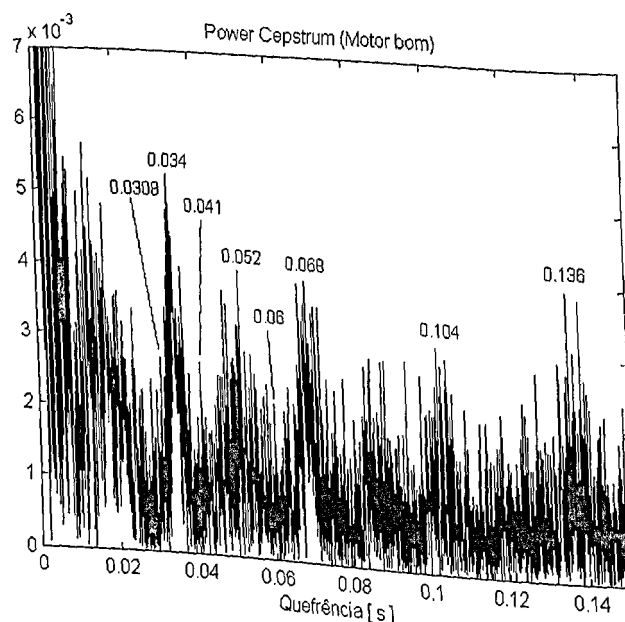


Figura 4.5: Cepstrum do motor bom a 850 rpm.

Observando o cepstrum, é possível verificar a presença de picos nas quefrecências relativas à frequência de rotação das principais polias e tensores. Estes valores estão mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Quefrecências (e frequências) relativas às polias e tensores, observadas a partir da Análise Cepstral.

Componente	Rotação (Hz)	Quefrecência (s)	Frequência (Hz)
Polia do Alternador	32,37	0,0308	32,47
Frequência de Combustão	29,34	0,0340	29,41
Tensor do alternador	24,19	0,0401	24,94
Polia da Bomba d'água	16,28	0,0600	16,67
Virabrequim	14,17	0,0680	14,71
Polia do eixo da distribuição	9,38	0,1040	9,62

Além destes valores apresentados na tabela 4.1, um outro pico que se destaca é localizado em 0,052 s (19,23 Hz, 2º harmônico da rotação da polia do eixo da distribuição). Pela figura 4.5, pode-se verificar ainda a presença de outros picos, para os quais não foi possível correlacionar as suas frequências com as frequências de rotação dos componentes do motor.

- **Motor a 3100 rpm (aceleração)**

A figura 4.6 mostra o gráfico o qual representa o sinal de aceleração de um motor bom, a uma rotação de 3100 rpm.

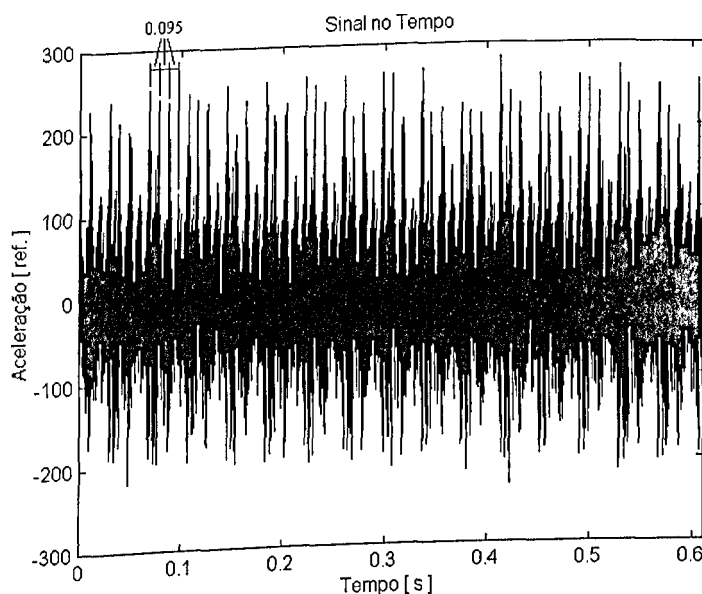


Figura 4.6: Sinal de aceleração no domínio do tempo de um motor bom (3100 rpm).

Pela figura 4.6, observa-se a ocorrência de picos, os quais estão separados por um intervalo de aproximadamente 0,095 s, o que correspondente a uma frequência de 105 Hz, a qual equivale à frequência de combustão. Sendo assim pode-se verificar que tais picos são relativos às explosões que ocorrem no motor, sendo que o pico menor corresponde à explosão do cilindro mais distante da posição do acelerômetro.

O espectro de vibração de um motor bom a 3100 rpm, em bandas de 1/3 de oitava, é mostrado na figura 4.7.

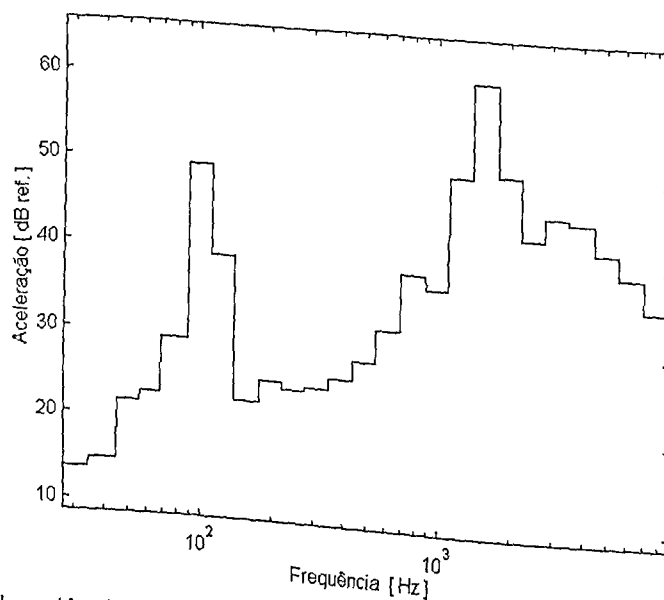


Figura 4.7: Espectro de potência em bandas de 1/3 de oitava de um motor bom a 3100 rpm.

Neste espectro, os níveis de energia aparecem nas faixas de frequência relativas à frequência de combustão, 105 Hz, e na região em torno de 1700 Hz, o que pode ser visto de maneira mais detalhada nas figuras 4.8 e 4.9, onde tem-se o espectro simples e "Zoom" na região de 0 a 1000 Hz.

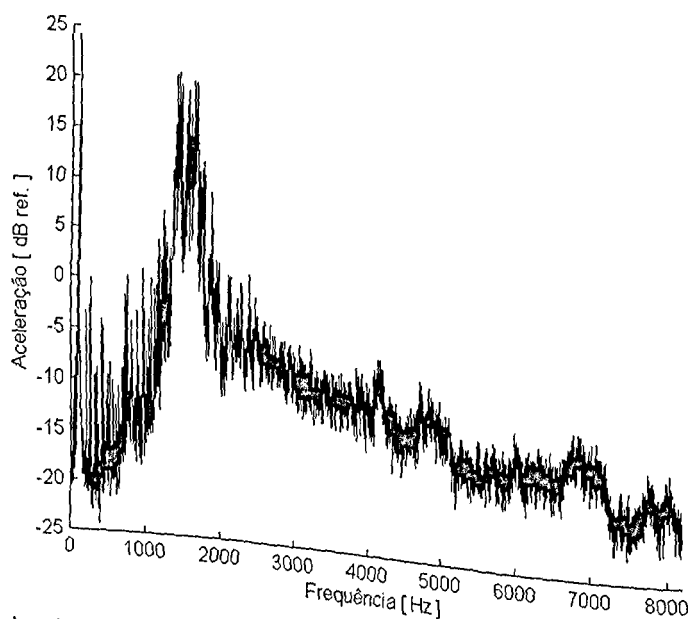


Figura 4.8: Espectro simples de aceleração de um motor bom a 3100 rpm.

Assim como no caso do motor a 850 rpm, a região entre 1500 a 1800 Hz, apresenta um alto nível de energia que se destaca no espectro.

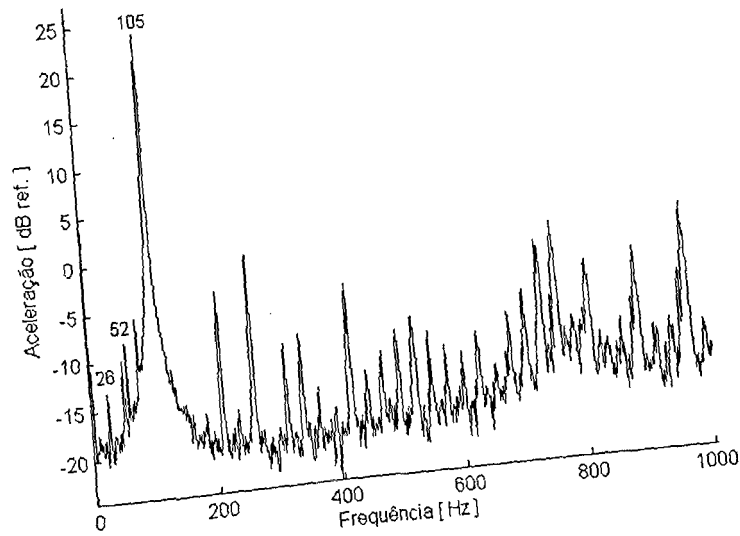


Figura 4.9: "Zoom" na região de 0 a 1000 Hz no espectro de aceleração de um motor bom a 3100 rpm.

Pela figura 4.9, pode-se verificar que há um pico localizado na frequência de rotação do comando de válvulas, aproximadamente 26 Hz, este pico entretanto, tem um nível de energia baixo, em relação ao localizado em 105 Hz, frequência de combustão, o qual tem a maior amplitude. Na frequência de rotação do motor (52 Hz) também aparece um pico. Pode-se observar que tem-se a presença de vários picos neste intervalo de frequência, sendo que os mesmos são harmônicos de 26 Hz. Pode-se verificar assim, a influência da rotação do comando de válvulas no espectro.

Na figura 4.10 tem-se o cepstrum do sinal de aceleração do motor bom a 3100 rpm.

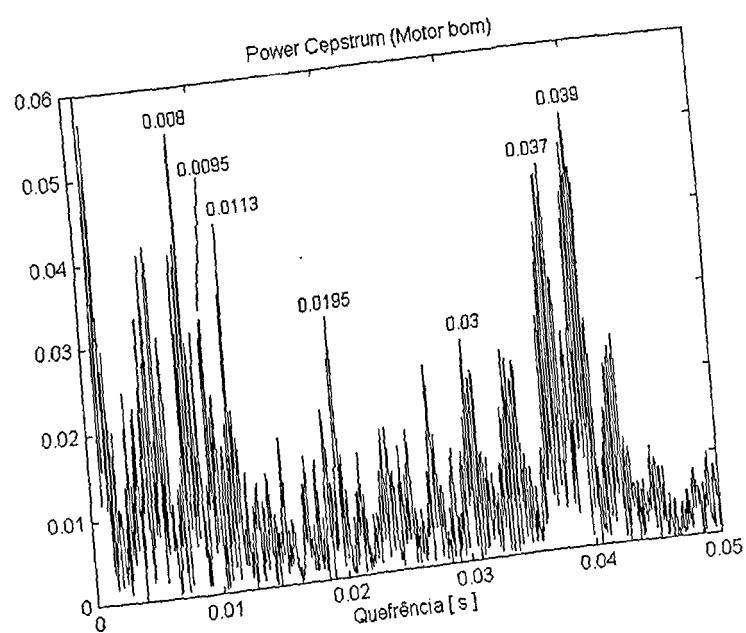


Figura 4.10: Cepstrum do motor bom a 3100 rpm (aceleração).

Assim como observado no cepstrum do motor bom a 850 rpm, para a situação de 3100 rpm, é possível verificar a presença de picos localizados nas quefrências relativas às freqüências de rotação das polias e tensores do motor (ver tabela 3.3). Em 0,008 s (125 Hz), tem-se o pico de maior amplitude do gráfico. Na quefrência de 0,095 s, ou 105 Hz, que corresponde à freqüência de combustão, verifica-se a presença de um pico. O mesmo ocorre em 0,0113 s, que eqüivale a 88,5 Hz, ou seja, rotação do tensor do alternador. Outro pico se destaca, localiza-se em 0,0195 s, que corresponde à rotação do motor, e, conseqüentemente, à rotação do virabrequim. Tem-se também picos que se localizam em torno 0,03 s, ou seja, freqüência de rotação da polia do eixo de distribuição (33,33 Hz). Na quefrência de 0,037 s, tem-se a presença de vários picos, o mesmo ocorrendo em 0,039 s, o que eqüivale à 25,64 Hz, ou seja, rotação do comando de válvulas. Tem-se ainda a presença de outros picos que se destacam, entretanto não foi possível relaciona-los com as freqüências de rotação dos componentes do motor.

- Motor a 3100 rpm (pressão sonora)

O gráfico representado na figura 4.11, mostra sinal relativo à pressão sonora no domínio do tempo.

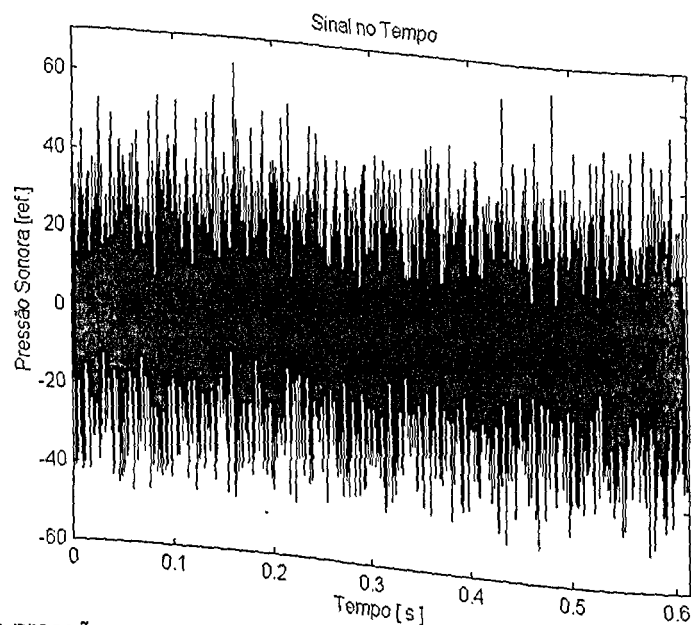


Figura 4.11: Sinal de pressão sonora no domínio do tempo de um motor bom (3100 rpm).

O sinal de pressão sonora no domínio do tempo se apresenta de maneira complexa. Tem-se a ocorrência de vários picos, os quais são irregulares, tanto em amplitude como em espaçamento.

A figura 4.13 mostra o espectro de pressão sonora em bandas de 1/3 de oitava de um motor considerado bom.

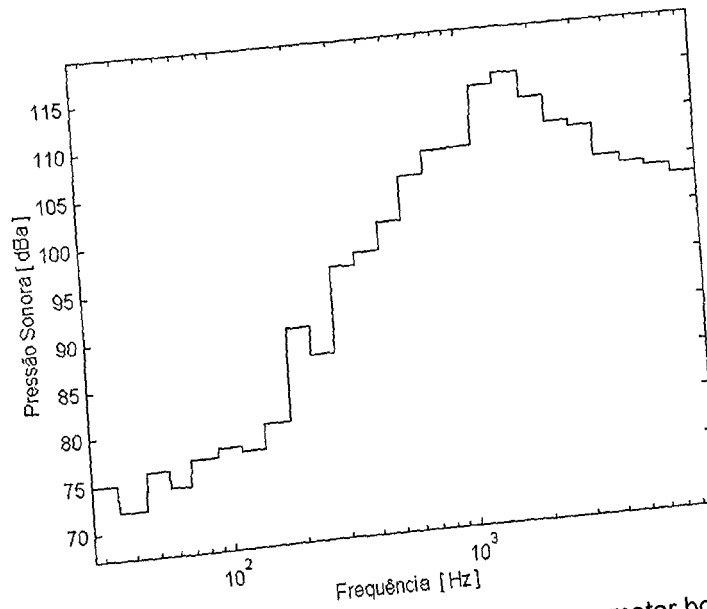


Figura 4.12: Espectro de potência em bandas de 1/3 de oitava de um motor bom a 3100 rpm.

Assim como nos casos de aceleração (tanto a 850 rpm como a 3100 rpm), a região compreendida entre 1600 e 1800 Hz, que corresponde a região de ressonância da tampa do comando de válvulas e da biela, se destaca no espectro devido ao seu maior nível de energia, o que pode ser visto na figura 4.13, que representa o espectro simples.

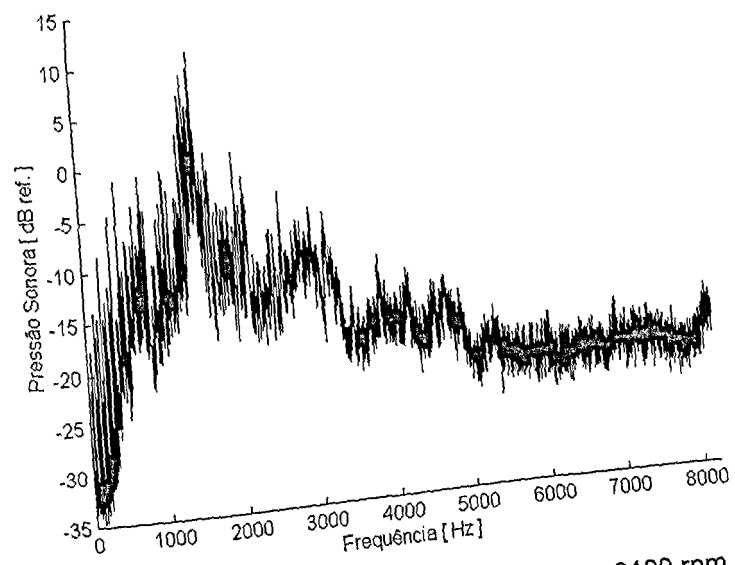


Figura 4.13: Espectro simples de pressão sonora de um motor bom a 3100 rpm.

Analisando a figura 4.13, nota-se que na região de 0 a 1000 Hz, tem-se a presença de vários picos, o que pode ser melhor visualizado na figura 4.14, que é um "Zoom" desta região.

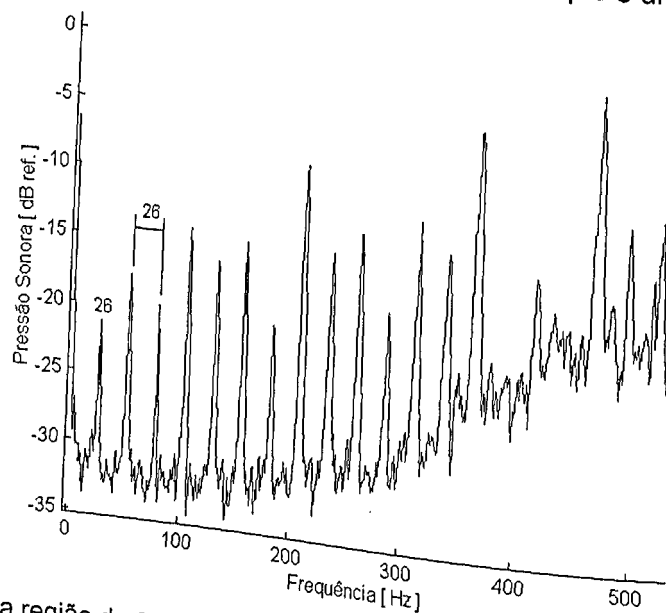


Figura 4.14: "Zoom" na região de 0 a 1000 Hz no espectro de pressão sonora do motor bom a 3100 rpm.

Como pode ser visto na figura 4.14, o primeiro pico está localizado na frequência de 26 Hz, e os picos subsequentes são seus harmônicos, ou seja, estão todos distanciados uns dos outros por um intervalo de 26 Hz, o que corresponde à frequência de rotação do comando de válvulas.

O cepstrum referente à pressão sonora do motor bom a 3100 rpm, está mostrado na figura 4.15.

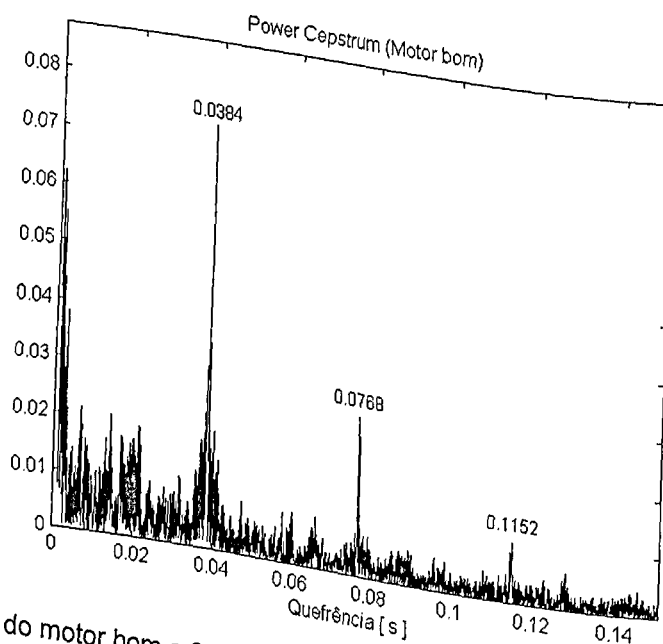


Figura 4.15: Cepstrum do motor bom a 3100 rpm (pressão sonora).

Pela figura 4.15, pode-se observar que os picos que se destacam no gráfico é o situado na frequência de 0,0384 s, ou seja, 26 Hz, o que corresponde à rotação do comando de válvulas, e o seu 2º e 3º harmônico, situados em 0,0768 s e em 0,1152 s. O restante dos picos apresentam amplitudes baixas quando comparado com aquele situado em 0,0384 s.

4.2 TENSOR DA DISTRIBUIÇÃO RUMOROSO

- Motor em marcha lenta (850 rpm)

A figura 4.16 mostra os gráficos referentes aos sinais de um motor bom e de um com o tensor da distribuição rumoroso, em marcha lenta. Verifica-se que ambos são muito parecidos, sendo difícil observar variações significativas entre eles.

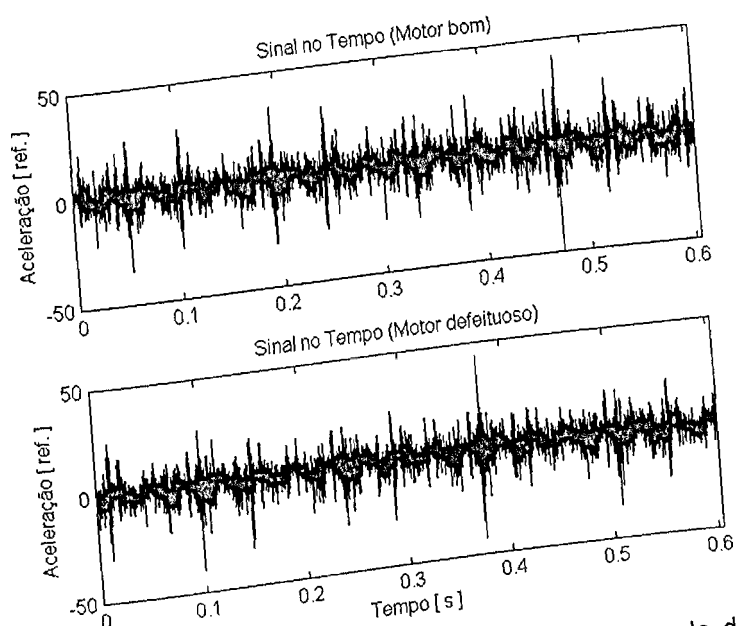


Figura 4.16: Sinais de aceleração de um motor bom e um com tensor da distribuição rumoroso, no domínio do tempo, a uma rotação de 850 rpm.

A figura 4.17 mostra o comparativo entre os espectros em bandas de 1/3 de oitava de um motor bom e um com o tensor da distribuição rumoroso, ambos a uma rotação de 850 rpm.

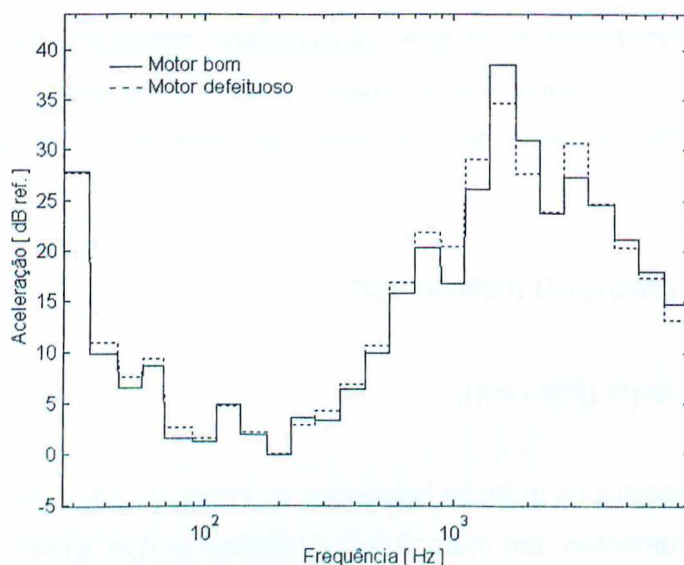


Figura 4.17: Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso.

Pela figura 4.17 pode-se verificar onde ocorrem as principais variações devido à falha existente no motor. Tal defeito produz um aumento no nível de energia em algumas faixas de frequência, sendo que os principais ocorrem nas regiões de 600 a 1400 Hz e na de 3000 a 4000 Hz.

Pelo espectro simples pode-se visualizar mais facilmente as mudanças ocorridas, como pode ser visto na figura 4.18.

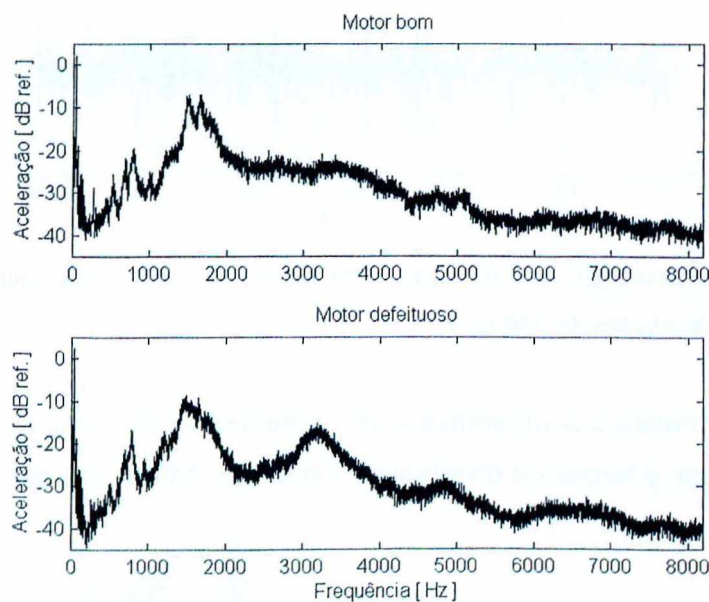


Figura 4.18: Espectros dos motores bom e defeituoso.

O aumento no nível de energia na região de 3300 Hz (região de uma das frequências naturais do comando de válvulas, tabela 3.1) é nítido, ocorre uma elevação da ordem de 8 dB ref, uma outra variação observada, apesar de ser menos enfática, é um pequeno aumento na região de 800 Hz.

De modo a se verificar o que provoca o aumento nestas regiões, utiliza-se a técnica do envelope do espectro. As figuras 4.19 e 4.20 representam os sinais filtrados com um filtro Butterworth de 4ª ordem, passa-banda, com $f_1 = 600$ Hz e $f_2 = 900$ Hz, e o espectro do envelope dos sinais.

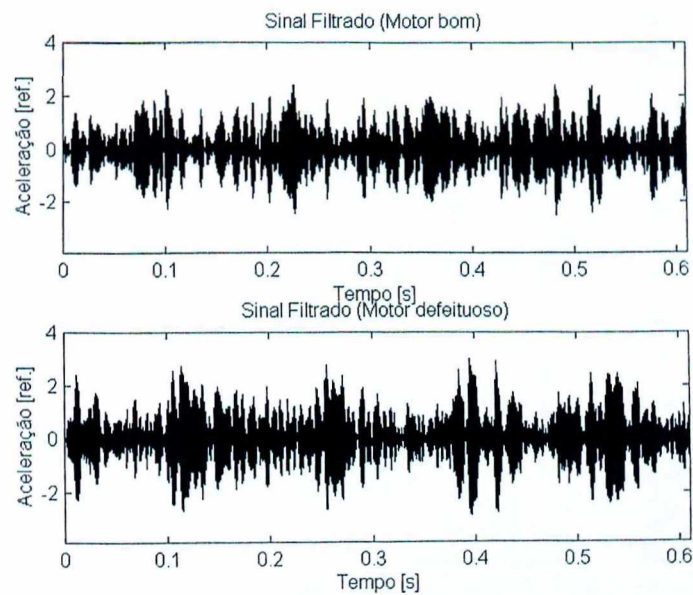


Figura 4.19: Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 600$ Hz e $f_2 = 900$ Hz).

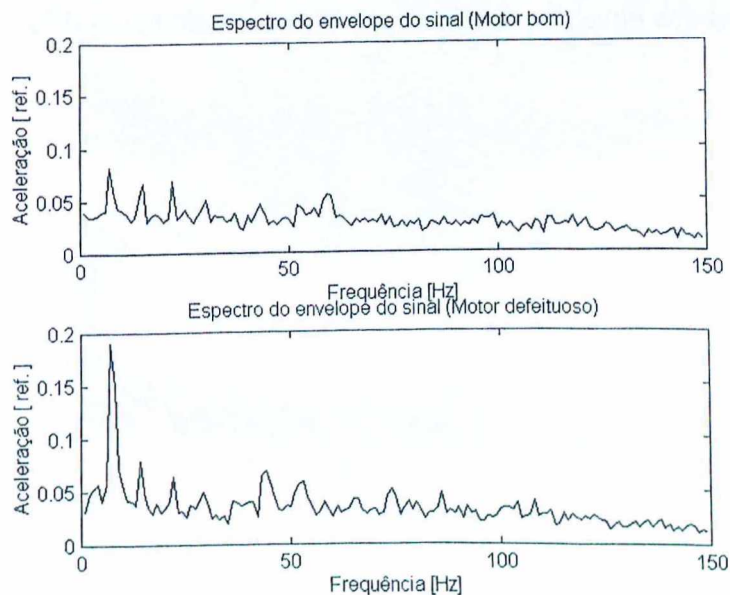


Figura 4.20: Espectros dos envelopes dos sinais.

Pela figura 4.19 é difícil se fazer qualquer análise, devido à complexidade do sinal no domínio do tempo. Analisando os espectros dos envelopes dos sinais (figura 4.20), pode-se verificar que ocorrem variações significativas entre os dois espectros. No espectro do motor defeituoso, ocorre um aumento no nível de energia do primeiro pico, situado em 7 Hz, a amplitude deste pico dobra, em relação ao do espectro do motor bom.

De modo a se analisar a região onde se tem um grande aumento no nível de energia, filtra-se o sinal com $f_1 = 2700$ Hz e $f_2 = 3700$ Hz, a figura 4.21 representa os sinais após este procedimento.

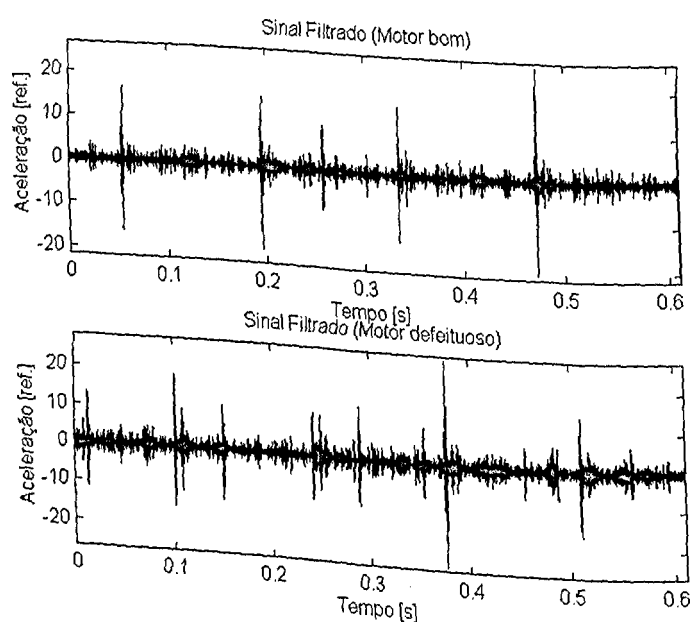


Figura 4.21: Sinal no tempo após uso do filtro ($f_1 = 2700$ Hz e $f_2 = 3700$ Hz).

Os espectros dos envelopes estão representados pela figura 4.22.

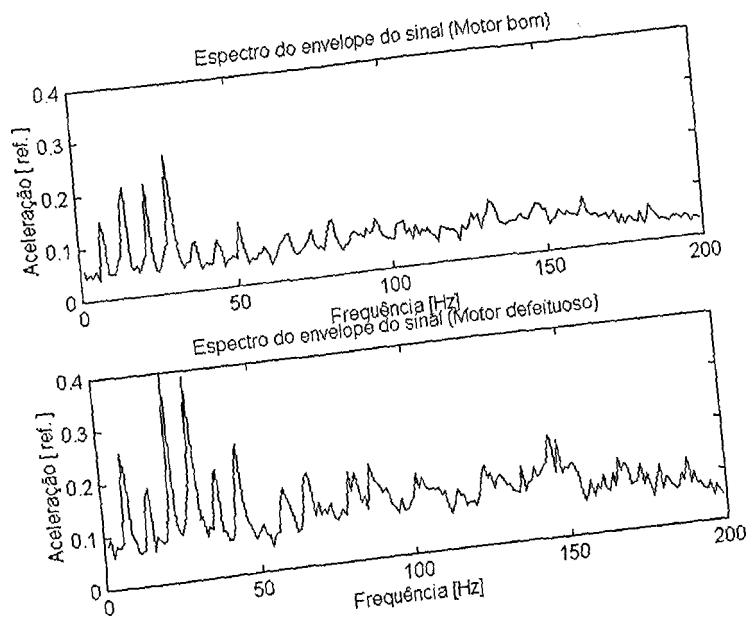


Figura 4.22: Espectros dos envelopes dos sinais.

Algumas mudanças entre os dois espectros podem ser notadas. Há um aumento no nível de energia do primeiro pico (7 Hz), bem como do 3º (22 Hz) e 4º (29 Hz), sendo que o restante do espectro é praticamente igual. Apesar de ocorrer um aumento do nível de energia de alguns picos, o aspecto dos espectros é praticamente o mesmo.

A análise cepstral se mostra insatisfatória. Não se nota variações significativas entre o cepstrum do motor bom e o do motor defeituoso, como pode ser visto na figura 4.23.

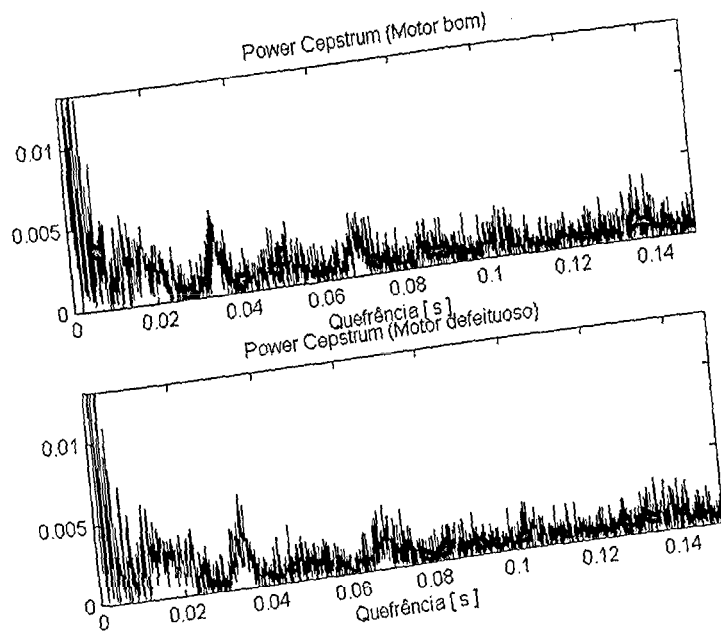


Figura 4.23: Cepstrum dos sinais.

- Motor a 3100 rpm (aceleração)

Os sinais de aceleração dos motores bom e com defeito, a uma rotação de 3100 rpm, são representados pela figura 4.24.

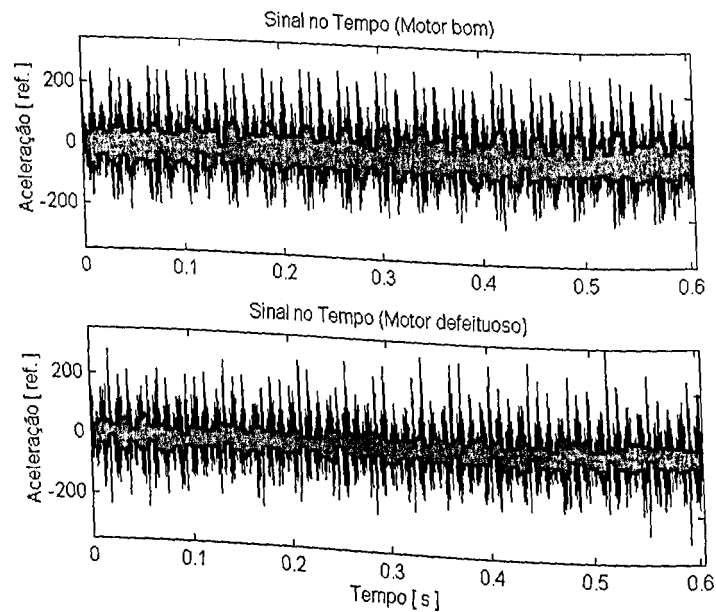


Figura 4.24: Sinais de aceleração de um motor bom e um com tensor da distribuição rumoroso, no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm.

Ambos os gráficos são muito semelhantes, entretanto é possível verificar que alguns picos tem sua amplitude aumentada, mas no geral, pode-se dizer que as variações são mínimas.

Um comparativo entre os espectros em bandas de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso, a uma rotação de 3100 rpm, é representado na figura 4.25.

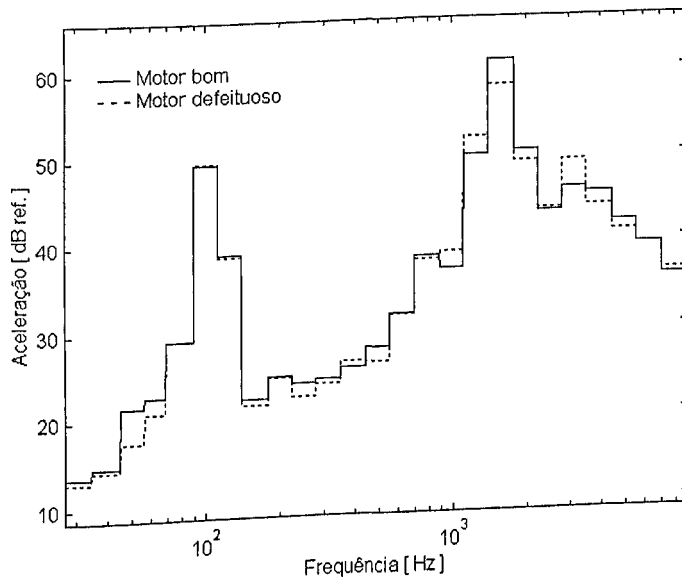


Figura 4.25: Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso.

A principal variação que se observa nos espectros da figura 4.25 é um aumento no nível de energia do sinal na região de 3000 a 4000 Hz. Através dos espectros simples dos sinais pode-se observar de modo claro esta variação (figura 4.26).

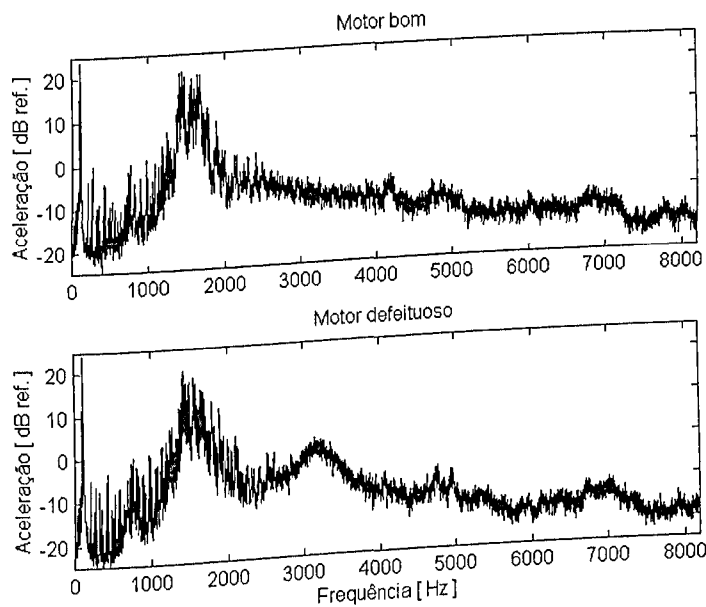


Figura 4.26: Espectros dos motores bom e defeituoso.

De modo a se promover a técnica do envelope, os sinais são filtrados na região de interesse com filtro passa-banda e $f_1 = 2800$ Hz e $f_2 = 3600$ Hz (figura 4.27).

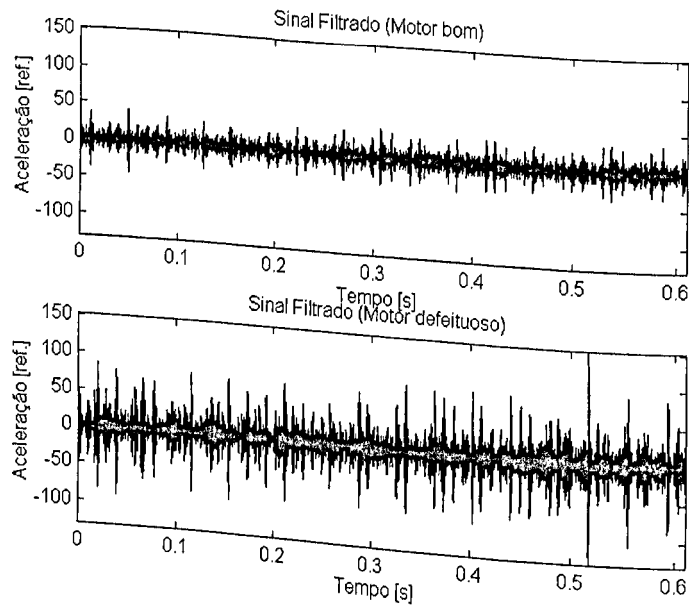


Figura 4.27: Sinal no tempo após uso do filtro ($f_1 = 2800$ Hz e $f_2 = 3600$ Hz).

Verifica-se que o sinal proveniente do motor defeituoso, apresenta no geral uma amplitude maior que aquela do motor considerado bom, como observa-se na figura 4.27, mostrando assim que o nível de vibração neste intervalo de frequência aumenta devido ao defeito.

Após o procedimento da técnica do envelope tem-se o espectros dos envelopes, representados pela figura 4.28.

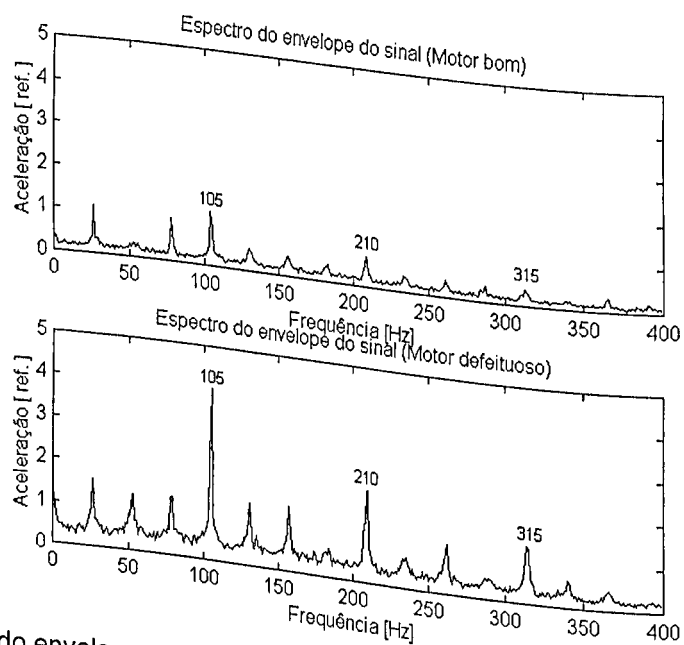


Figura 4.28: Espectro do envelope dos sinais.

O defeito em questão provoca um aumento (o valor triplica) do pico em 105 Hz, que corresponde à frequência de combustão do motor. Também provoca o aumento do segundo harmônico deste pico (210 Hz), bem como do 3º harmônico (315 Hz), o que está bem caracterizado na figura 4.28.

O cepstrum do sinal do motor defeituoso apresenta algumas variações em relação ao do motor bom (figura 4.29).

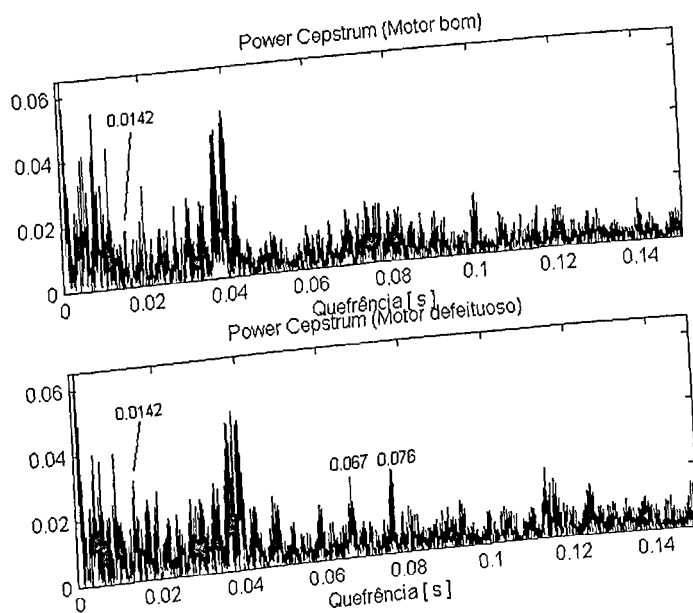


Figura 4.29: Cepstrum dos sinais.

Na quefrência de 0,076 s (13,16 Hz) ocorre o surgimento de um pico, o qual não é bem definido no cepstrum do motor bom. Outro pico que surge é aquele localizado em 0,067 s (15 Hz) e um outro fica em 0,0142 s (70,4 Hz), o que equivale ao 2º harmônico da rotação da polia da distribuição.

- Motor a 3100 rpm (pressão sonora)

A figura 4.30 mostra os gráficos de pressão sonora no domínio do tempo de um motor bom e um com tensor da distribuição ruidoso, a 3100 rpm.

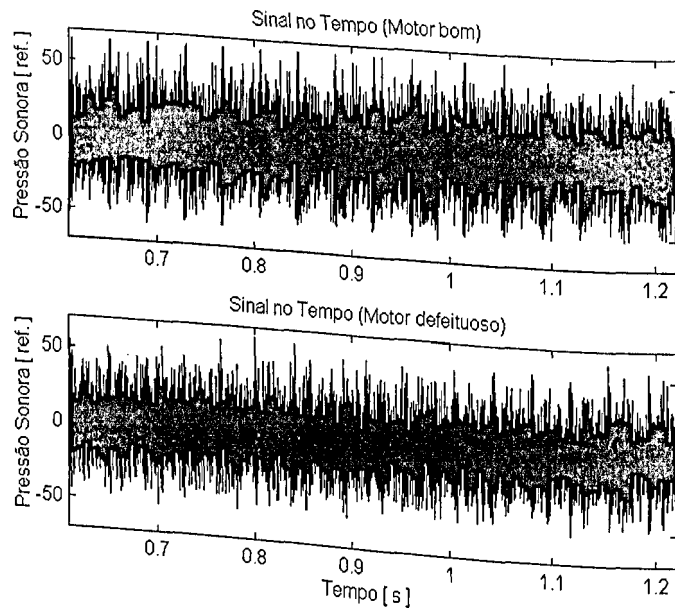


Figura 4.30: Sinais de pressão sonora de um motor bom e um com tensor da distribuição ruidoso, no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm.

No domínio do tempo não é possível observar variações entre os gráficos do motor bom e do defeituoso.

Os espectros de 1/3 de oitava de pressão sonora dos motores bom e defeituoso, a uma rotação de 3100 rpm, estão representados na figura 4.31.

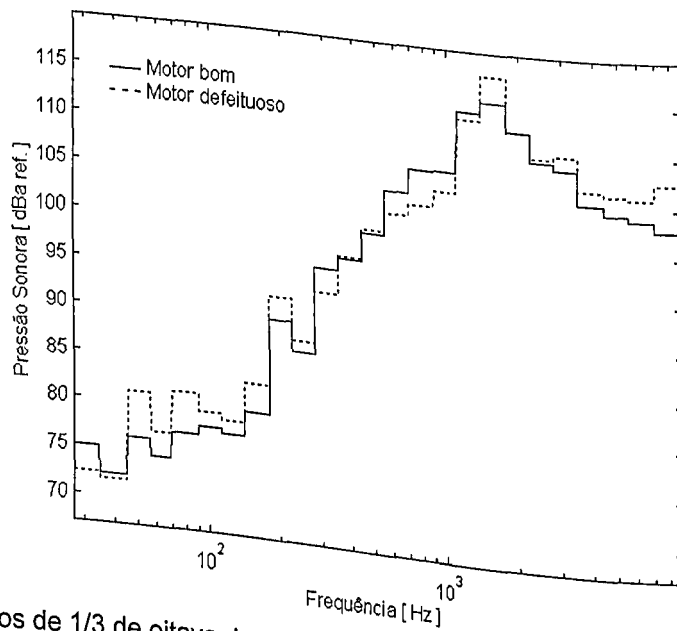


Figura 4.31: Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso.

Nas baixas frequências tem-se um aumento no nível de energia do sinal, o mesmo ocorrendo em torno de 1800Hz e a partir de 4000 Hz até 8192 Hz, como está mostrando a figura 4.31.

Na figura 4.32 tem-se os espectros simples dos sinais dos motores.

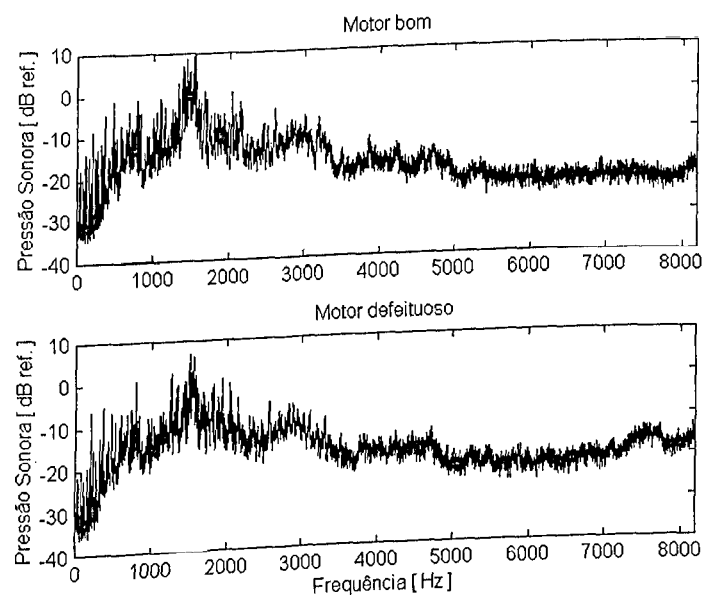


Figura 4.32: Espectros dos motores bom e defeituoso.

Como já visto anteriormente, no espectro em bandas de 1/3 oitava, ocorre aumento no nível de energia do sinal nas baixas frequências, e também nas altas frequências, principalmente entre 7200 a 8000 Hz, região na qual se localiza frequências naturais do comando de válvulas, virabrequim e biela (tabela 3.1).

A figura 4.33 representa os sinais no tempo após processo de filtragem, onde se utiliza um filtro passa-banda, com $f_1 = 7200$ Hz e $f_2 = 8000$ Hz.

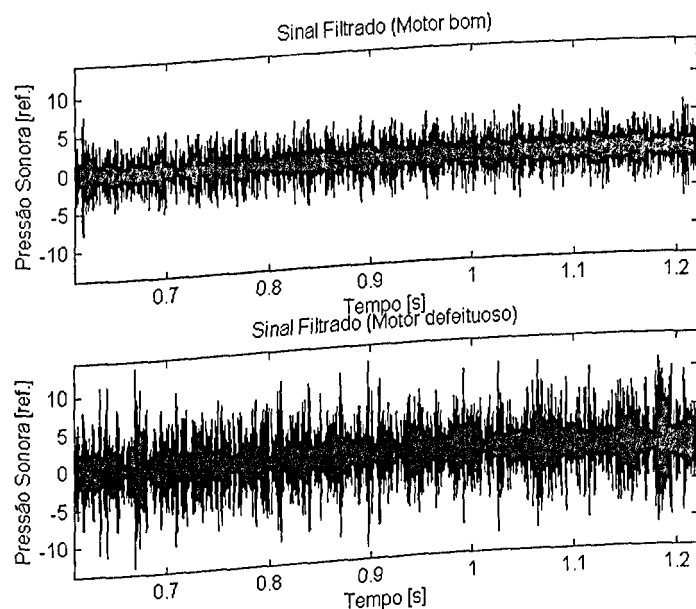


Figura 4.33: Sinais no tempos após uso do filtro ($f_1 = 7200$ Hz e $f_2 = 8000$ Hz).

Apesar da complexidade dos sinais, pode-se verificar que no sinal proveniente do motor com defeito, a amplitude do mesmo é quase o dobro daquela referente à do motor considerado bom (figura 4.33).

Promovendo os espectros dos envelopes dos sinais, tem-se a figura 4.34, a qual representa os espectros dos motores bom e defeituoso.

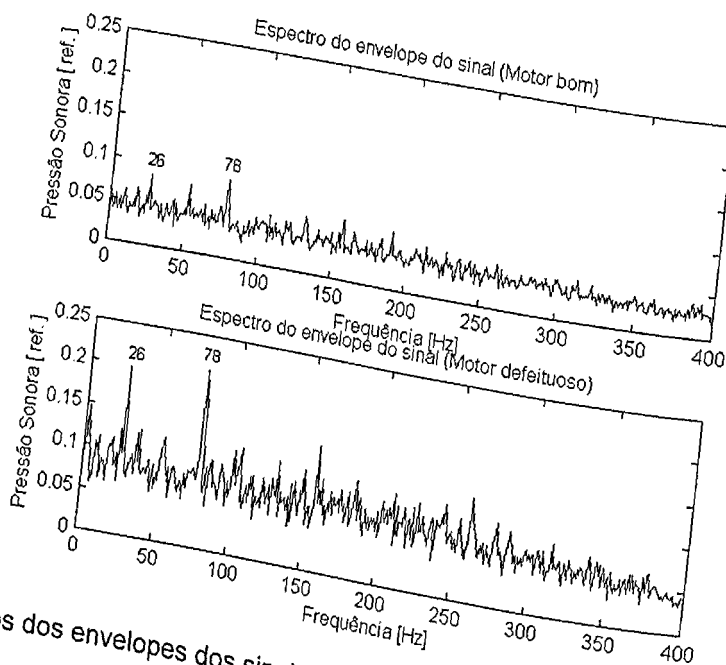


Figura 4.34: Espectros dos envelopes dos sinais.

A principal variação que pode ser observada é a elevação da amplitude dos picos situados em 26 Hz e em 78 Hz, os quais triplicam o valor de sua amplitude no espectro do motor defeituoso.

Os cepstrum referentes aos motores bom e defeituoso praticamente não tem variações, sendo que ambos tem as mesmas características, como mostrado pela figura 4.35.

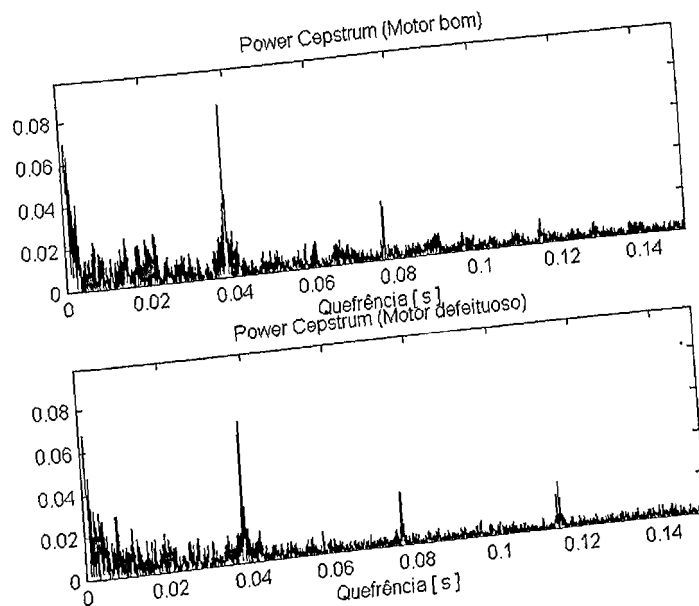


Figura 4.35: Cepstrum dos sinais.

4.3 TENSOR DO ALTERNADOR RUMOROSO

- Motor em marcha lenta (850 rpm)

Os sinais de aceleração no domínio do tempo dos motores bom e com tensor do alternador rumoroso, a uma rotação de 850 rpm, são mostrados na figura 4.36.

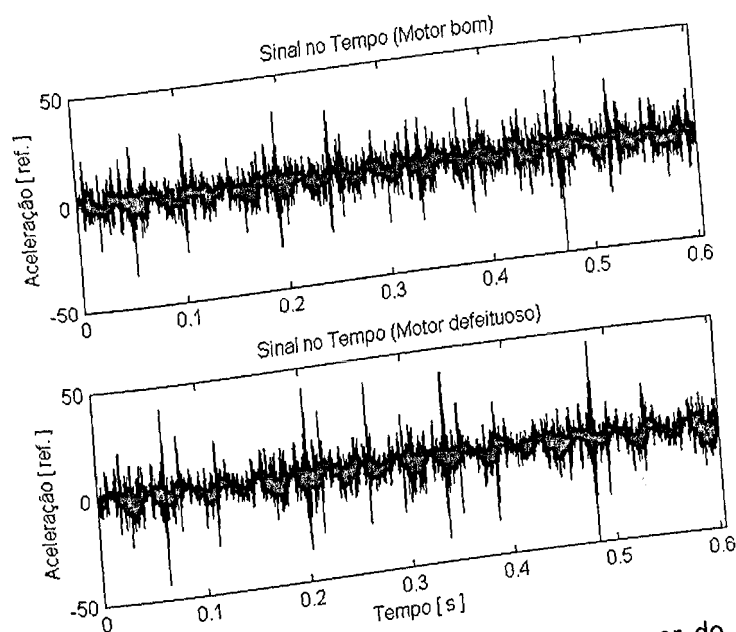


Figura 4.36: Sinais de aceleração de um motor bom e um com tensor do alternador rumoroso, no domínio do tempo, a uma rotação de 850 rpm.

Ambos os gráficos apresentam o mesmo aspecto, não sendo possível verificar alterações no gráfico referente ao motor com o defeito.

Os espectros em bandas de 1/3 de oitava dos motores bom e com defeito, a 850 rpm, estão representados pela figura 4.37.

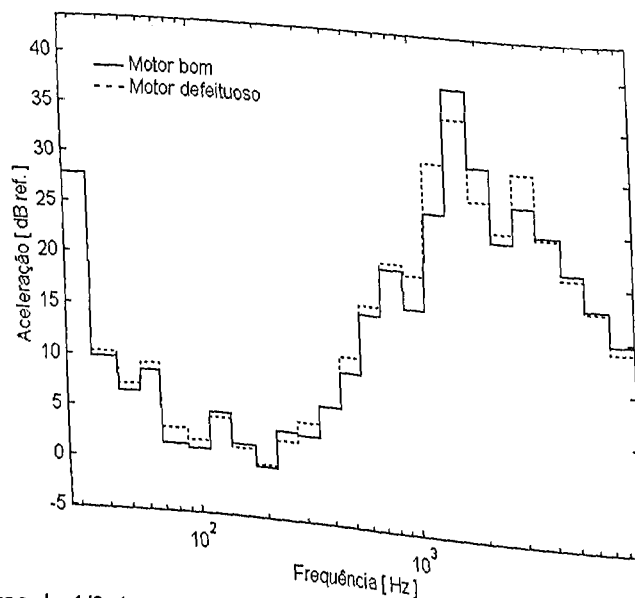


Figura 4.37: Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso.

As principais mudanças que ocorrem devido à presença do defeito, é o aumento no nível de energia nas regiões de 900 a 1400 Hz, e na de 2800 a 4000 Hz. Estas variações podem ser melhor visualizadas através das figuras 4.38 e 4.39, onde se tem os espectros simples dos sinais, bem como um "Zoom" da região onde ocorrem as maiores variações.

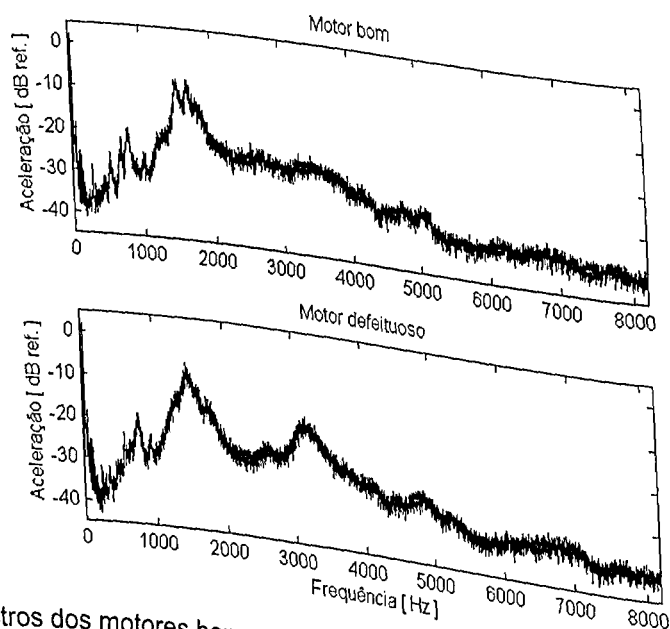


Figura 4.38: Espectros dos motores bom e defeituoso.

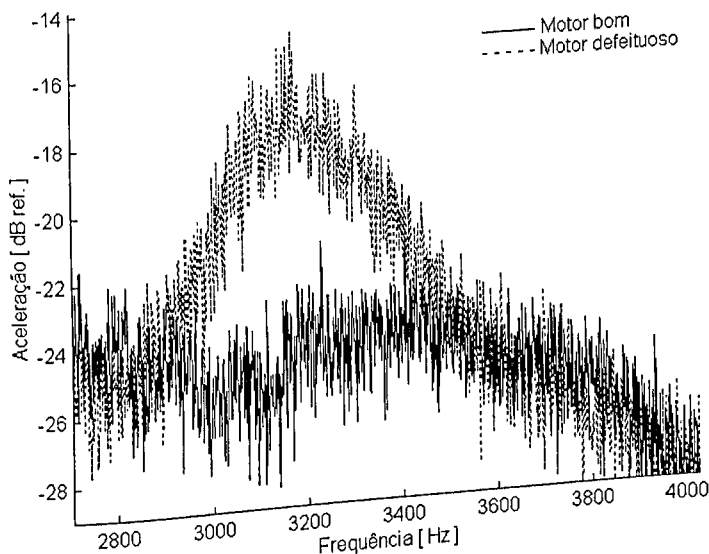


Figura 4.39: "Zoom" da região onde se tem as maiores variações.

A figura 4.39 mostra que na região de 3200 hz ocorre o aumento do nível de energia do espectro do motor defeituoso da ordem de 10 dB ref.

Promovendo uma filtragem dos sinais com um filtro passa-banda, com $f_1 = 2800$ Hz e $f_2 = 3600$ Hz, tem-se os sinais representados na figura 4.40.

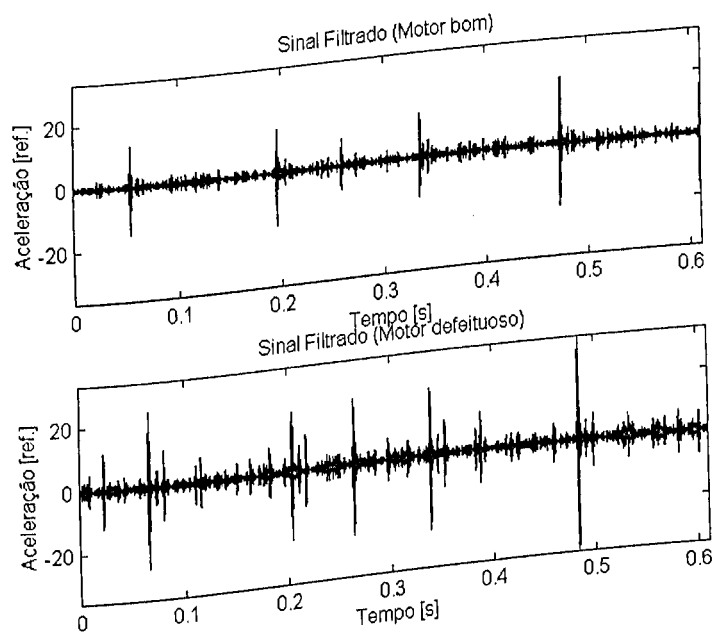


Figura 4.40: Sinais no tempos após uso do filtro ($f_1 = 2800$ Hz e $f_2 = 3600$ Hz).

Observando os sinais no domínio do tempo, após o uso do filtro, pode-se observar que em alguns pontos, a amplitude do sinal relativo ao motor com defeito é o dobro da proveniente do motor bom.

Os espectros dos envelopes dos sinais filtrados estão representados na figura 4.41.

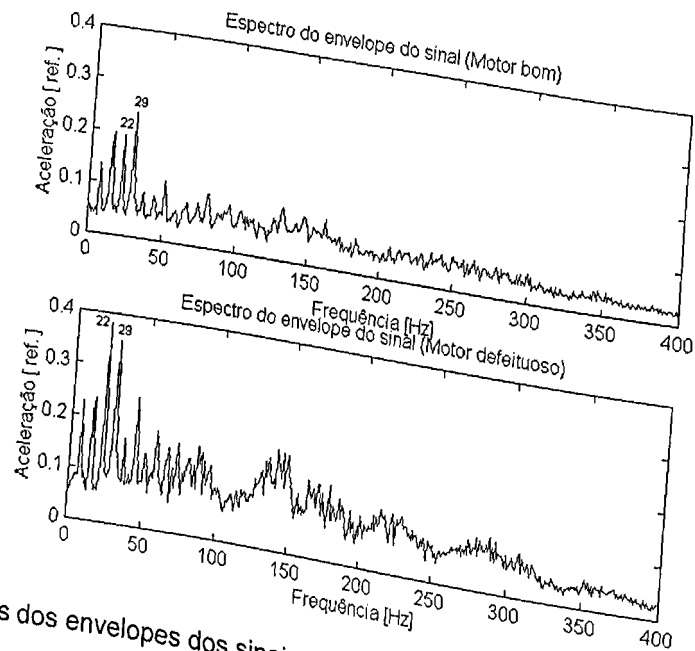


Figura 4.41: Espectros dos envelopes dos sinais.

O aspecto geral dos espectros são parecidos, entretanto verifica-se que o espectro referente ao motor com defeito apresenta um nível de energia mais elevado que o do motor bom, como pode ser visto na figura 4.41. As componentes em 22 e em 29 Hz, apresentam os maiores aumentos (o dobro da amplitude). O espaçamento entre os picos equivale a 7 Hz, ou seja, a frequência de rotação do comando de válvulas.

A análise cepstral não se mostra eficiente para este caso, uma vez que o cepstrum do motor bom é praticamente idêntico ao do motor com defeito, o que pode ser comprovado pela figura 4.42.

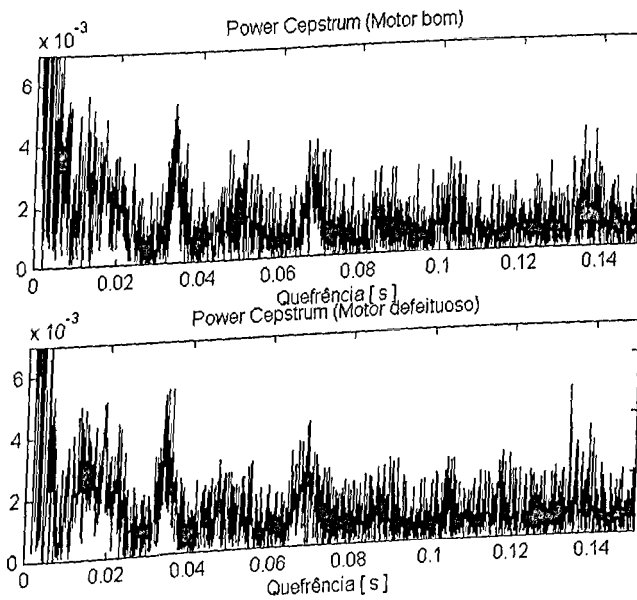


Figura 4.42: Cepstrum dos sinais.

- Motor a 3100 rpm (aceleração)

A figura 4.43 apresenta os gráficos de aceleração no domínio do tempo dos motores bom e com tensor do alternador rumoroso, a uma rotação de 3100 rpm.

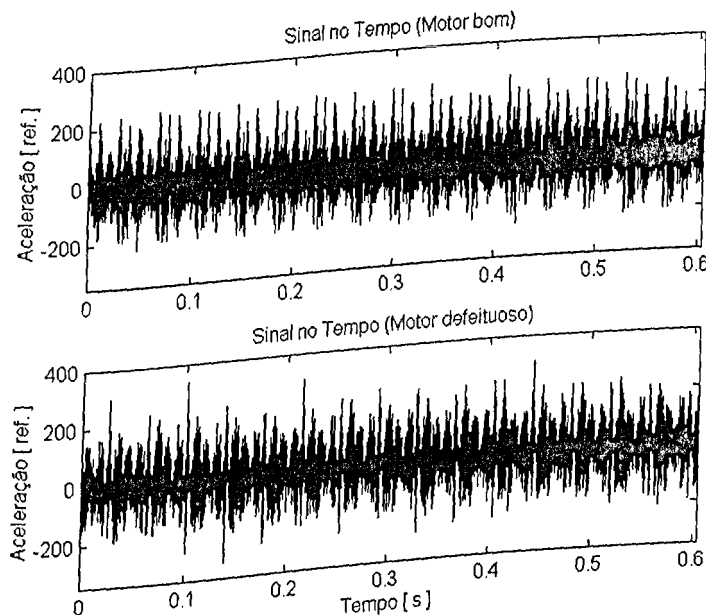


Figura 4.43: Sinais de aceleração de um motor bom e um com tensor do alternador rumoroso, no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm.

Pela análise dos gráficos, verifica-se que devido à complexidade dos mesmos, é difícil tecer comentários ou fazer observações a partir dos mesmos.

Os espectros em bandas de 1/3 de oitava dos motores à 3100 rpm, estão representados pela figura 4.44.

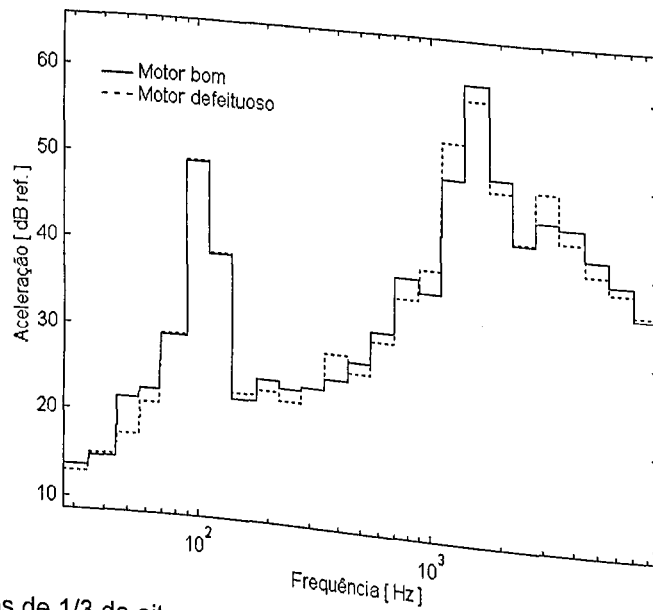


Figura 4.44: Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso.

As principais variações observadas são praticamente as mesmas que acontecem para o caso de rotação à 850 rpm: a ocorrência de um aumento no nível de energia nas regiões de 900 a 1400 Hz e de 3000 a 4000 Hz, como pode ser visto na figura 4.45.

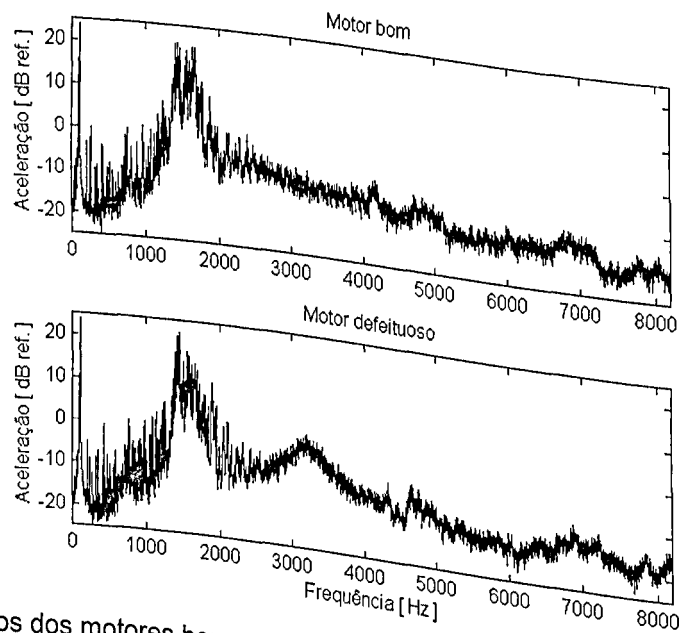


Figura 4.45: Espectros dos motores bom e defeituoso.

Através da figura 4.45, é possível verificar que o aumento que ocorre em torno de 3200 hz é da ordem de 10 dB ref, sendo esta a mais significativa variação observada.

A figura 4.46 representa os sinais no tempo após a filtragem dos mesmos utilizando um filtro passa-banda com $f_1 = 2800$ Hz e $f_2 = 3800$ Hz e os espectros dos envelopes dos sinais após o uso do filtro estão representados pela figura 4.47.

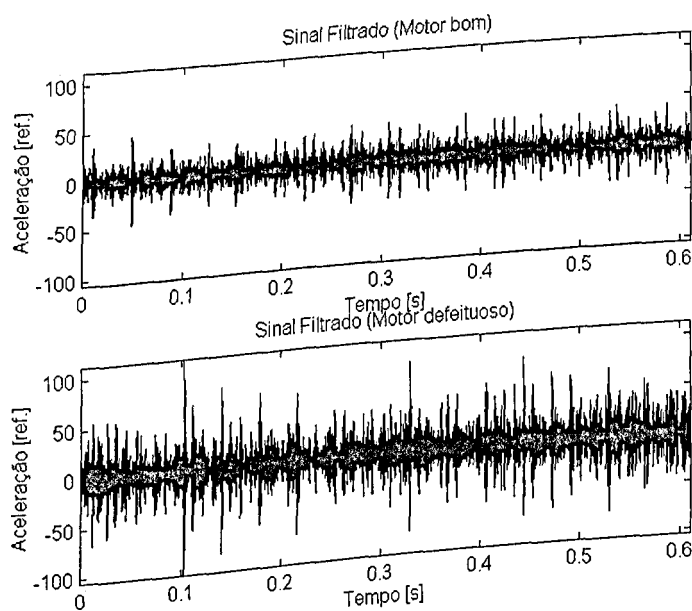


Figura 4.46: Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 2800$ Hz e $f_2 = 3800$ Hz).

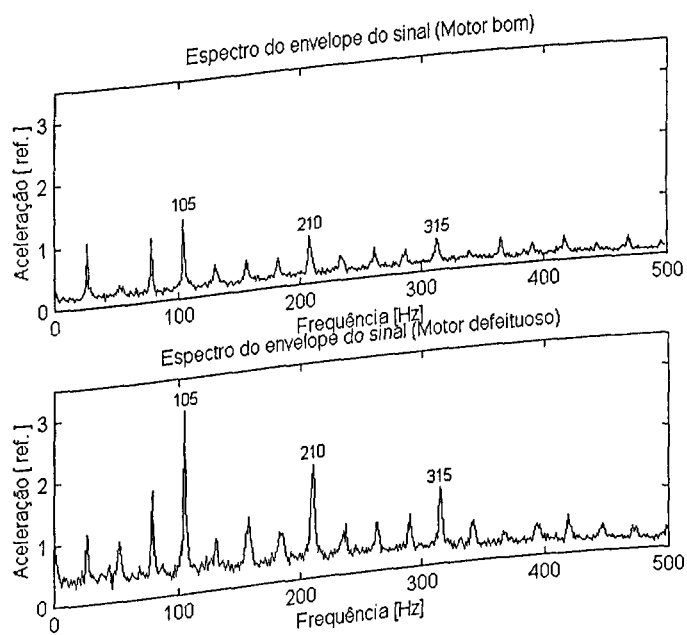


Figura 4.47: Espectros dos envelopes dos sinais.

Pela figura 4.46, verifica-se que a amplitude dos sinais são diferentes, o sinal proveniente do motor com o defeito apresenta níveis maiores, sendo sua amplitude praticamente o dobro da do motor considerado bom.

Analisando os espectros (figura 4.47), observa-se que o nível de energia do sinal na frequência de 105 Hz (frequência de combustão), dobra para o caso do motor defeituoso, bem como o de seus harmônicos (2° e 3°) em 210 e 315 Hz.

Realizando-se a análise cepstral dos sinais, pode-se verificar algumas variações entre o cepstrum do motor bom e do com defeito. Na frequência de 0,0195s (51,3 Hz, frequência de rotação do motor), ocorre um aumento na amplitude para o caso do motor com defeito, como pode ser visto na figura 4.48.

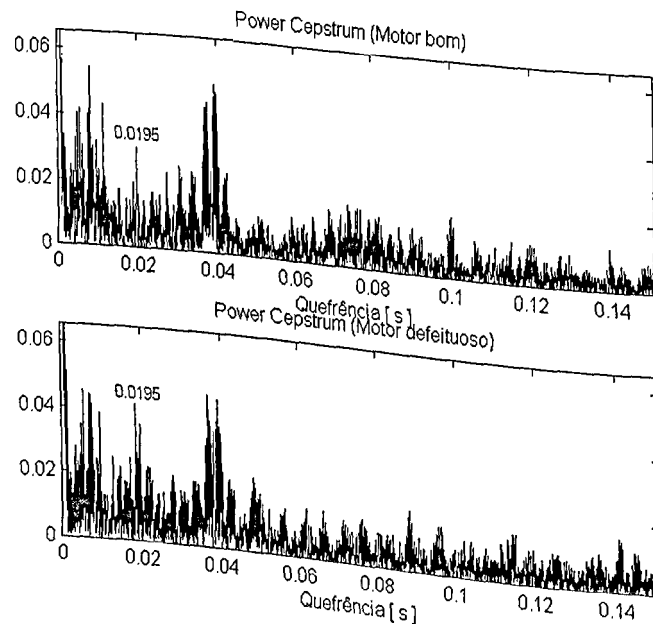


Figura 4.48: Cepstrum dos sinais.

- Motor a 3100 rpm (pressão sonora)

Os gráficos de pressão sonora no domínio do tempo estão representados na figura 4.49, onde se tem o gráfico de um motor bom e de um com tensor do alternador rumoroso, a complexidade do mesmo.

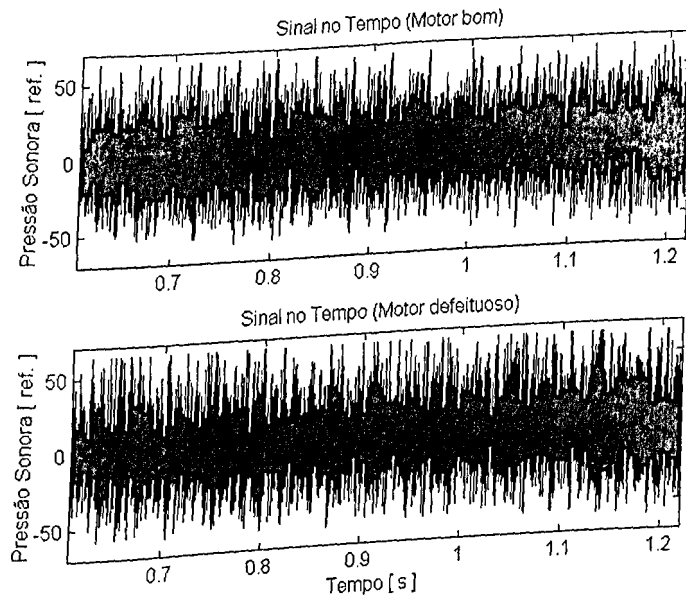


Figura 4.49: Sinais de pressão sonora de um motor bom e um com tensor do alternador rumoroso, no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm.

Os espectros de pressão sonora em bandas de 1/3 de oitava dos motores bom e com defeito estão representados pela figura 4.50.

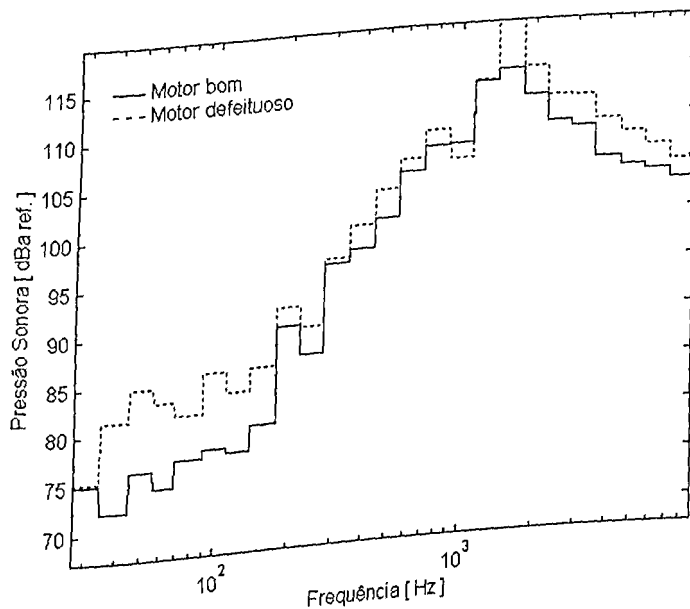


Figura 4.50: Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso.

Ocorre um aumento no nível de energia do sinal em praticamente todas as faixas de frequência, sendo que as mais significativas ocorrem nas baixas frequências e na região de 1500 a 1800 Hz, como pode ser visto na figura 4.50.

Estas variações podem ser observadas de modo mais detalhado através das figuras 4.51 e 4.52, que representam o espectro simples e "Zoom" das regiões onde ocorrem as principais variações.

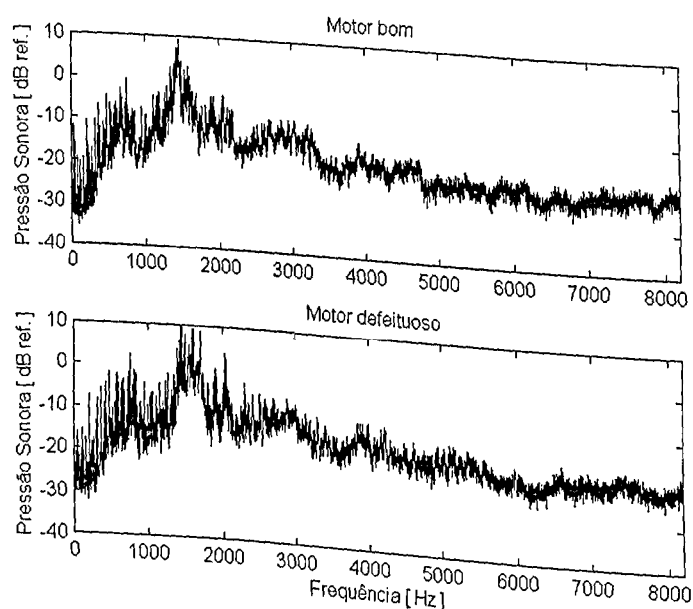


Figura 4.51: Espectros dos motores bom e defeituoso.

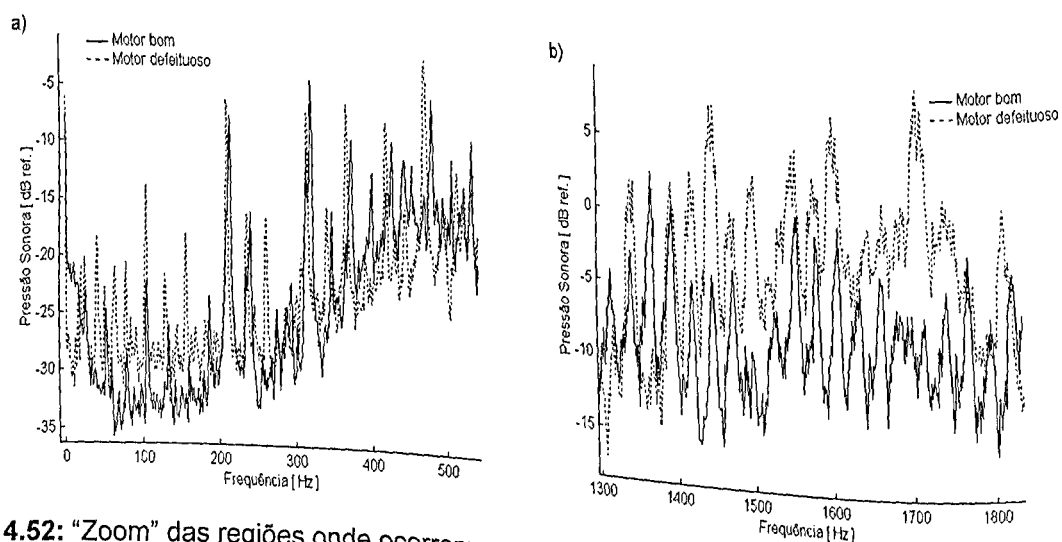


Figura 4.52: "Zoom" das regiões onde ocorrem as principais variações.

O defeito em questão provoca o aumento do nível de energia do pico situado na frequência de combustão, 105 Hz, bem como dos outros picos que estão entre 0 e 200 Hz, como pode ser visto na figura 4.52a. Na região compreendida entre 1300 a 1900 Hz, pode-se observar que há um aumento geral no nível de energia do sinal, vários picos tem sua amplitude aumentada, sendo que o principal aumento ocorre em torno de 1720 Hz (figura 4.52b).

Observando a figura 4.51, verifica-se que a partir de 3000 Hz até 6000 Hz, há uma elevação da amplitude do sinal, sendo que em média esta elevação é da ordem de 5 dB ref.

As figuras 4.53 e 4.54 representam respectivamente os sinais no tempo após o uso do filtro passa-baixa, com $f_c = 1000$ Hz e os espectros dos envelopes dos sinais filtrados.

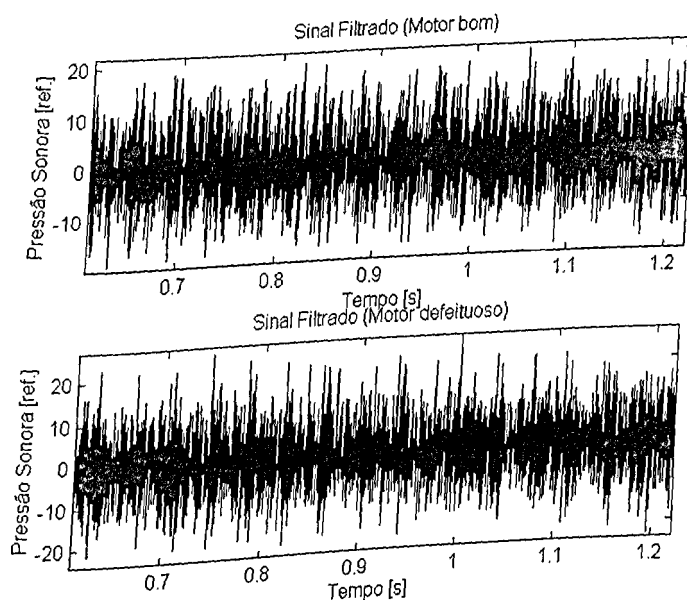


Figura 4.53: Sinais no tempo após uso do filtro ($f_c = 1000$ Hz).

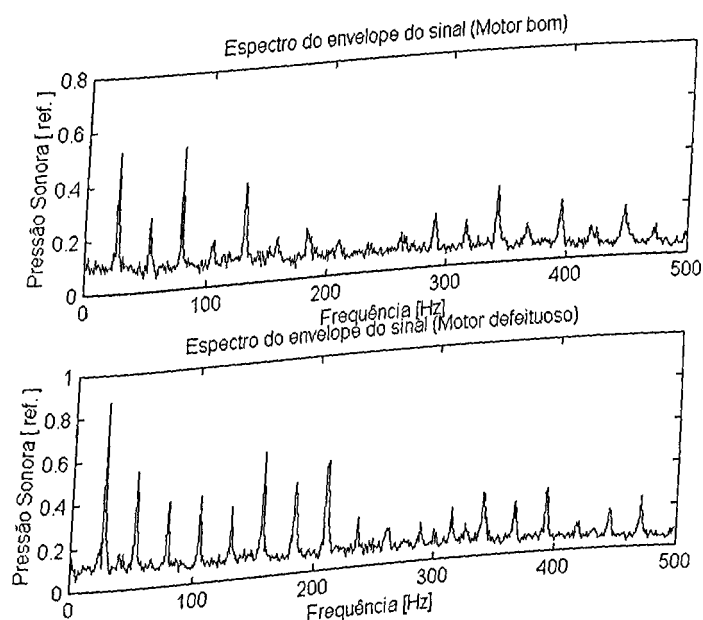


Figura 4.54: Espectros dos envelopes dos sinais.

Analisando-se os espectros dos envelopes, observa-se que ocorrem algumas variações entre eles. Há um aumento no nível de energia do primeiro pico, o qual situa-se em

aproximadamente 26 Hz. Pode-se verificar também que o pico situado na frequência de rotação do motor (52 Hz) e seus harmônicos, tem uma elevação do nível de energia.

As figuras 4.55 e 4.56 representam os sinais no tempo após uso de filtro passa-banda, com $f_1 = 1300$ Hz e $f_2 = 1900$ Hz, e os espectros dos envelopes dos sinais após uso do filtro.

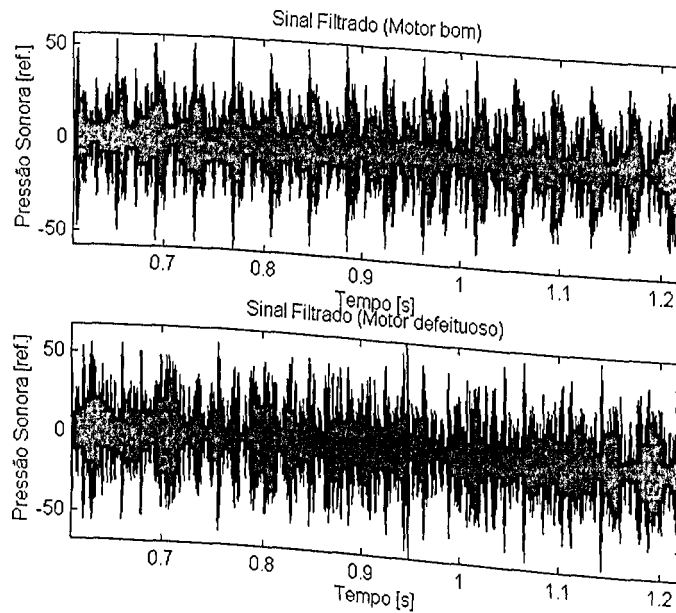


Figura 4.55: Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 1300$ Hz e $f_2 = 1900$ Hz).

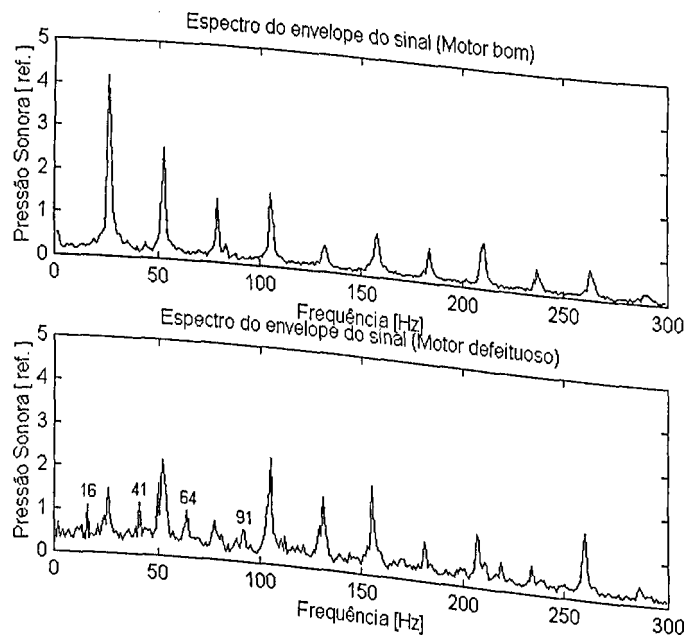


Figura 4.56: Espectros dos envelopes dos sinais.

Observando-se os sinais no tempo verifica-se que para o caso do motor bom, tem-se a presença de picos bem distintos, estes picos estão espaçados por um intervalo de tempo de

aproximadamente 0,038 s, o que dá uma frequência de 26,3 Hz, ou seja, metade da rotação do motor. Já no caso do motor defeituoso, estes picos não aparecem bem definidos.

Analisando-se os espectros dos envelopes destes sinais filtrados (figura 4.55), observa-se que para o caso do motor bom há a presença de picos espaçados de 26 Hz um do outro, e estes picos tem um decaimento do nível de energia com o aumento da frequência. Já para o caso do motor com defeito, ocorre uma diminuição da amplitude de alguns picos e também há o surgimento de outros. Em 16, 41, 64, e 91 Hz, surgem picos que não aparecem no espectro do envelope do motor bom. Para estes valores de frequência, não foi possível correlacioná-las a nenhum componente do motor.

Poucas são as diferenças que ocorrem entre o cepstrum do motor defeituoso e do bom, como pode ser visto na figura 4.57.

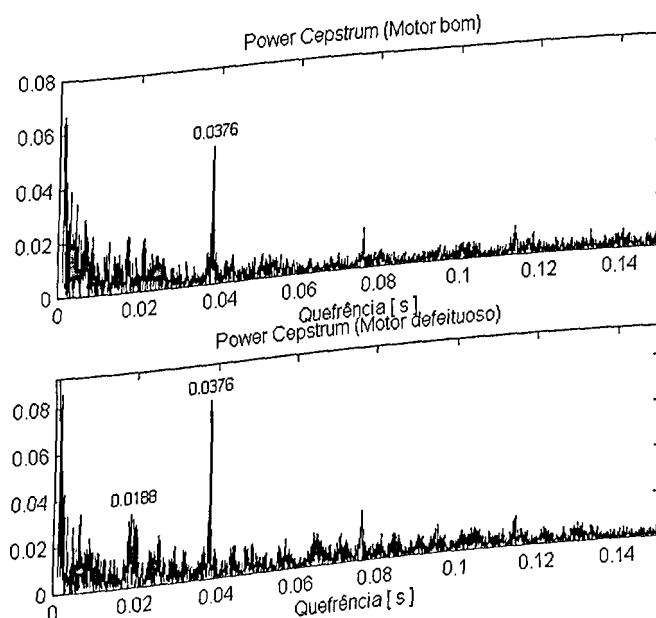


Figura 4.57: Cepstrum dos sinais.

Como pode ser observado na figura 4.67, o defeito provoca um pequeno aumento na amplitude do pico situado na quefrência de 0,0188 s (53 Hz), o que equivale justamente à rotação do motor. Verifica-se também que ocorre um aumento na amplitude do pico situado em 0,0376 s (27 Hz, rotação do comando de válvulas), que é justamente o pico que mais se destaca no gráfico.

4.4 BATIDO DE VÁLVULA

- Motor em marcha lenta (850 rpm)

A figura 4.58 representa os sinais de aceleração no domínio do tempo, de um motor bom e um com batido de válvula, ambos a uma rotação de 850 rpm.

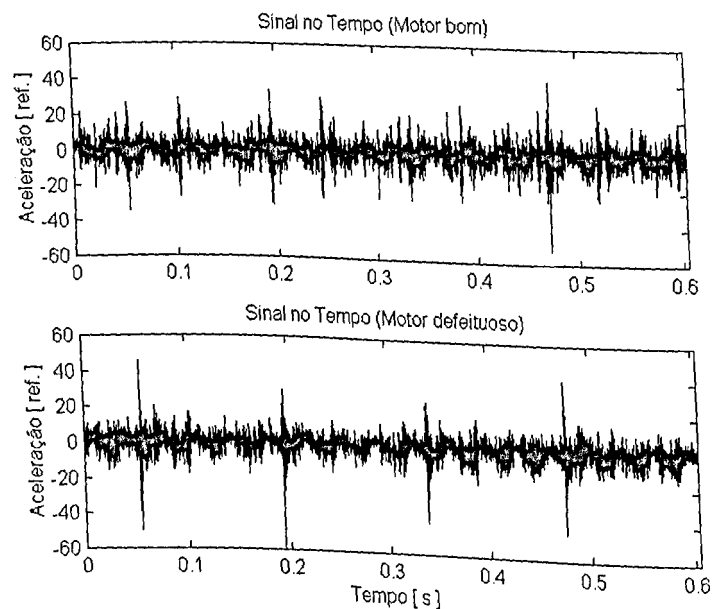


Figura 4.58: Sinais de aceleração de um motor bom e um com batido de válvula, no domínio do tempo, a uma rotação de 850 rpm.

Pode-se observar que o defeito provoca o surgimento de picos, os quais estão espaçados de cerca de 0,14 s, o que corresponde a uma frequência de 7,14 Hz, ou seja, justamente a rotação do comando de válvulas, o qual está diretamente ligado ao problema.

A figura 4.59 mostra o comparativo entre os espectros em bandas de 1/3 de oitava de um motor bom e um com batido de válvula.

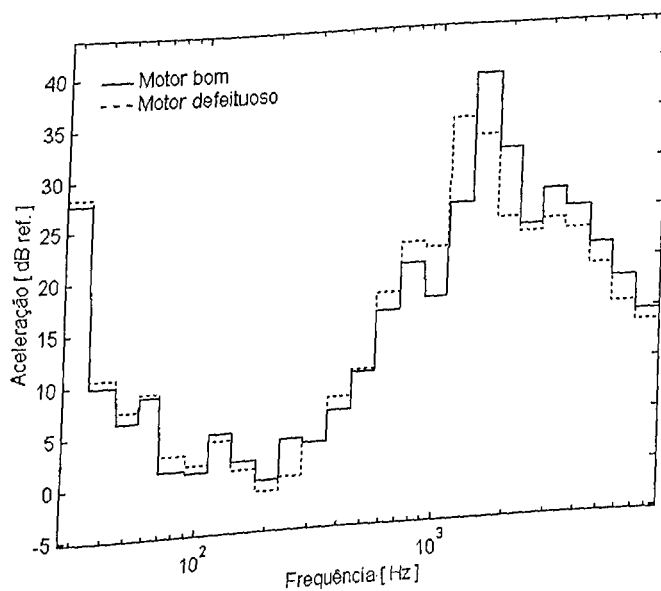


Figura 4.59: Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso.

Observa-se que ocorrem variações em algumas faixas de frequência, sendo que as principais mudanças estão na região de 700 a 1300 Hz, onde há um aumento no nível de energia do sinal. Outra mudança observada ocorre na região de 1500 a 2000 Hz, onde há um grande decaimento da amplitude do sinal.

Estas variações podem ser observadas através do espectro simples dos sinais, o qual é representado pela figura 4.60.

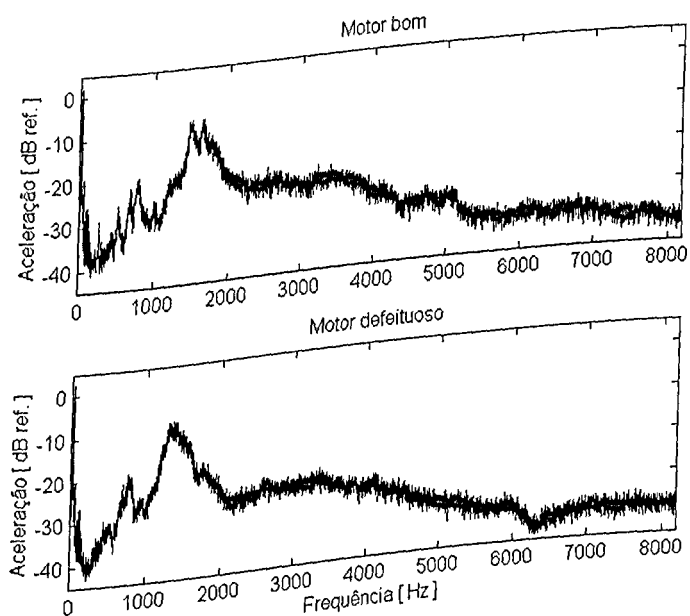


Figura 4.60: Espectros de um motor bom e um defeituoso.

Pela figura 4.60 pode-se verificar que as principais variações ocorrem na região compreendida entre 600 e 3000 Hz. Através da figura é possível verificar que o defeito batido de válvula (na rotação de 850 rpm) promove um deslocamento do pico situado na região de 1200 a 2200 Hz, para a região entre 1000 e 2000 Hz.

A figura 4.61 representa os sinais no tempo após o procedimento de filtragem, onde se utiliza um filtro Butterworth de 4ª ordem, passa-banda, sendo $f_1 = 600$ Hz e $f_2 = 800$ Hz.

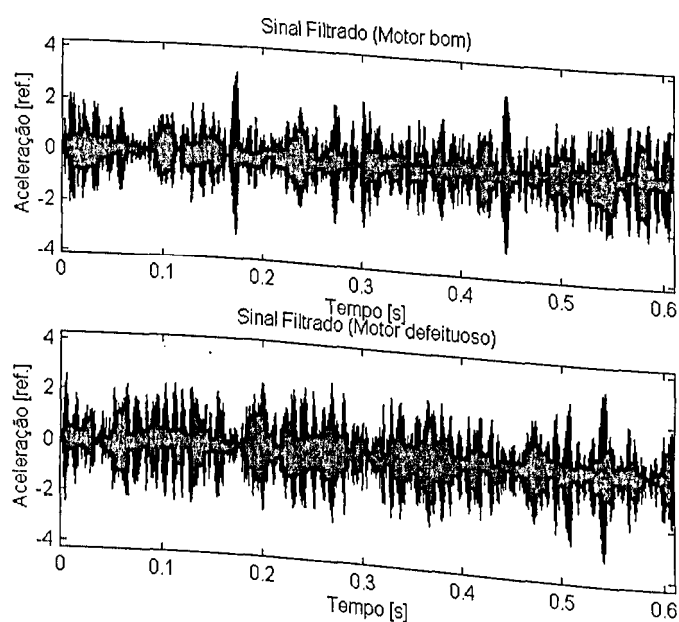


Figura 4.61: Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 600$ Hz e $f_2 = 800$ Hz).

Nota-se que os sinais são bem diferentes, entretanto é muito difícil fazer qualquer observação a partir deles, devido à complexidade dos mesmos. A figura 4.62 representa os espectros dos envelopes destes sinais filtrados.

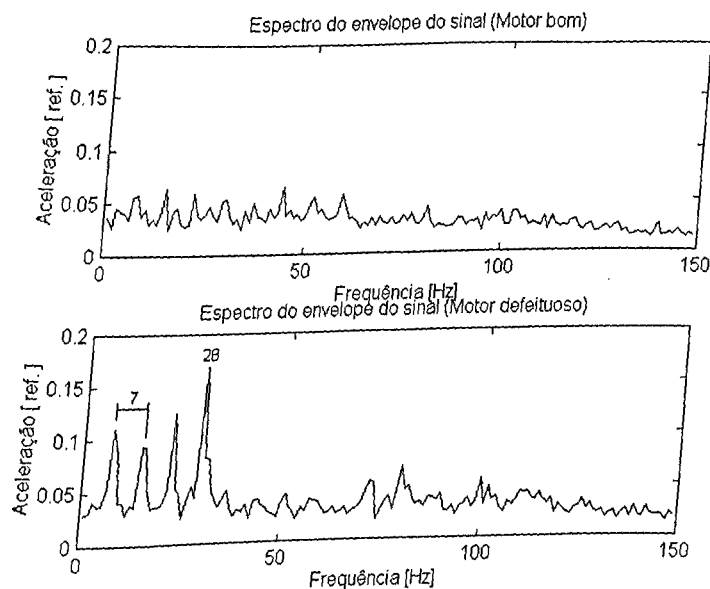


Figura 4.62: Espectros dos envelopes dos sinais.

O defeito em questão provoca o surgimento de picos espaçados de cerca de 7 Hz, como pode ser visto na figura 4.62. No espectro do motor considerado bom os picos ocorrem, mas com um nível de energia bem mais baixo, e não de uma maneira acentuada como aparece no espectro do motor defeituoso. O principal pico ocorre em 28 Hz, ou seja, na frequência de combustão do motor. O espaçamento de 7 Hz que ocorre entre os picos corresponde justamente à frequência de rotação do comando de válvulas. Com isto pode-se verificar que o aumento do nível de energia que ocorre nesta região tem como principal causa o problema de batido de válvula, o que já era esperado.

De modo a se analisar a outra região onde se observa as maiores discrepâncias ocorridas entre os sinais, repete-se o procedimento da Técnica do espectro do envelope. Na figura 4.63 tem-se os gráficos dos sinais, no domínio do tempo, após o uso do filtro Butterworth de 4ª ordem com $f_1 = 1200$ Hz e $f_2 = 2000$ Hz.

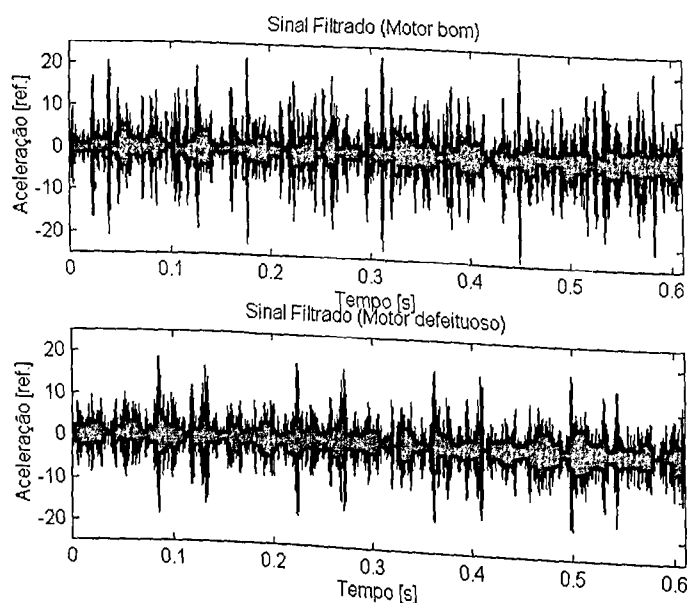


Figura 4.63: Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 1200$ Hz e $f_2 = 2000$ Hz).

Ocorrem diferenças entre os dois sinais, entretanto como no caso anterior, no domínio do tempo torna-se difícil fazer qualquer observação.

Os espectros dos envelopes dos sinais após o uso do filtro estão representados pela figura 4.64.

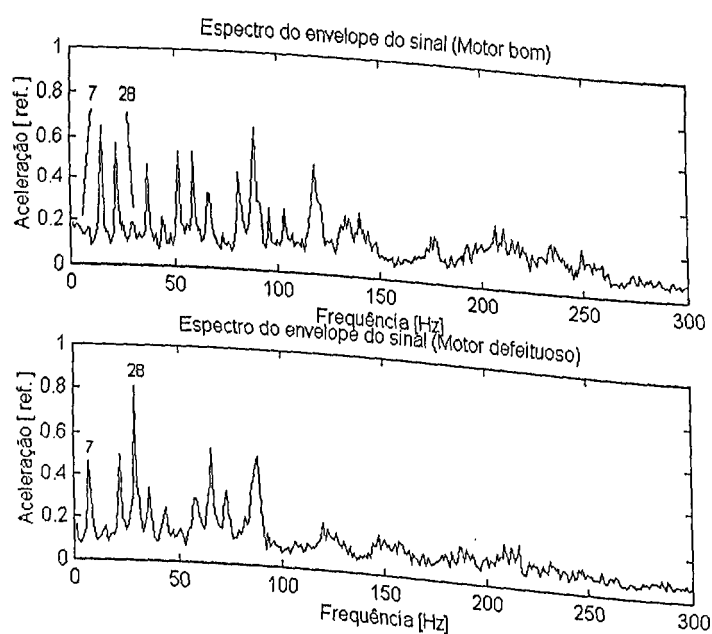


Figura 4.64: Espectros dos envelopes dos sinais.

Ocorrem várias mudanças entre um espectro e outro. Ocorrem variações na amplitude de praticamente todos os picos, sendo que a mais acentuada ocorre em 28 Hz, que no espectro do motor defeituoso tem um grande aumento, o que também ocorre no pico situado

em 7 Hz. O espaçamento entre os picos, tanto no espectro do motor bom como do defeituoso, corresponde a 7 Hz.

A análise Cepstral, para este caso não se mostra eficiente, sendo que não se verifica variações significativas entre o Cepstrum do motor bom e o do defeituoso (figura 4.65).

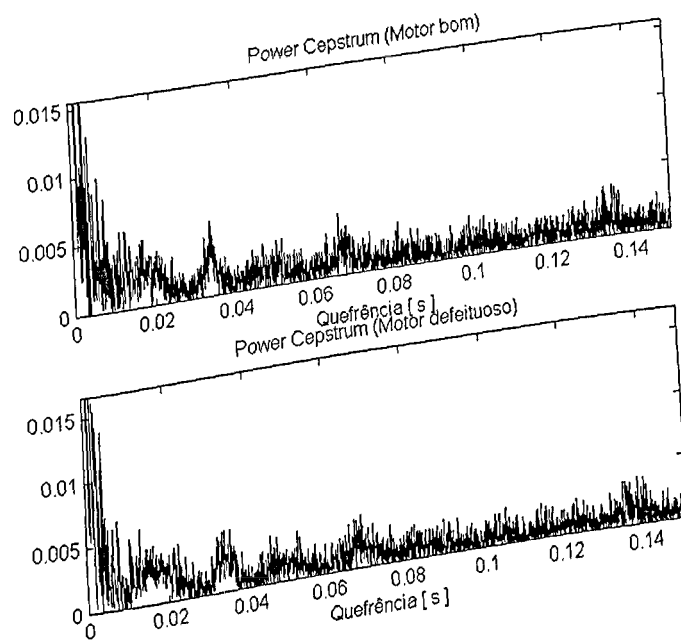


Figura 4.65: Cepstrum dos sinais.

- Motor a 3100 rpm (aceleração)

Os gráficos dos sinais de aceleração no domínio do tempo, dos motores bom e com batido de válvula, a uma rotação de 3100 rpm, estão representados na figura 4.66

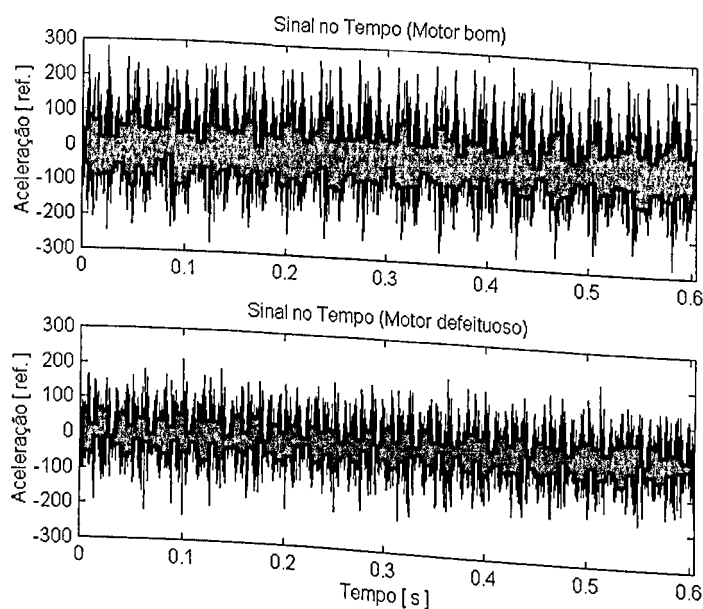


Figura 4.66: Sinais de aceleração de um motor bom e um com batido de válvula no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm.

Ao contrário do que se supunha, o defeito em questão não promove uma elevação na amplitude da aceleração, e sim diminui a amplitude, como pode visto na figura 4.66.

A figura 4.67 representa os espectros em bandas de 1/3 de oitava dos sinais provenientes dos motores bom e defeituoso.

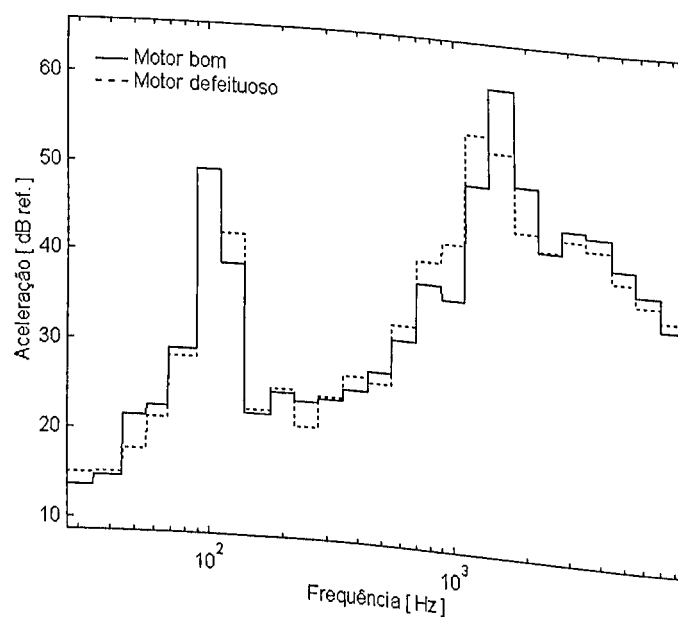


Figura 4.67: Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso.

Como no caso do motor a 850 rpm, as principais variações ocorrem na região de 700 a 1300 Hz. As figuras 4.68 e 4.69 representam os espectros simples e "Zoom" das regiões de interesse.

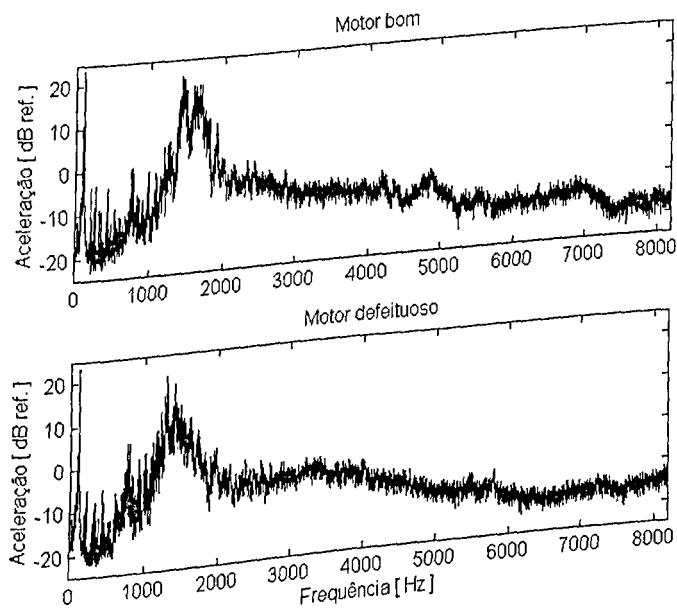


Figura 4.68: Espectros dos motores bom e defeituoso.

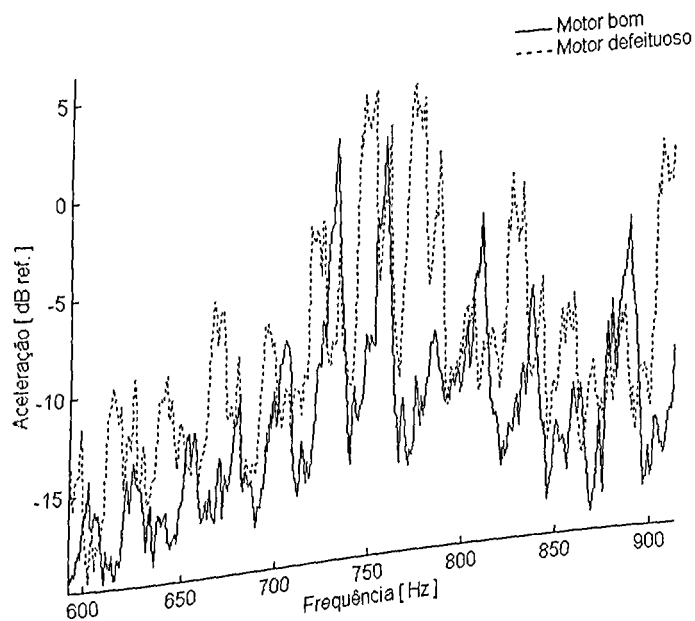


Figura 4.69: "Zoom" da região onde ocorrem variações entre os espectros.

Pela figura 4.68 é possível verificar que ocorrem algumas variações de um espectro para outro. Verifica-se que na região compreendida entre 600 a 900 Hz, há um aumento no nível de energia do sinal, sendo que ocorrem aumentos da ordem de 5 dB ref, o que pode ser melhor visualizado através da figura 4.69. Na frequência de 775 Hz, o aumento é de cerca de

15 dB ref. Na região de 3000 a 4000 Hz, ocorre um aumento geral no nível de energia do sinal da ordem de 4 dB ref.

Após usar filtro Butterworth de 4ª ordem, passa-banda, com $f_1 = 600$ Hz e $f_2 = 900$ Hz, tem-se os sinais no domínio do tempo, conforme a figura 4.70.

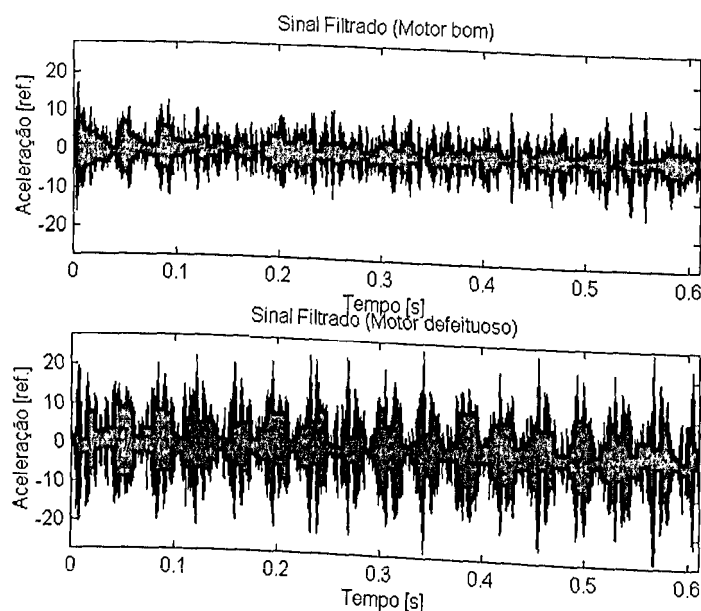


Figura 4.70: Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 600$ Hz e $f_2 = 900$ Hz).

A principal variação que se pode observar a partir da figura 4.68 é que a amplitude do sinal proveniente do motor defeituoso é praticamente o dobro da amplitude do motor bom, o que indica que o nível de vibração nesta faixa de frequência é mais elevada no motor com defeito.

Através do espectro do envelope, o qual é representado pela figura 4.71, é possível verificar a presença de picos espaçados de 26 Hz, metade da rotação do motor.

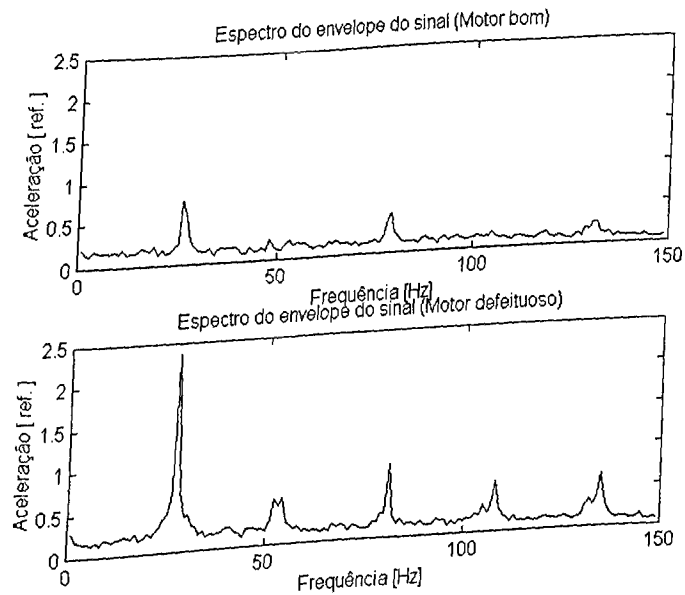


Figura 4.71: Espectros dos envelopes dos sinais.

Observa-se que no espectro do envelope do motor defeituoso, os picos são bem caracterizados, sendo que a amplitude dos mesmos, é bem maior que a dos picos que aparecem no espectro do motor bom, principalmente a do primeiro pico, localizado em 26 Hz. Como no caso do motor a 850 rpm, o espaçamento entre os picos corresponde justamente à frequência de rotação do comando de válvulas, o que indica a influência do mesmo no aumento do nível de energia do espectro na região de frequência compreendida entre 600 a 900 Hz.

As figuras 4.72 e 4.73 representam respectivamente os sinais no tempo após o uso do filtro, com $f_1 = 3000$ Hz e $f_2 = 4000$ Hz, e o espectro do envelope dos sinais.

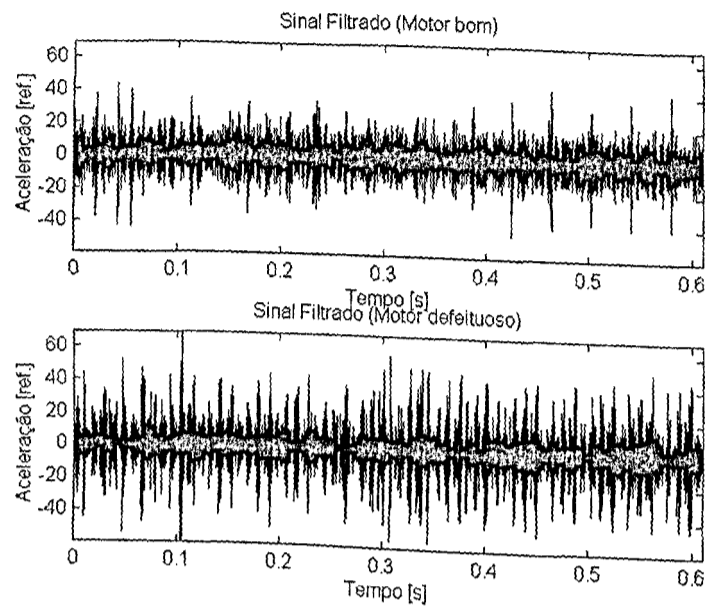


Figura 4.72: Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 3000$ Hz e $f_2 = 4000$ Hz).

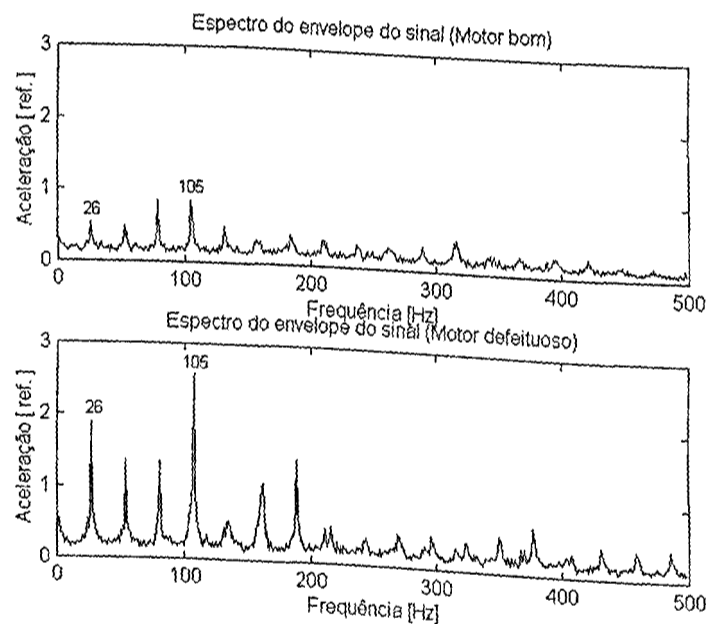


Figura 4.73: Espectros dos envelopes dos sinais.

No tempo (figura 4.72), verifica-se que a amplitude do sinal do motor com defeito é um pouco mais elevada do que a do sinal do motor bom, outra mudança observada é o surgimento de vários picos intermediários à aqueles existentes no sinal do motor bom. Já no espectro do envelope (figura 4.73), ocorre o aumento no nível de energia nos picos existentes, ou seja, no espectro do motor defeituoso, os picos tem a amplitude maior, sendo que na frequência de combustão (o dobro da rotação), 105 Hz, o aumento é bem significativo, praticamente triplica, o que também ocorre na frequência de 26 Hz. Mais uma vez, verifica-se que o espaçamento entre os picos corresponde à rotação do comando de válvulas.

A análise Cepstral, para este caso, mostra que ocorrem algumas variações entre o cepstrum relativo ao motor bom e o relativo ao defeituoso, como pode ser visto na figura 4.74.

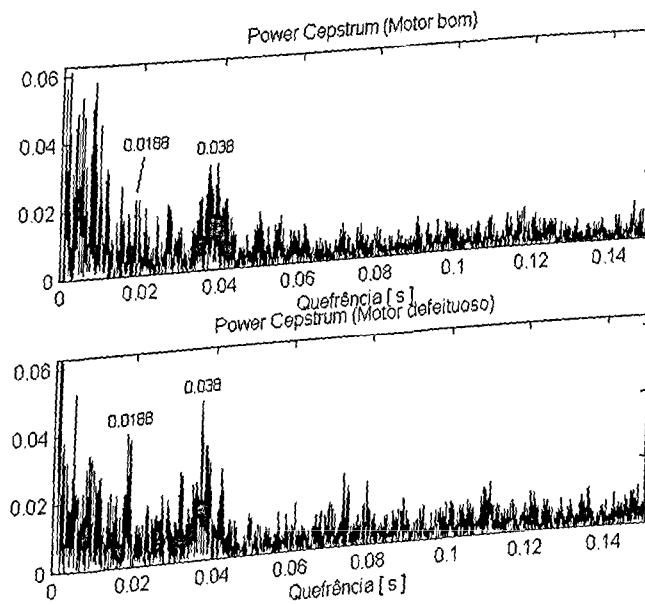


Figura 4.74: Cepstrum dos sinais.

No cepstrum do motor defeituoso ocorre uma elevação da amplitude do pico situado na quefrência de 0,0188 s, o que corresponde a freqüência de 53 Hz, ou seja, rotação do motor. Outra mudança observada é o aumento da amplitude do pico situado em 0,038 s, ou seja, 26 Hz, rotação do comando de válvulas.

- Motor a 3100 rpm (pressão sonora)

A figura 4.75 representa os sinais de pressão sonora, no domínio do tempo, dos motores bom e com batido de válvula.

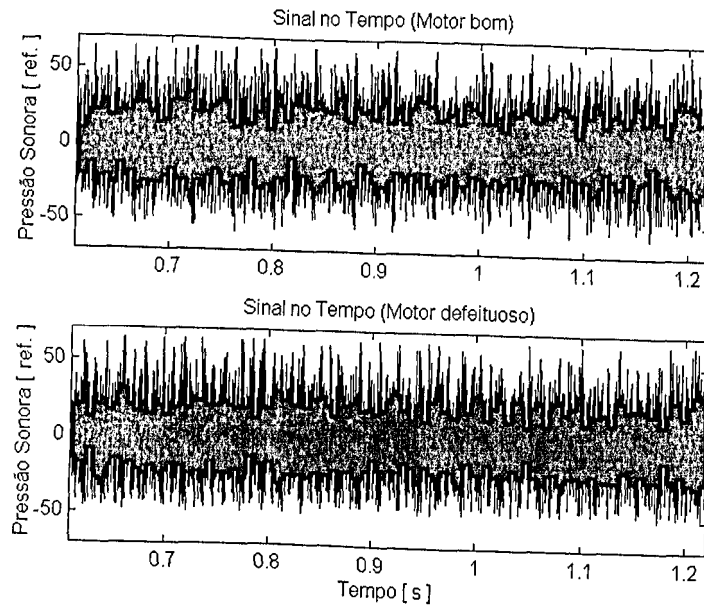


Figura 4.75: Sinais de pressão sonora de um motor bom e um com batido de válvula, no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm.

As variações que ocorrem devido a presença da falha, não são facilmente perceptíveis, uma vez que os sinais se apresentam com uma elevada complexidade.

Na figura 4.74 tem-se os espectros em bandas de 1/3 de oitava obtidos para os sinais de pressão sonora do motor bom e do motor defeituoso.

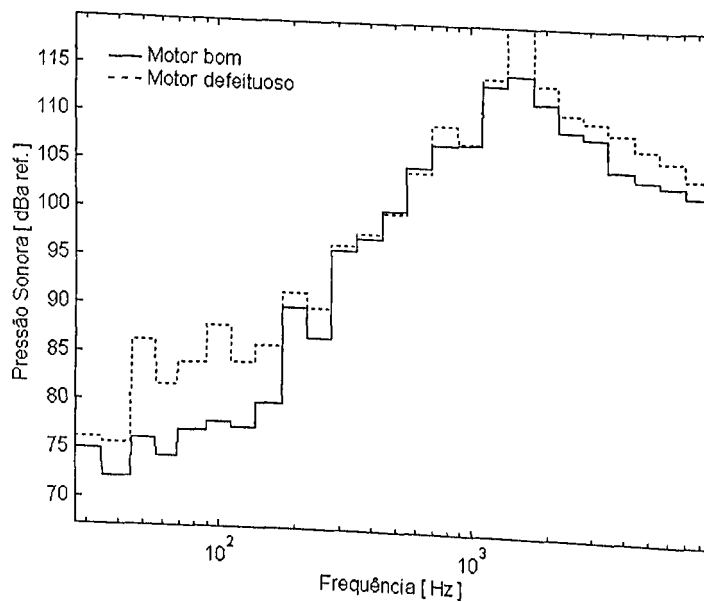


Figura 4.76: Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso.

Pela comparação entre os espectros fica claro a influência do defeito. Ocorre um aumento da ordem de 8 dB ref no nível de energia do sinal a partir de zero até 300 Hz. Na

região de 800 hz há também uma elevação da amplitude, sendo que a partir de 1000 Hz até 8192 Hz, o nível de energia se mantém mais elevado. Convém ressaltar que através de testes realizados (por aluno de iniciação científica), comprovou-se que em torno de 1300 Hz, é a região onde os técnicos especializados tem maior facilidade de identificar o defeito de batida de válvulas.

As figura 4.77 e 4.78 representam os espectros dos sinais, e também "Zoom" nas regiões onde se tem as principais variações.

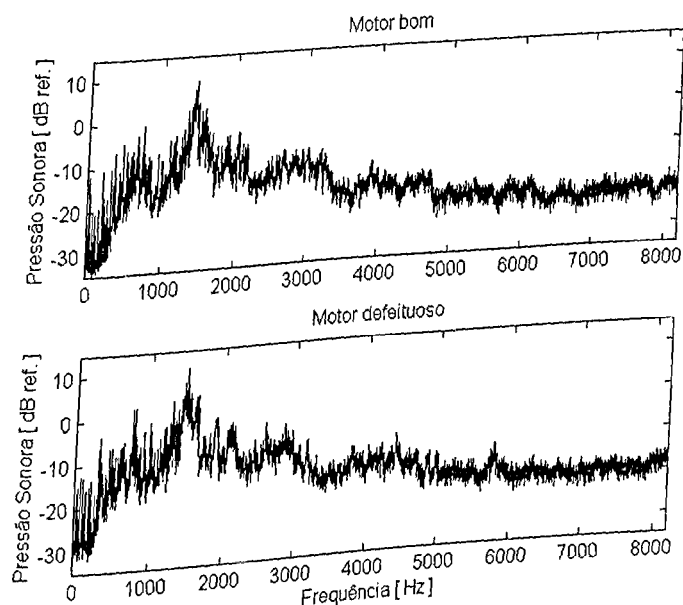


Figura 4.77: Espectros dos motores bom e defeituoso.

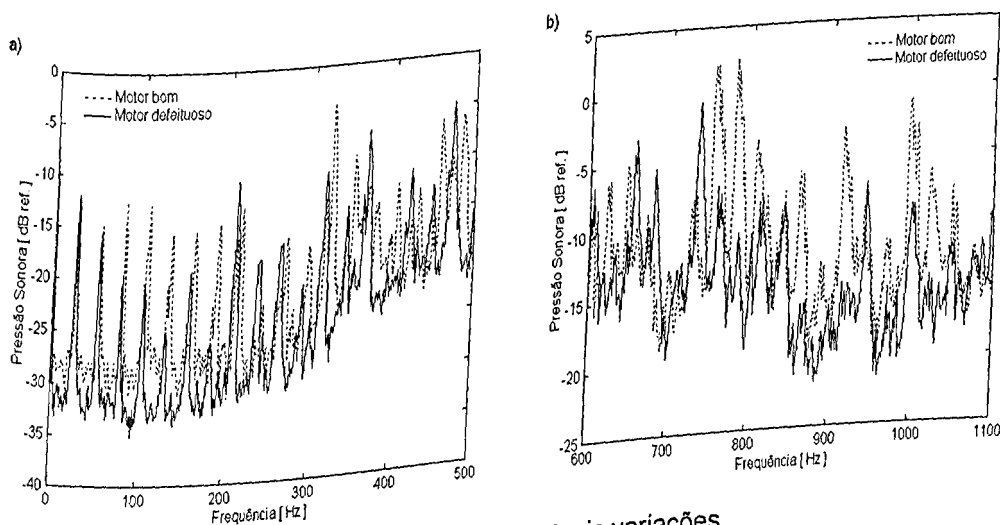


Figura 4.78: "Zoom" das regiões onde ocorrem as principais variações.

Como já visto no espectro em bandas de 1/3 de oitava, ocorre um aumento no nível de energia do sinal do motor defeituoso nas baixas frequências, o que pode ser melhor visualizado

na figura 4.78a. Até a frequência de 500 Hz, praticamente todos os picos tem o seu nível de energia aumentado. Verifica-se que na região de 750 a 800 Hz (figura 4.78b) há um aumento de cerca da 10 dB ref na amplitude do sinal. A partir de 2000 Hz, o sinal do motor defeituoso tem o nível de energia maior que o do motor bom, como ser observado na figura 4.77.

As figuras 4.79 e 4.80 representam respectivamente os sinais após o processo de filtragem, onde se utiliza $f_1 = 600$ Hz e $f_2 = 900$ Hz, e o espectro do envelope dos sinais.

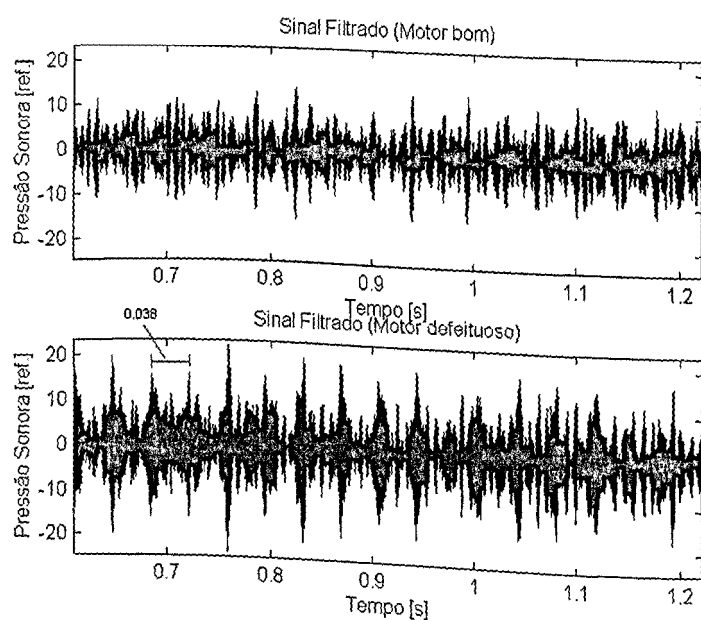


Figura 4.79: Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 600$ Hz e $f_2 = 900$ Hz).

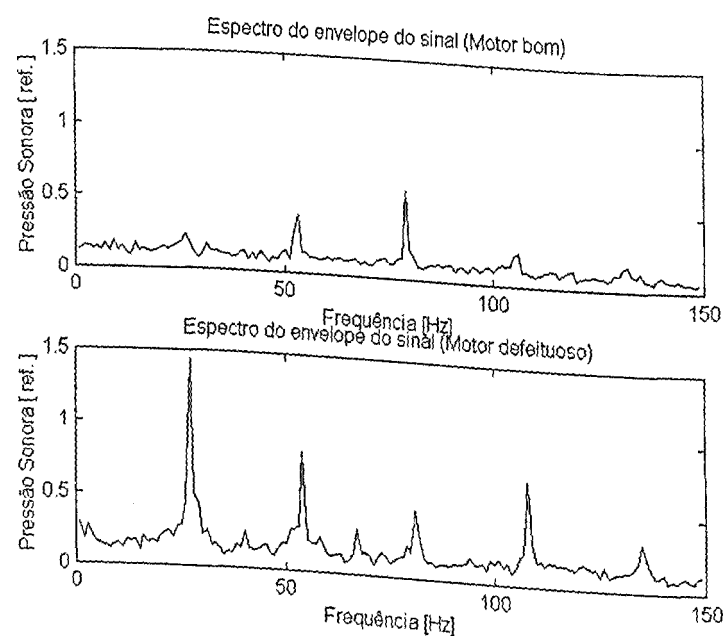


Figura 4.80: Espectros dos envelopes dos sinais.

Após a utilização do filtro, observa-se que no domínio do tempo (figura 4.79) o sinal do motor defeituoso apresenta amplitudes maiores que do sinal do motor bom. Pode-se verificar que no sinal proveniente do motor com defeito, tem-se a presença de picos, os quais estão separados por um intervalo de tempo de 0,038 s, o que uma freqüência de 26 Hz, ou seja, a rotação do comando de válvulas. No espectro do envelope do motor defeituoso (figura 4.80), verifica-se que ocorre um aumento no nível de energia dos picos, sendo que estes picos se apresentam de maneira decrescente com o aumento da freqüência, o que não ocorre no espectro do motor bom, onde se tem os picos com amplitudes menores, exceto aquele localizado em 80 Hz, o qual tem maior nível de energia. Deve-se atentar ao fato que todos os picos estão espaçados de aproximadamente 26 Hz, que é justamente a freqüência de rotação do comando de válvula.

A análise cepstral não se mostra eficiente. Não se observam variações significativas entre o cepstrum do motor bom e do defeituoso, como pode ser visto na figura 4.81.

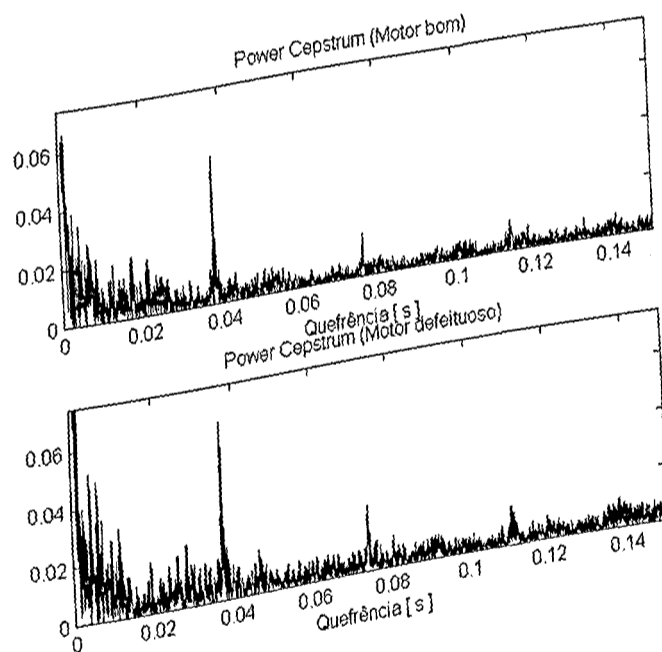


Figura 4.81: Cepstrum dos sinais.

4.5 TENSORES DO ALTERNADOR E DA DISTRIBUIÇÃO RUMOROSO

- Motor em marcha lenta (850 rpm)

Os gráficos dos sinais de aceleração no domínio do tempo do motor bom e com o tensor do alternador e distribuição rumoroso, estão representados na figura 4.82.

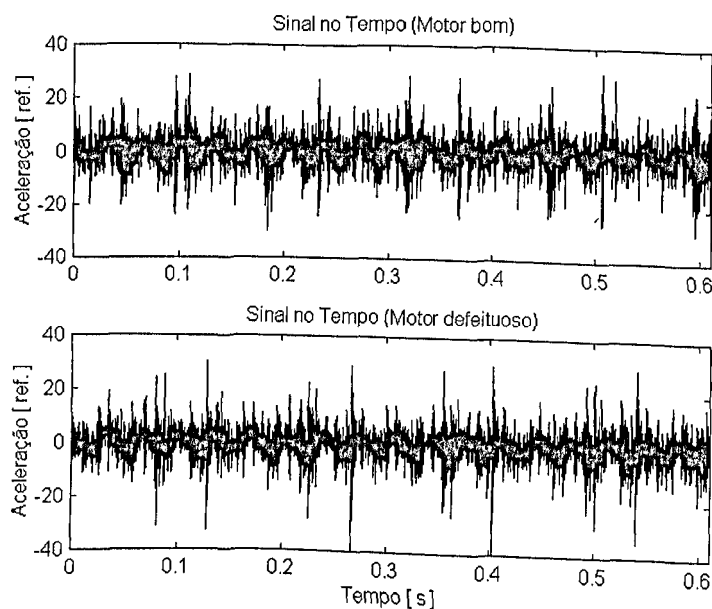


Figura 4.82: Sinais de aceleração de um motor bom e um com tensores do alternador e da distribuição ruidosos, no domínio do tempo, a uma rotação de 850 rpm.

O aspecto geral dos gráficos são semelhantes, entretanto é possível observar que no gráfico do motor com defeito, tem-se a presença de picos que apresentam maior amplitude que os do motor bom.

Os espectros de aceleração em bandas de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso estão mostrados na figura 4.83.

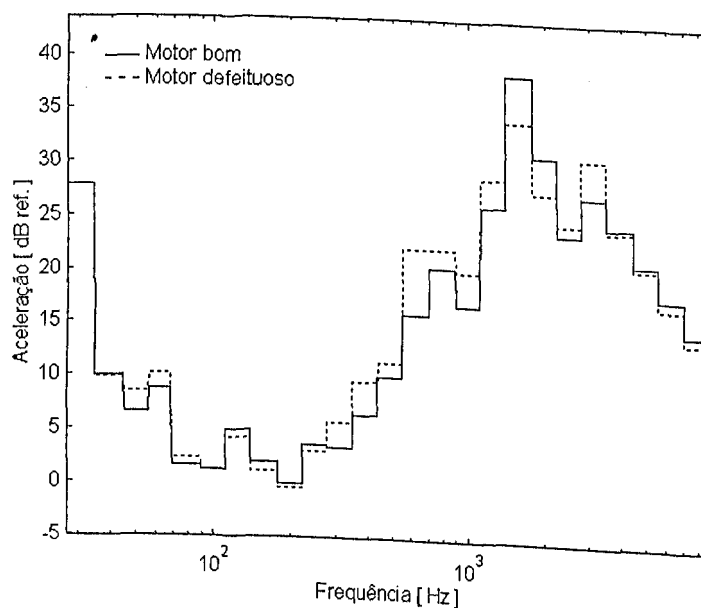


Figura 4.83: Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso.

Pode-se observar que surgem alterações no espectro do motor com a falha. Os níveis de energia sofre elevações em algumas bandas de frequência, sendo que as principais ocorrem nas regiões compreendidas entre 600 a 1000 Hz e 2800 a 3600 Hz. Estas variações podem ser melhor observadas nas figuras 4.84 e 4.85.

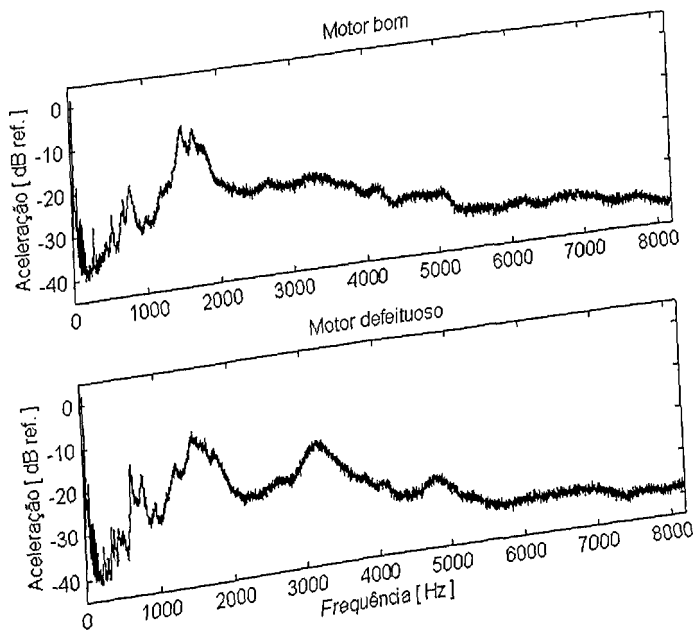


Figura 4.84: Espectros dos motores bom e defeituoso.

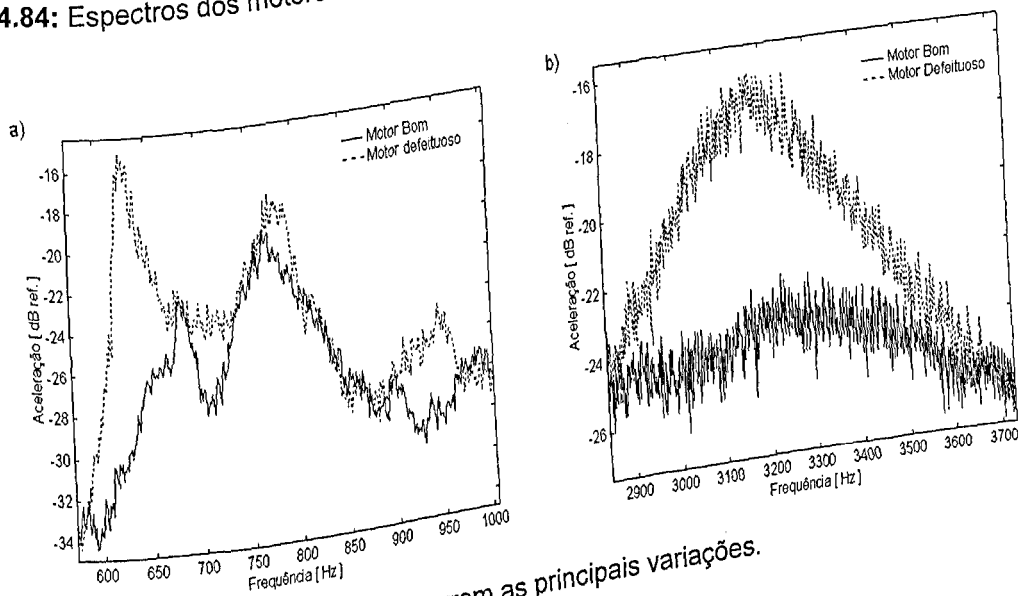


Figura 4.85: "Zoom" das regiões onde ocorrem as principais variações.

Pelas figura 4.84 e 4.85a observa-se que ocorre um aumento no nível de energia do sinal do motor com defeito na região compreendida entre 600 e 1000 Hz, sendo que o principal aumento ocorre em 630 Hz, onde se tem uma elevação de cerca de 12 dB ref. Outro aumento significativo ocorre entre 2800 e 3700 Hz, como pode ser visto na figura 4.85b, onde se tem

uma elevação da ordem de 8 dB ref. Como já visto anteriormente, os defeitos nos tensores do alternador e da distribuição provocam o aumento do nível de energia do sinal nesta região.

A figura 4.86 representa os sinais dos motores no domínio do tempo após processo de filtragem utilizando filtro Butterworth de 4ª ordem, passa-banda, com $f_1 = 600$ Hz e $f_2 = 700$ Hz.

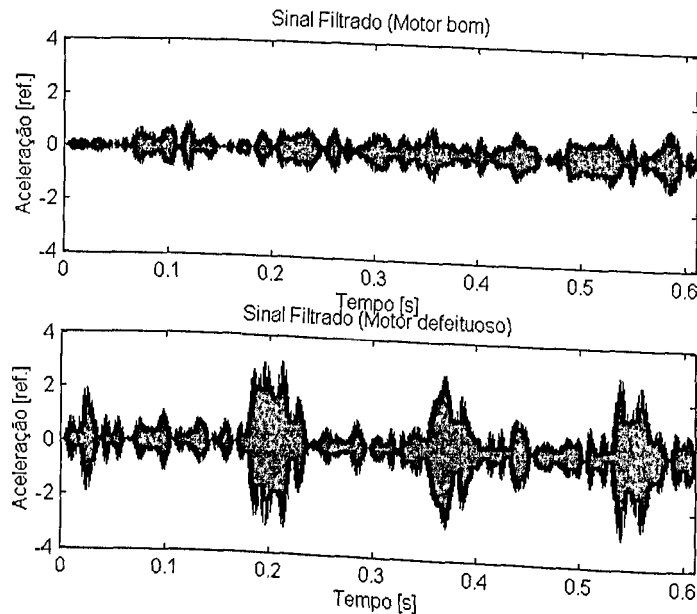


Figura 4.86: Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 600$ Hz e $f_2 = 700$ Hz).

Observando a figura 4.86, verifica-se que o sinal proveniente do motor com defeito apresenta regiões onde tem-se a presença de níveis de vibração mais altos. Estas regiões estão distanciadas de aproximadamente 0,18 s, o que equivale a uma frequência de 5,5 Hz.

Os espectros dos envelopes dos sinais filtrados estão representados na figura 4.87.

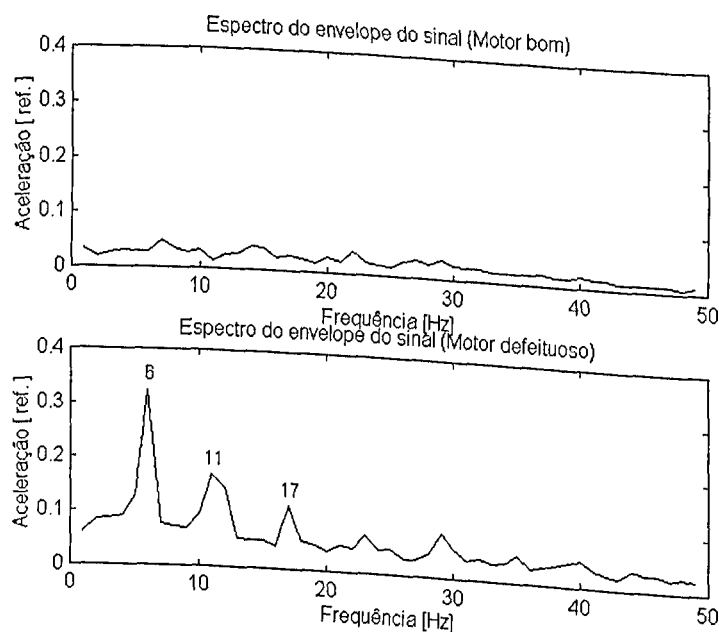


Figura 4.87: Espectros dos envelopes dos sinais.

Analisando-se os espectros, verifica-se que no espectro do envelope do motor com defeito tem-se a presença de picos, sendo que o mesmo não se observa no espectro do motor bom. Estes picos estão espaçados de aproximadamente 5,5 Hz (no gráfico verifica-se que o primeiro pico se encontra em 6 Hz, sendo que isto ocorre devido à resolução do espectro, que é de 1 Hz). Este valor, 5,5 Hz, corresponde à frequência de passagem do conjunto de rolamento do tensor da correia do sincronizador, o que indica que o aumento no nível de energia que ocorre no espectro no intervalo de 600 a 700 Hz, está relacionado com este componente.

As figuras 4.88 e 4.89 representam respectivamente os sinais no tempo após uso do filtro, com $f_1 = 2800$ Hz e $f_2 = 3700$ Hz, e os espectros dos envelopes destes sinais.

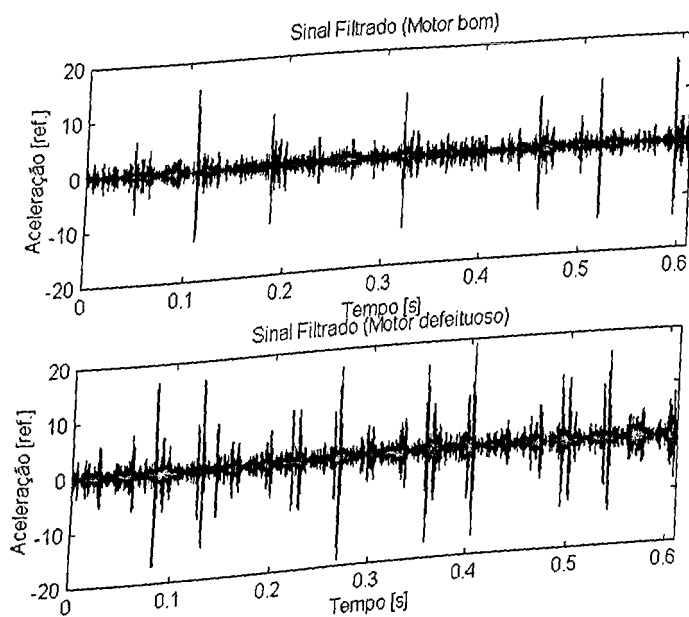


Figura 4.88: Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 2800$ Hz e $f_2 = 3700$ Hz).

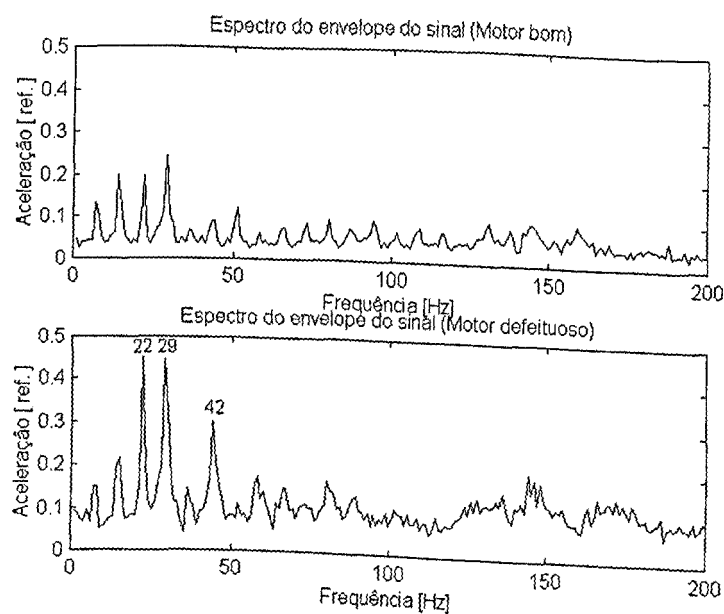


Figura 4.89: Espectros dos envelopes dos sinais.

Pela figura 4.88 é possível verificar que surgem alterações no gráfico do sinal do motor com defeito. Observa-se que surgem vários picos, os quais não ocorrem no gráfico do motor bom.

Analisando a figura 4.89, verifica-se que no espectro do motor com defeito os picos que localizam-se nas frequências de 22, 29 e 42 Hz, sofrem uma elevação em seus níveis de energia, sendo que suas amplitudes dobram.

O cepstrum dos sinais de aceleração estão mostrados na figura 4.90. Não se observa variações no cepstrum do motor defeituoso, quando em comparação com o do motor bom.

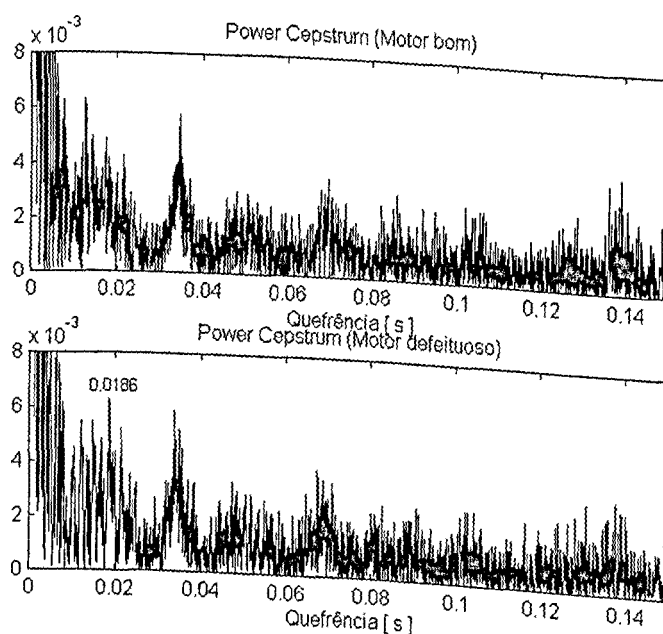


Figura 4.90: Cepstrum dos sinais.

Uma alteração que pode ser observada é o aumento na amplitude do pico localizado em 0,0186 s, que corresponde a frequência de 53,76 Hz.

- **Motor a 3100 rpm (aceleração)**

A figura 4.91 representa os sinais de aceleração no domínio do tempo dos motores bom e com os tensores do alternador e da distribuição rumorosos.

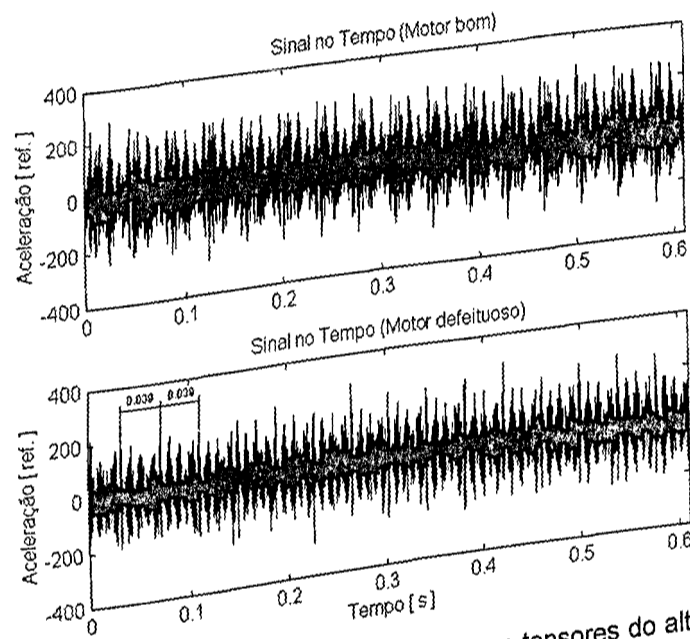


Figura 4.91: Sinais de aceleração de um motor bom e um com tensores do alternador e da distribuição rumorosos, no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm.

Pode-se observar que no gráfico referente ao motor com defeito, surgem picos, os quais se destacam, e estes picos estão espaçados de aproximadamente 0,039 s, o que corresponde a uma rotação de 25,64 Hz, ou seja, rotação do comando de válvulas.

A figura 4.92 representa os espectros de aceleração em bandas de 1/3 de oitava dos motores bom e com os tensores do alternador e da distribuição rumorosos.

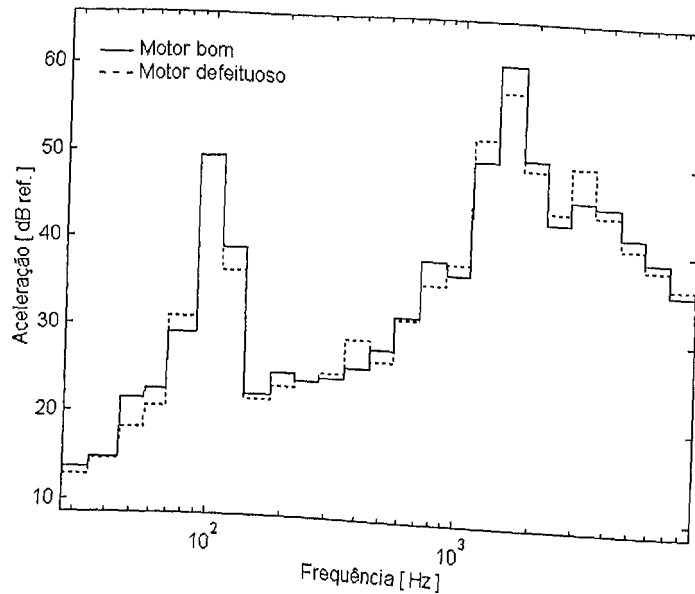


Figura 4.92: Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso.

Pela análise da figura 4.92, verifica-se que o espectro do motor com defeito apresenta níveis de energia mais alto em algumas bandas de frequência. Na região compreendida entre 2800 a 3800 Hz, tem-se um grande aumento na amplitude, sendo esta a principal variação ocorrida.

Esta variação pode ser bem observada nas figuras 4.93 e 4.94, onde se tem os espectros simples e um "Zoom" da região de interesse. Pode-se observar que o aumento no nível de energia do sinal do motor com defeito ocorre na região de 2800 a 3800 Hz, sendo que ali ocorre um aumento da ordem de 8 dB ref, como pode ser claramente visto na figura 4.94.

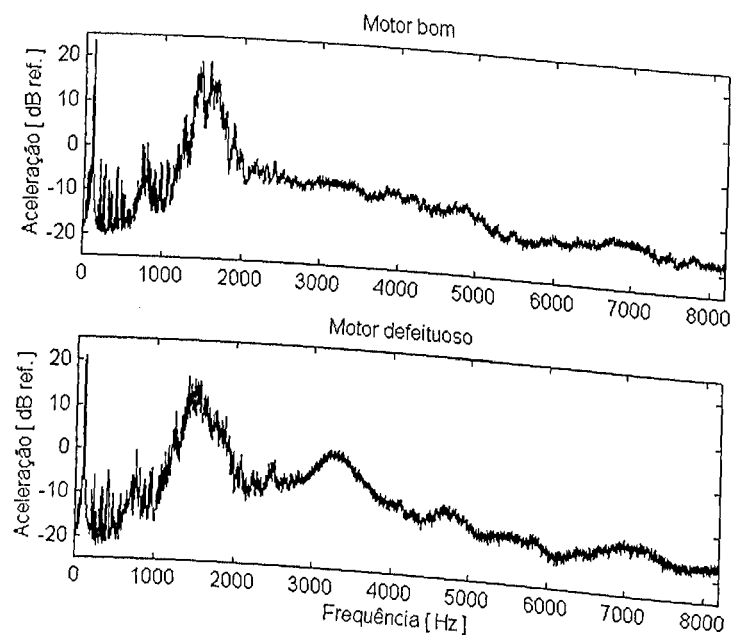


Figura 4.93: Espectros dos motores bom e defeituoso.

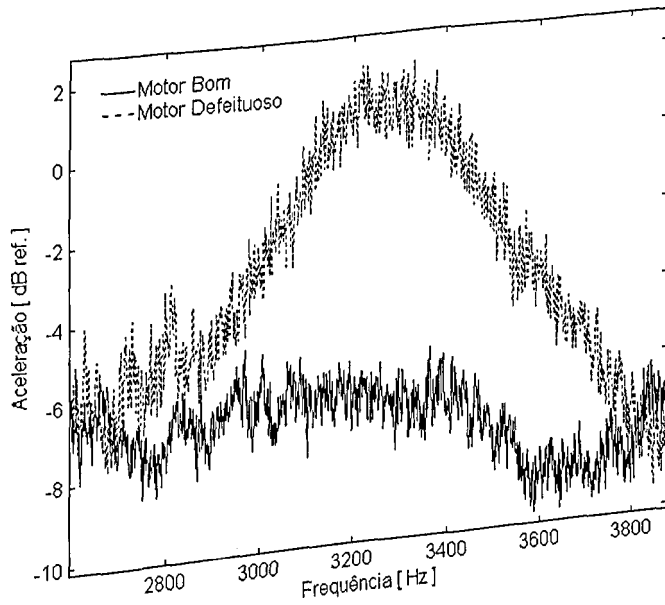


Figura 4.94: "Zoom" da região onde ocorre a principal variação.

A figura 4.95 representa os sinais de aceleração no domínio do tempo, após uso do filtro Butterworth de 4ª ordem, passa-banda com $f_1 = 2800$ Hz e $f_2 = 3800$ Hz.

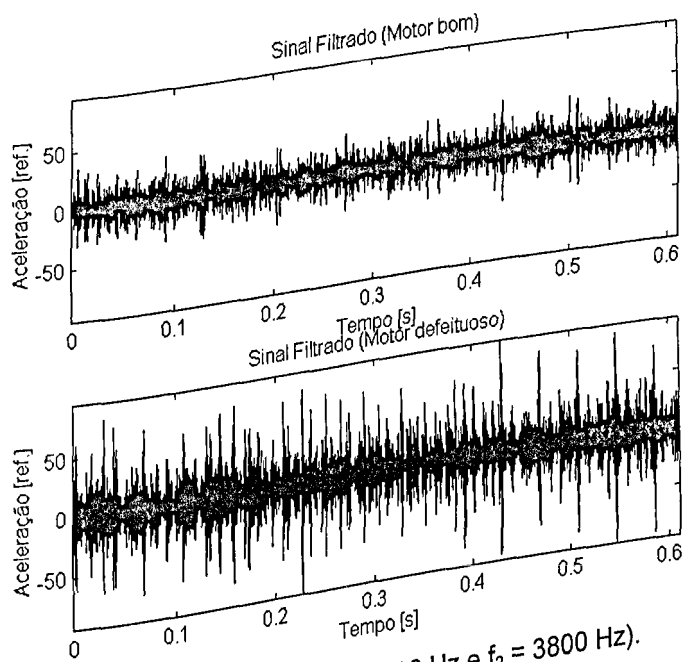


Figura 4.95: Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 2800$ Hz e $f_2 = 3800$ Hz).

Pode-se observar que o gráfico referente ao motor com defeito, apresenta vários picos, sendo que no gráfico do motor bom estes picos não aparecem. A amplitude do sinal do motor com defeito é maior do que a do motor bom, o que mostra que a vibração neste intervalo de frequência (2800 a 3800 Hz), sofre uma elevação devido ao defeito.

Os espectros dos envelopes dos sinais dos motores bom e com defeito, após o uso do filtro estão mostrados na figura 4.96.

Pode-se observar que no espectro do envelope do motor com defeito ocorre o aumento do nível de energia da maioria dos picos, sendo que o principal aumento ocorre em 78 Hz, onde a amplitude praticamente triplica em relação à do motor bom.

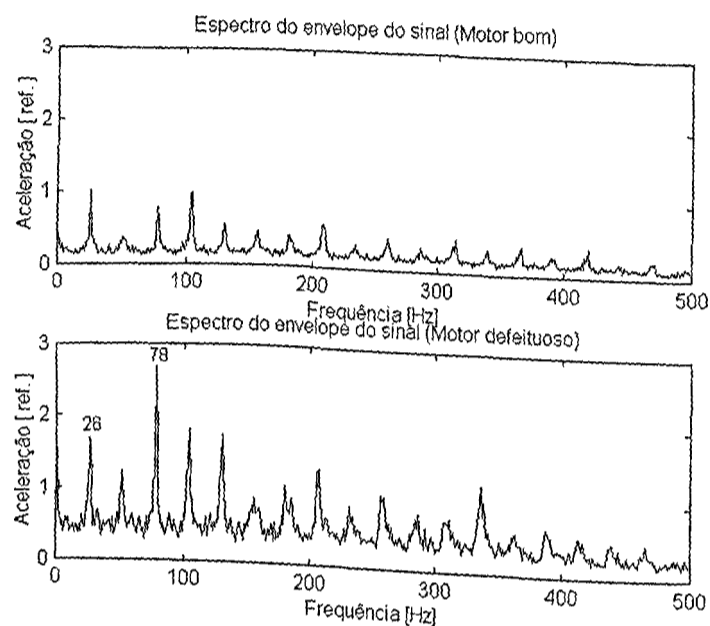


Figura 4.96: Espectros dos envelopes dos sinais.

Em ambos os espectros o espaçamento entre os picos equivale à rotação do comando de válvulas, ou seja, 26 Hz, entretanto, no espectro do motor com defeito todos os picos apresentam níveis de energia superiores aos do espectro do motor bom.

Na figura 4.97 tem-se os cepstrum dos sinais do motor bom e do motor com tensores do alternador e da distribuição rumorosos.

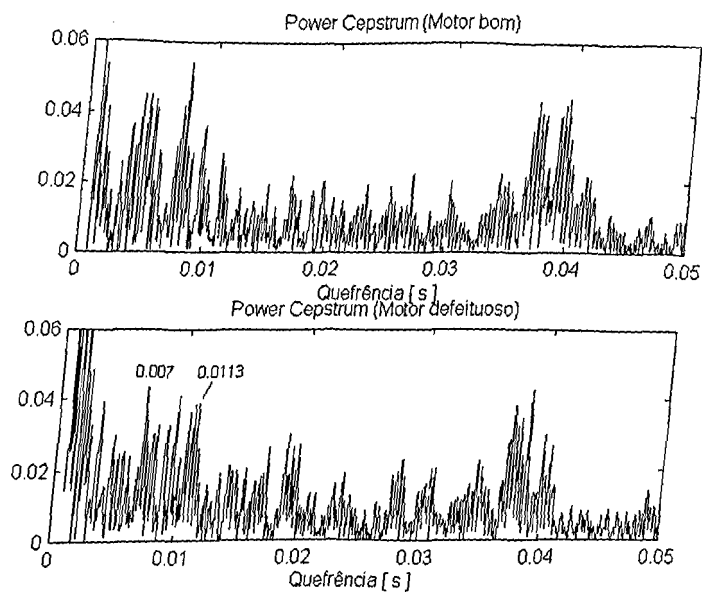


Figura 4.97: Cepstrum dos sinais.

Através da figura 4.97, é possível observar que surgem algumas variações no cepstrum do sinal de aceleração do motor com defeito. Pode-se verificar que na quefrência de 0,007 s, o que eqüivale a 142,86 Hz, ocorre um aumento da amplitude do pico que ali se localiza. O mesmo ocorre em 0,0113 s, que corresponde a 88,5 Hz, ou seja, rotação do tensor do alternador.

- Motor a 3100 rpm (pressão sonora)

Os gráficos de pressão sonora dos motores bom e com tensores do alternador e da distribuição ruidosos, no domínio do tempo, estão representados pela figura 4.98.

Pode-se verificar que o gráfico do motor com defeito apresenta níveis de pressão sonora mais elevado do que o do motor bom.

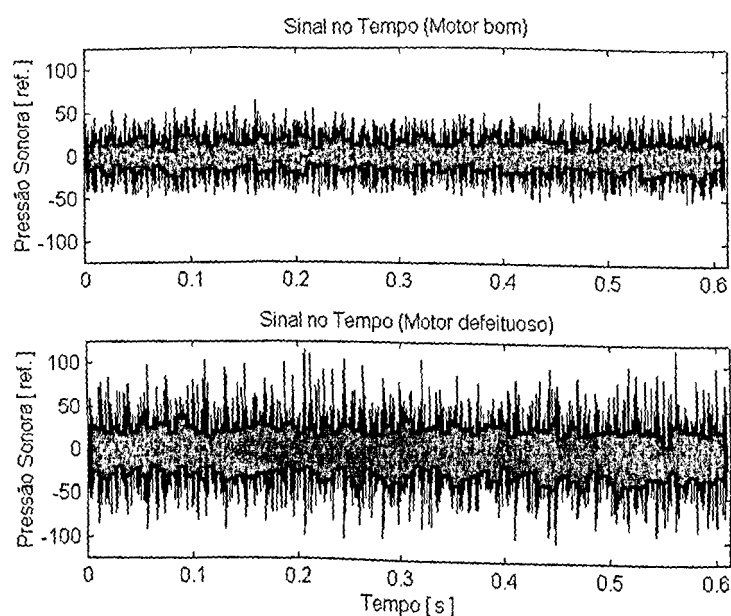


Figura 4.98: Sinais de pressão sonora de um motor bom e um com tensores do alternador e da distribuição ruidosos, no domínio do tempo, a uma rotação de 3100 rpm.

O espectros de pressão sonora, em bandas de 1/3 de oitava, dos motores bom e com tensores do alternador e da distribuição ruidosos, são apresentados na figura 4.99.

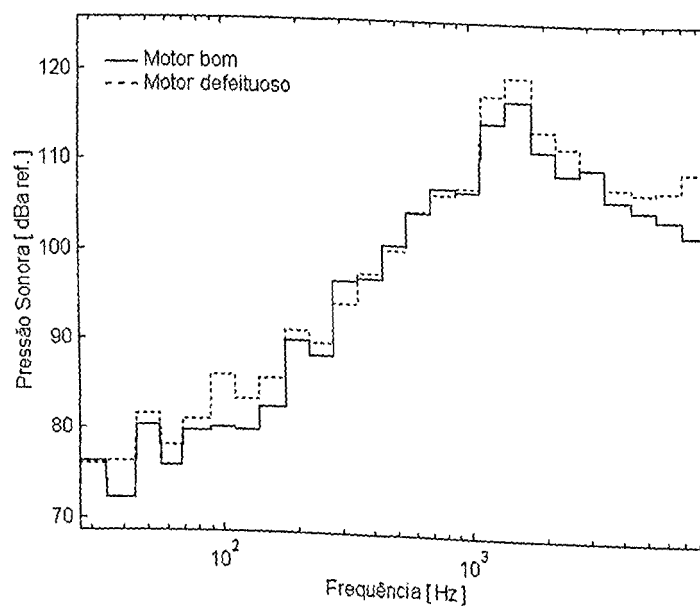


Figura 4.99: Espectros de 1/3 de oitava dos motores bom e defeituoso.

Pela figura 4.99 é possível observar que o espectro do motor com defeito apresenta elevações no nível de energia do sinal. As principais elevações ocorrem em torno de 100 Hz, que é a região da frequência de combustão (104 Hz), na região de 1000 a 1500 Hz, e nas regiões de alta frequência, a partir de 4000 Hz.

As principais alterações que ocorrem podem ser melhor visualizadas através das figuras 4.100 e 4.101, onde são mostrados os espectros simples e "Zoom" nas regiões onde ocorrem as elevações do nível de energia do sinal relativo ao motor com defeito.

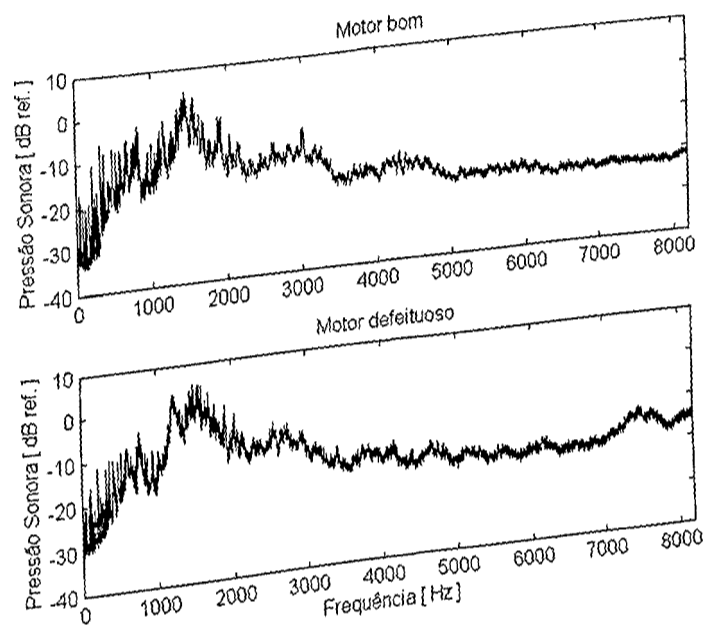


Figura 4.100: Espectros dos motores bom e defeituoso.

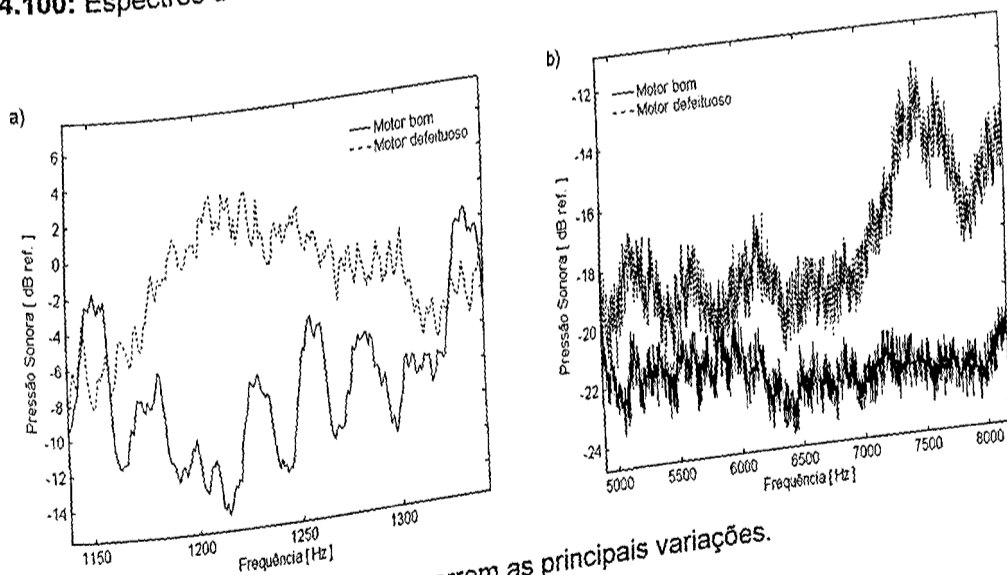


Figura 4.101: "Zoom" das regiões onde ocorrem as principais variações.

Pela figura 4.101a verifica-se que de 1170 até 1300 Hz, ocorre um aumento no nível de energia do sinal do motor com defeito, sendo que em 1220 Hz, este aumento vale aproximadamente 14 dB ref. A figura 4.101b mostra que a partir de 5000 Hz, há uma elevação do nível de energia do sinal, sendo que em torno de 7400 Hz, este aumento equivale ao valor de 10 dB ref.

Os sinais de pressão sonora no domínio do tempo, após uso de um filtro Butterworth de 4ª ordem, passa-banda, com $f_1 = 1150$ Hz e $f_2 = 1350$ Hz, são apresentados na figura 4.102.

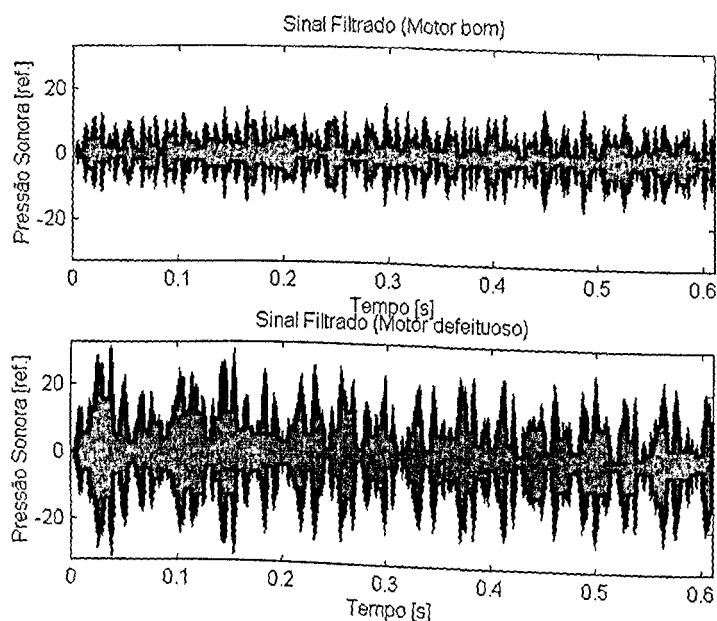


Figura 4.102: Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 1150$ Hz e $f_2 = 1350$ Hz).

Observando os gráficos da figura 4.102, pode-se verificar que neste intervalo de frequência, o motor defeituoso apresenta níveis de pressão sonora mais elevados do que os do motor bom, sendo que a amplitude do sinal praticamente dobra.

Os espectros dos envelopes dos sinais filtrados são apresentados na figura 4.103.

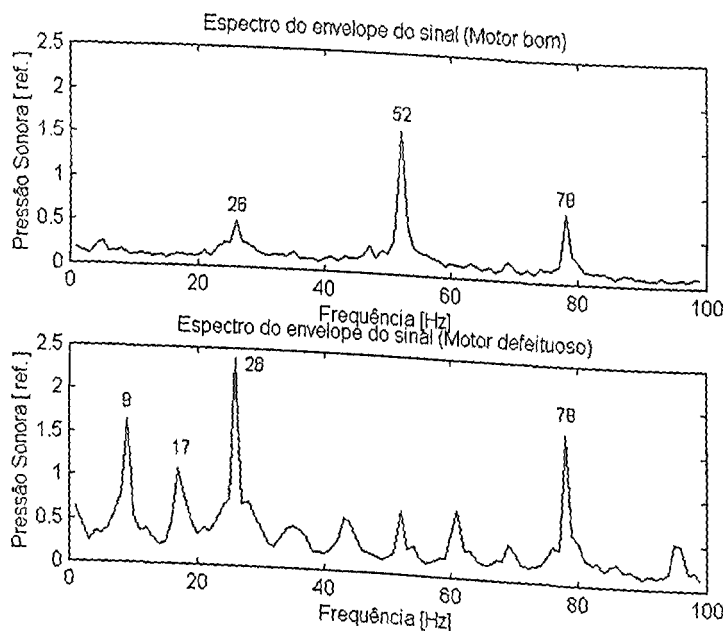


Figura 4.103: Espectros dos envelopes dos sinais.

Analisando-se os espectros dos envelopes, pode-se verificar que o espectro do motor com defeito apresenta picos que não aparecem no espectro do motor bom, e ocorre um aumento no nível de energia de alguns picos que são comuns nos dois espectros. Os principais aumentos ocorrem em 26 Hz (rotação do comando de válvulas) e em 78 Hz (3º harmônico de 26 Hz). Pode-se observar que os picos que surgem apresentam um espaçamento de aproximadamente 9 Hz, ou seja, cerca de 1/3 da rotação do comando de válvulas.

A figura 4.104 mostra os sinais de pressão sonora, no domínio do tempo, após procedimento de filtragem, onde utilizou-se um filtro Butterworth de 4ª ordem, passa-banda, com $f_1 = 7200$ Hz e $f_2 = 7800$ Hz.

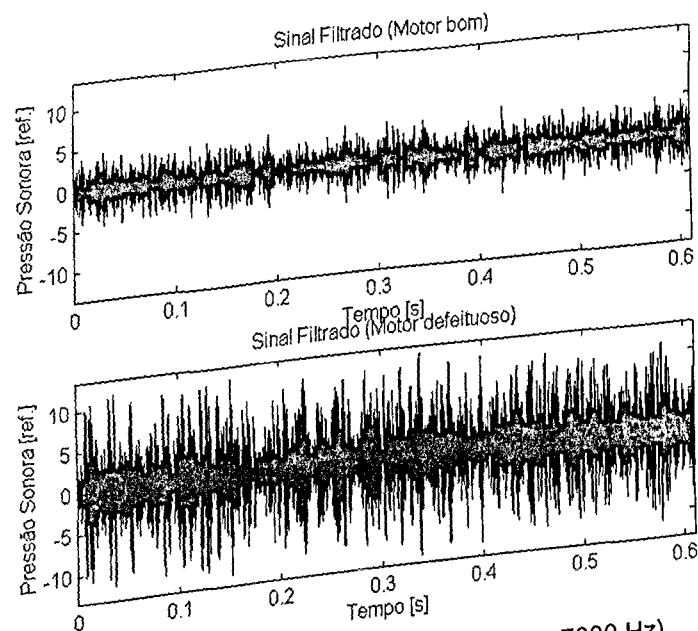


Figura 4.104: Sinais no tempo após uso do filtro ($f_1 = 7200$ Hz e $f_2 = 7800$ Hz).

Pode-se observar que o defeito em questão provoca um aumento na amplitude de pressão sonora neste intervalo de frequência, sendo que sua amplitude dobra em relação à do motor considerado bom.

Os espectros dos envelopes destes sinais filtrados se encontram representados na figura 4.105.

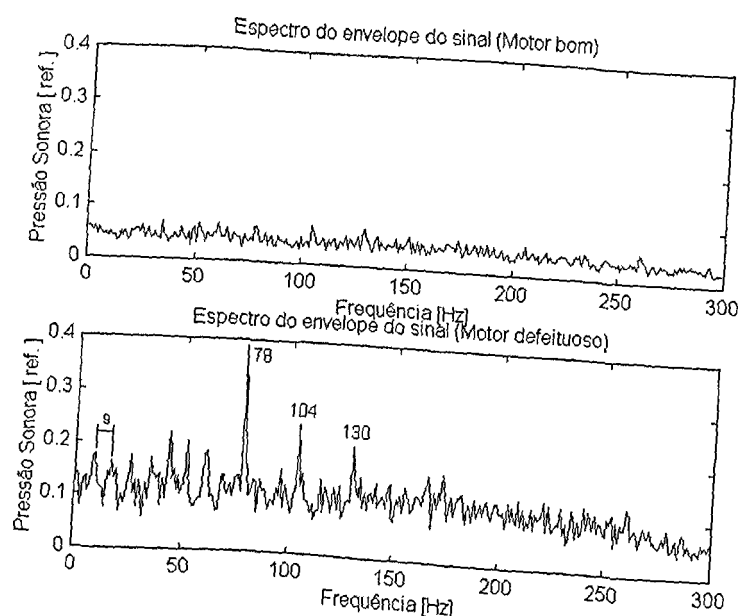


Figura 4.105: Espectros dos envelopes dos sinais.

Analisando-se os espectros, pode-se verificar que para o caso do motor bom, não se observa a ocorrência de picos, sendo que o nível de energia do sinal se apresenta baixo. Já para o espectro do motor defeituoso, surgem vários picos, sendo que os principais se situam em 78 Hz, 104 Hz (frequência de combustão) e 130 Hz. Observa-se também a existência de picos de menor intensidade a partir de 9 Hz, sendo este o espaçamento entre eles, semelhante ao que foi visto na situação anterior, onde os sinais foram filtrados com filtro passa-banda, no intervalo de 1150 Hz a 1350 Hz.

A figura 4.106 representa o cepstrum dos sinais de pressão sonora dos motores bom e com tensor do alternador e da distribuição ruidosos.

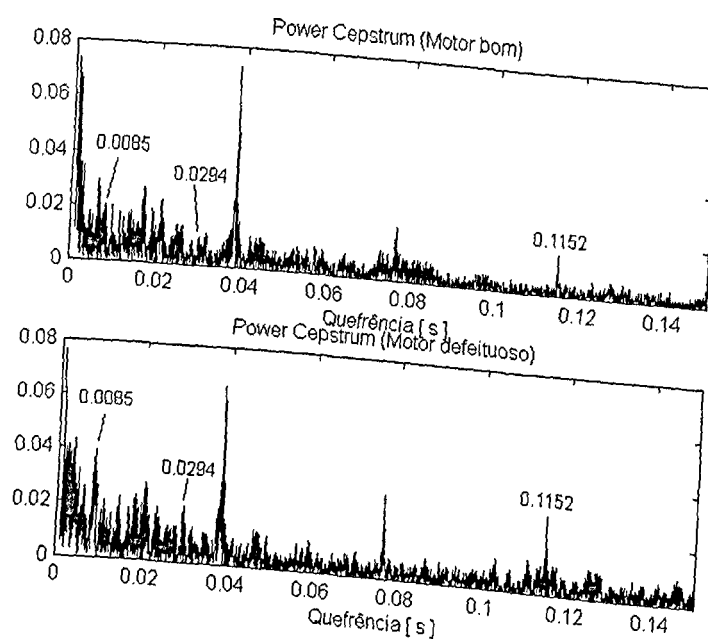


Figura 4.106: Cepstrum dos sinais.

Observando-se a figura, nota-se que há algumas variações entre o cepstrum do motor bom e o do motor com defeito. No cepstrum do motor defeituoso, na quefrência de 0,0085 s, ou seja, 117,65 Hz, aproximadamente a rotação da polia do alternador, tem-se um aumento (amplitude dobra) do pico que ali se localiza. O mesmo ocorre em 0,0294 s (34,01 Hz, rotação da polia do eixo da distribuição), e em 0,1152 s, ou seja, 8,68 Hz, que eqüivale a 1/3 da rotação do comando de válvulas, sendo que este deve ser o valor do espaçamento dos picos que surgem nos espectros dos envelopes analisados anteriormente, que por problema de resolução dos espectros (nos casos mostrados vale 1 Hz), aparece como 9 Hz.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA NOVOS TRABALHOS

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Apesar da natureza complexa dos motores, devido a presença de vários elementos que se encontram em movimento, a análise de assinaturas é uma técnica que se mostra válida para a detecção dos defeitos dos mesmos. A partir da análise espectral e da técnica do espectro do envelope, é possível distinguir variações que ocorrem devido à presença de defeitos precoces, nos motores FIASA 1500.

A tabela 5.1 apresenta um resumo do comportamento das técnicas utilizadas em relação a cada tipo de defeito analisado. Utilizou-se 3 critérios para classificar as técnicas:

- Eficaz: A técnica é capaz de diagnosticar e detectar o defeito;
- Razoável: Permite detectar que há um defeito, mas não especificar qual o defeito;
- Ineficaz: Não possibilita verificar a presença de defeitos.

Tabela 5.1: Comportamento das técnicas utilizadas em relação aos defeitos estudados.

Defeito	Rotação (rpm)	Tipo de Sinal	Domínio do tempo	Análise Espectral	Técnica do Espectro do Envelope	Análise Cepstral
Tensor do Alternador Rumoroso	850	Aceleração	Ineficaz	Eficaz	Razoável	Ineficaz
	3100	Aceleração	Ineficaz	Eficaz	Eficaz	Ineficaz
		Pressão Sonora	Ineficaz	Eficaz	Razoável	Ineficaz
Tensor da Distribuição Rumoroso	850	Aceleração	Ineficaz	Eficaz	Razoável	Ineficaz
	3100	Aceleração	Ineficaz	Eficaz	Eficaz	Ineficaz
		Pressão Sonora	Ineficaz	Razoável	Razoável	Ineficaz
Batido de Válvula	850	Aceleração	Eficaz	Razoável	Eficaz	Ineficaz
	3100	Aceleração	Ineficaz	Ineficaz	Eficaz	Razoável
		Pressão Sonora	Ineficaz	Razoável	Eficaz	Ineficaz
Tensores do Alternador e da Distribuição Rumorosos	850	Aceleração	Ineficaz	Eficaz	Eficaz	Ineficaz
	3100	Aceleração	Ineficaz	Eficaz	Razoável	Ineficaz
		Pressão Sonora	Razoável	Eficaz	Razoável	Ineficaz

Para os defeitos "Tensor da distribuição rumoroso" e "Tensor do alternador rumoroso", a análise espectral é a técnica mais eficiente, sendo que a análise no domínio do tempo não se mostra viável, o que também ocorre com a análise cepstral, que não fornece informações suficientes para a detecção das falhas. Já a Técnica do espectro do envelope, quando processado na banda de 2800 a 3600 Hz, para o sinal de aceleração do motor a 3100 rpm, fornece informações que são suficientes apenas para classificar o motor como defeituoso, não sendo possível detectar qual o defeito. A partir das técnicas utilizadas, não é possível distinguir qual dos tensores apresenta o defeito, uma vez que as variações que ocorrem são semelhantes para os dois casos.

Para o caso onde se tem os dois tensores com defeito ao mesmo tempo, as alterações que ocorrem são semelhantes ao caso do "tensor da distribuição rumoroso", sendo assim não é possível distinguir corretamente qual o tensor ou tensores que estão com defeito.

Quando se tem o defeito "batida de válvula" a análise espectral dos sinais de aceleração não gera resultados satisfatórios, já a análise espectral dos sinais de pressão sonora permite diagnosticar a presença do problema. Para a situação de 850 rpm, pela análise no domínio do tempo, é possível identificar o problema. Utilizando-se a Técnica do espectro do envelope, é possível detectar perfeitamente o defeito para qualquer uma das situações analisadas, para tanto, deve-se trabalhar com a banda de frequência de 600 a 900 Hz. Nestas situações, pela análise do sinal no domínio do tempo, após o uso do filtro, já é possível verificar a presença do defeito. Para este defeito, a análise cepstral não gera resultados satisfatórios.

Pelos resultados obtidos, é possível concluir que a detecção dos defeitos pode ser obtida principalmente através da análise espectral e da técnica do espectro do envelope. Já a análise cepstral se mostra insatisfatória para os casos estudados. Os resultados obtidos a partir desta análise não se mostraram capazes de diagnosticar os tipos de defeitos. Com raras exceções, não é possível visualizar variações que possam indicar a presença de algum tipo de defeito. O mesmo pode ser dito da análise do sinal no domínio do tempo (sinal sem ser filtrado), que devido à grande complexidade dos sinais, torna inviável a utilização da mesma.

De um modo geral pode-se dizer que:

- Tensor do alternador rumoroso: É possível detectar e diagnosticar o defeito;
- Tensor da distribuição ou tensores da distribuição e alternador ruidosos: Possível detectar o defeito, mas não diagnosticar se somente um dos tensores ou se os dois tensores estão com defeito;
- Batido de válvula: Possível detectar e diagnosticar o defeito;
- Análise espectral: Eficaz para os defeitos nos tensores;

- Análise no domínio do tempo: Resultados insuficientes para detectar e diagnosticar os defeitos;
- Técnica do espectro do envelope: Eficaz para o defeito "batida de válvula";
- Análise Cepstral: Ineficaz para os casos estudados.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ainda dentro deste tema, pode-se propor alguns novos trabalhos a serem desenvolvidos:

- Estudar outros tipos de defeitos;
- Utilizar técnicas de análise de sinais de tempo-frequência, tais como Transformada de Wavelet e Wigner-Ville;
- Desenvolver um método de sincronizar o sinal adquirido com as explosões do motor, e com isso utilizar a técnica de Média no Domínio do Tempo para a análise dos sinais;
- Análise de sinais utilizando rotação variável, com o intuito de excitar as várias regiões de ressonância do sistema;
- Analisar o efeito de carga;
- Analisar o efeito da posição dos sensores de vibração e ruído.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGELO, M., 1987, "Brüer & Kjaer technical review: Vibration Monitoring of Machines", Naerum Offset, n. 1, Denmark;
- BAXA, D. E., 1982, "Noise Control in Internal Combustion Engines", John Wiley & Sons, New York;
- BENDAT, J. S. e PIERSOL, A. G., 1986, "Random Data: Analysis and Measurement Procedures", John Wiley & Sons, 2ª ed., New York;
- BENSON, R. S. e WHITEHOUSE, N. D., 1983, "Internal Combustion Engines", Pergamon Press, Oxford, v. 1;
- BOTTON, G., BEM-ARI, G., ITZHAKI, R. e SHER, E., 1998, "Vibration Signature Analysis as a Fault Detection Method for SI Engines", SAE technical paper 980115;
- BOYES, J. D., "Brüel & kjaer Application Notes: Reciprocating Machinery Analysis with FFT Analyzer", Naerum Offset, Denmark;
- BRAUN, S., 1986, "Mechanical Signature Analysis: theory and applications", Academic Press, London;
- COHEN, L., 1995, "Time-Frequency Analysis", Prentice Hall, New Jersey;
- DUARTE, M. A. V., 1999, "Relatório Técnico: Critério Passa Não-Passa e Procedimento para Identificação de Fontes de Rumorosidade nos Motores 1500 FIASA Testados na Sala Prova Motores em Betim", UFU;
- FINNEY, C. E. A., GREEN, J. B. e DAW, C. S., 1998, "Symbolic Time-Series Analysis of Engine Combustion Measurements", SAE technical paper 980624;

- GEROPP, B., "Envelope Analysis – A Signal Analysis Technique for Early Detection and Isolation of Machine Faults", <http://www.acida.de/envelop.htm>;
- GIACOSA, D., 1980, "Motores endotermicos", Editorial Dossat, S.A., 3ª ed., Madrid;
- KAMINSKY, C. e UNGLENIEKS, R., 1997, "Statistical Energy Analysis of Noise and Vibration from Automotive Engine", SAE technical paper 971975;
- LEE, S. K. e WHITE, P. R., 1997, "Impulsive Sound Analysis of an Automotive Engine Using a Two-Stage ALE", SAE technical paper 972062;
- LOIBNEGGER, B., RAINER, G. Ph., BERNARD, L., MICELLI, D. e TURINO, G., 1997, "An Integrated Numerical Tool for Engine Noise and Vibration Simulation", SAE technical paper 971992;
- NEPOMUCENO, L. X., 1989, "Técnicas de Manutenção Preditiva", Ed. Edgard Blücher, v. 1 São Paulo;
- MAMEDE, W. F., 1997, "Análise de Falhas em Redutores Utilizando Transformada de Wavelet", Dissertação de Mestrado, Digma-UFU, Uberlândia;
- MIRSHAWKA, V., 1991, "Manutenção Preditiva: Caminho para Zero Defeitos", Makron, McGraw-Hill, São Paulo;
- RANDALL, R. B. e TECH, B., "Brüer & Kjaer application notes: Cepstrum Analysis and Gearbox Fault Diagnosis", Naerum Offset, Denmark;
- SEYBERT, A. F., HAMILTON, D. A. e HAYES, P. A., 1997, "Prediction of Radiated Noise from Engine Components Using the BEM and Rayleigh Integral", SAE technical paper 971954;
- THOMANN, S. E HASEWEND, W., 1998, "Feasibility Study for Acoustic Quality Control of FIAT Gasoline Engines", AVL Report AA605;
- VILLARROEL, G. Z. e ÁGREN, A., 1997, "Wavelet Transform Analysis of Measurement of Engine Combustion Noise", SAE technical paper 972003;

