Breno Ortega Fernandez

**CONSIDERAÇÕES SOBRE OUTROS
EMPREGOS DO SENSOR DE DETONAÇÃO
PARA O CONTROLE ELETRÔNICO DE
MOTORES CICLO OTTO UTILIZANDO
ANÁLISE ESPECTRAL**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Luis Carlos Passarini

São Carlos
2006

DEDICATÓRIA

A meus pais Ieda e Luiz Dorival

Lembra-te também do teu Criador nos dias da tua mocidade, antes que venham os maus dias, e cheguem os anos em que dirás: Não tenho neles prazer; E o pó volte à terra, como o era, e o espírito volte a Deus, que o deu. Vaidade de vaidades, diz o pregador, tudo é vaidade.

Eclesiastes, Capítulo 12, versículos 1,7 e 8.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Luiz Carlos Passarini pela oportunidade e confiança em mim depositada.

Ao Prof. Antonio Moreira dos Santos pela cessão de espaço no Laboratório de Motores para a realização de ensaios.

À equipe dos laboratórios de Eletrônica Embarcada e de Motores, Jaime Marini e Roberto Lourenço, pelo auxílio prestado.

Aos amigos e companheiros de pesquisa Fabiano Mathias e Sandro Guimarães Souza, Michele Marin e Maria Izabel dos Santos e em especial ao Carlos Milhor, sem o qual meus ensaios dificilmente seriam realizados.

Ao Centro Universitário de Lins – UNILINS pelo apoio financeiro disponibilizado quando solicitado, possibilitando a concretização deste trabalho.

A todos aqueles que nesse longo período de trabalho trouxeram-me seu incentivo dando-me forças para equilibrar o fardo, em especial aos amigos “ocultos”, cujos quais não cabe citar.

Aos Amigos Dib Karam Jr., Júlio Tanomaru, Luiz Adriano Galan Madalena, Milton Léo, Luiz Fernando Rossi Léo, Rodrigo Montalvão e Cristiane Paschoali, os melhores amigos que poderia ter.

E ao amigo, Irmão e segundo Pai, Hamilton Luiz de Souza por sua presença marcante em minha vida nestes quase dez anos de amizade.

RESUMO

Fernandez, B. O. (2006). Considerações sobre outros empregos do sensor de detonação para o controle eletrônico de motores ciclo Otto utilizando análise espectral. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

Este trabalho apresenta um estudo para a qualificação do sensor de detonação como elemento de realimentação para o sistema de controle eletrônico de motores de combustão interna. A metodologia proposta consiste no uso do sensor de detonação, previamente instalado pelo fabricante do motor com a finalidade de eliminar o indesejável efeito da combustão espontânea, para amostrar as vibrações mecânicas produzidas pelo motor em funcionamento. Tal vibração, resultado de massas em movimento e da oscilação natural do sistema excitado pela combustão, produz uma figura espectral na faixa de frequências do som audível. O método proposto contempla ainda as variações espectrais das vibrações de um mesmo motor operando com diferentes misturas combustíveis.

Palavras chave: Análise Espectral, Estimação Espectral, Sensor de Detonação, Motor ciclo Otto, Vibração.

ABSTRACT

Fernandez, B. O. (2006). Considerations on other jobs of the knock sensor for the electronic control of Otto cycle engines using spectral analysis. Dissertation (Master) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, Brazil, 2006.

This dissertation analyses the suitability of using the knock sensor as a feedback element for the electronic control of internal combustion engines. The proposed approach consists of using the knock sensor, originally installed by the engine maker in order to eliminate the spontaneous combustion effect, to sample the mechanical vibration produced by the engine. This vibration, which results from the moving parts and the natural oscillation of the system in combustion, produces an output in the range of audible sound. This research contemplates using the spectral variation of that sound to estimate information about an engine operating with different fuel blends.

Keywords: Spectral Analysis, Spectral Estimation, Knock Sensor, Otto cycle engine, Vibration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Ciclo Otto para um motor de combustão interna. [STERNIN (2005)]	3
Figura 2-2 Ponto morto superior e inferior.	4
Figura 2-3 Seqüência que demonstra uma das formas de ocorrência da detonação. [NGK (2004)].....	9
Figura 2-4 Vista de um pistão após exposição prolongada à detonação. [WESTBROOK (2006)].....	10
Figura 2-5 Resposta em frequência de um sensor de detonação ressonante. [NGK (2004)].....	12
Figura 2-6 Resposta em frequência de um sensor de detonação não-ressonante. [NGK (2004)].....	12
Figura 2-7 Vista explodida do sensor de detonação magnetostriativo. [WOLBER (1995)]	15
Figura 2-8 Vista em corte de um sensor de detonação piezelétrico. [WOLBER (1995)]	17
Figura 2-9 Vista em corte de um sensor de detonação piezocerâmico. [NGK (2004)] ..	18
Figura 2-10 Exemplos de sinais preditivo (a) e randômico (b). [VASEGHI (2000)].....	21
Figura 2-11 Funções básicas de Fourier: (a) componentes real e imaginária de uma senóide complexa, (b) representação vetorial de uma exponencial complexa. [VASEGHI (2000)].....	22
Figura 2-12 (a) Um trem de pulsos periódicos e suas respectivas linhas espectrais, (b) Pulso unitário com T_{off} infinito e o envelope de seu espectro. [VASEGHI (2000)].....	25
Figura 2-13 Localização do eixo de simetria para os filtros FIR dos tipos 1 e 2. [RORABAUGH (1993)]	33
Figura 4-1 Resposta em frequência do sensor de detonação não ressonante NGK [NGK (2004)].....	44
Figura 4-2 Sensor de detonação da NGK. [NGK (2004)].....	45
Figura 4-3 Arranjo para teste de resposta em frequência da placa de aquisição.	47
Figura 4-4 Gráfico da resposta em frequência das placas de aquisição de dados.....	47
Figura 4-5 Ensaio de seleção da placa de aquisição.	48
Figura 4-6 Tela de gravação do software <i>Sound Forge</i>	49
Figura 4-7 Tela do software <i>Sound Forge</i> com a visualização dos sinais gravados.	50
Figura 4-8 Modos de vibração em um cilindro e suas constantes. [TAYLOR (1976)]..	51
Figura 4-9 Gráfico da ressonância da gasolina versus a constante do modo de vibração no cilindro.	52
Figura 4-10 Montagem do motor para a realização do Ensaio_1.	53
Figura 4-11 Montagem do motor para a realização do Ensaio_2.	54
Figura 4-12 Vista da área reservada do laboratório de motores.	55
Figura 4-13 Montagem do sensor de detonação alternativo no ponto original.....	56
Figura 4-14 Arranjo para a aquisição de dados do sensor Hall.	58
Figura 4-15 Tela principal da ferramenta para projeto de filtros digitais do Matlab.....	59
Figura 4-16 Resposta em frequência e fase dos filtros passa - baixa.....	60
Figura 4-17 Resposta em frequência e fase dos filtros passa - faixa.	61
Figura 5-1 PSD do Ensaio_1_08 com filtro passa-baixas em 1kHz.	63
Figura 5-2 PSD do Ensaio_2_09 @3500 rpm filtrado em 2 kHz.	64
Figura 5-3 Comparação entre as PSD's dos sinais abaixo de 1 kHz, das nove repetições do Ensaio_1.....	65

Figura 5-4 Comparação entre as PSD's dos sinais abaixo de 1 kHz, das doze repetições do Ensaio_2.....	66
Figura 5-5 PSD do Ensaio_1 Repetição 3.....	67
Figura 5-6 Variação de energia na faixa de 2 kHz a 16 kHz nas três faixas de rotação do Ensaio_1.....	68
Figura 5-7 Variação de energia na faixa de 2 kHz a 16 kHz nas três faixas de rotação do Ensaio_2.....	68
Figura 5-8 Variação da energia vs. variação na mistura combustível nos filtros 1,3,4 e 5 do Ensaio_1.....	70
Figura 5-9 Variação da energia vs. variação na mistura combustível nos filtros 2,3,4 e 5 do Ensaio_2.....	71
Figura 5-10 Variação da energia vs. variação na mistura combustível, em três faixas de rotação para o Ensaio_1, filtro 2.....	72
Figura 5-11 Variação da energia vs. variação na mistura combustível, em três faixas de rotação para o Ensaio_2, filtro 1.....	72
Figura 5-12 Aumento da massa de combustível (%) x Porcentagem de AEHC ao gasohol. [DAL BEM (2003)]	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Composição média do ar seco. [MARTINS (2001)]	5
Tabela 2-2 Reações químicas e respectivo calor liberado. [MARTINS (2001)]	6
Tabela 4-1 Modelos de placas de aquisição de áudio e suas características.....	46
Tabela 4-2 Frequências de ressonância calculadas.....	52
Tabela 4-3 Diferenças entre F_s da Gasolina e Etanol.....	52
Tabela 4-4 Nome dos arquivos de áudio e suas proporções de combustível.....	57
Tabela 4-5 Frequências de ressonância e os respectivos filtros.....	61
Tabela 7-1 Dados técnicos do motor AT1000	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPU	-Central Processing Unit (Unidade de Processamento Central)
DFT	-Discrete Fourier Transform (Transformada Discreta de Fourier)
DTFT	-Discrete-Time Fourier Transform (Transformada de Fourier Discreta no tempo)
ECU	-Electronic Control Unit (Unidade de Controle Eletrônico)
EESC	-Escola de Engenharia de São Carlos
FFT	-Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)
FIR	-Finite Impulse Response (Resposta finita a impulso)
IIR	-Infinite Impulse Response (Resposta infinita a impulso)
LEE	-Laboratório de Eletrônica Embarcada
PMS	-Ponto morto superior
PMI	-Ponto morto inferior
PSD	-Power Spectrum Density (Densidade Espectral de Potência)
PZT	-Liga de chumbo, zircônio e titânio
rpm	-Rotações por minuto
USP	-Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1.	OBJETIVOS	1
2.	INTRODUÇÃO	2
2.1.	Os Motores a Combustão Interna e seus fenômenos	2
2.1.1.	O ciclo Otto	2
2.1.2.	Combustão	5
2.1.3.	Combustão estequiométrica	6
2.2.	Detonação e métodos de detecção	7
2.2.1.	O Fenômeno da detonação	7
2.2.2.	Os efeitos da detonação	9
2.2.3.	Instrumentação para a detecção da detonação	10
2.2.4.	Controle da detonação	13
2.2.5.	Condicionamento do sinal	14
2.2.6.	Sensor de detonação magnetostriativo	15
2.2.7.	Sensores de detonação baseados em acelerômetros	16
2.2.8.	Acelerômetro piezelétrico	17
2.2.9.	Acelerômetro piezocerâmico	18
2.2.10.	Acelerômetros de silício	19
2.2.11.	Considerações sobre seleção dos sensores de detonação	19
2.3.	Análise Espectral	20
2.3.1.	Espectro de potência e correlação	20
2.3.2.	Série de Fourier e representação de sinais periódicos	22
2.3.3.	Transformada de Fourier e representação de sinais aperiódicos	24
2.3.4.	Transformada discreta de Fourier (DFT)	26
2.3.5.	Resolução no tempo e na frequência	26
2.3.6.	Densidade espectral de energia e densidade espectral de potência	27
2.3.7.	Estimação espectral de potência não paramétrica	29
2.3.8.	Filtros digitais	29
2.3.9.	Filtros digitais FIR	30
2.3.10.	A resposta em frequência dos filtros FIR	31
2.3.11.	Implementação de filtros pela série de Fourier	33
3.	TRABALHOS CORRELATOS	35
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1.	Descrição do experimento	43
4.2.	Materiais	43
4.2.1.	O motor AT1000	43
4.2.2.	O Sensor de detonação não ressonante NGK	44
4.2.3.	O Sistema de aquisição de dados	45
4.2.4.	O <i>software</i> Sound Forge	48
4.3.	Métodos	50
4.3.1.	Ressonância da detonação	50
4.3.2.	Preparação dos motores	53
4.3.3.	Aquisição de sinais	57
4.3.4.	O <i>software</i> Matlab	59
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
5.1.1.	Análise espectral na faixa de 0 a 2 khz	62
5.1.2.	Análise espectral na faixa de 2 kHz a 16 kHz	67

5.1.3. Análise espectral nas frequências de ressonância	69
6. CONCLUSÕES	74
7. BIBLIOGRAFIA	76
7.1. Bibliografia Referenciada	76
7.2. Bibliografia Consultada	78
ANEXO A	80
APÊNDICE A	81
APÊNDICE B	82
APÊNDICE C	84
APÊNDICE D	89
APÊNDICE E	99
APÊNDICE F	107
APÊNDICE G	108
APÊNDICE H	113
APÊNDICE I	115
APÊNDICE J	121
APÊNDICE K	132
APÊNDICE L	140
APÊNDICE M	141

1. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar a utilização do sensor de detonação, normalmente empregado para a detecção do indesejável fenômeno associado à combustão, como elemento de realimentação de outros fenômenos associados à combustão, demonstrando que vários fenômenos que ocorrem dentro da câmara de combustão com o motor em funcionamento, e não apenas a detonação, podem manifestar-se externamente ao bloco do motor.

2. INTRODUÇÃO

2.1. Os Motores a Combustão Interna e seus fenômenos

2.1.1. O ciclo Otto

Há pouco mais de um século o motor de combustão interna vem sendo utilizado como máquina motriz. Em uma máquina de combustão externa os produtos da combustão da mistura ar-combustível transmitem calor a um outro fluido que toma a si a tarefa de produzir trabalho. Na máquina de combustão interna os produtos da combustão são os próprios executores de trabalho. Em virtude desta simplificação e do aumento do rendimento dela decorrente, o motor de combustão interna é uma das mais leves máquinas motrizes existentes, justificando a sua utilização tão freqüente nos diversos meios de transporte.

A maioria das máquinas de combustão interna (com exceção da turbina a gás) utiliza o princípio do êmbolo alternativo, um êmbolo dotado de movimento de vai-e-vem no interior de um cilindro, produzindo trabalho através de uma conectora (biela) e um eixo de manivelas. Em 1862, o físico francês Beau de Rochas formulou uma seqüência teórica de operações para que um motor de combustão interna funcionasse com o máximo de economia. A seqüência proposta, que está ilustrada na Figura 2-1, é descrita como:

1. Curso de aspiração (1º Tempo), durante o qual a mistura combustível é aspirada para o interior do cilindro motor, com a válvula de aspiração aberta.

2. Curso de compressão (2º Tempo), durante o qual a temperatura da mistura combustível é aumentada, estando as duas válvulas fechadas.
3. Ignição e a conseqüente queima da mistura homogênea no fim do curso de compressão, aumentando consideravelmente a temperatura e a pressão dos gases; o êmbolo, então, desce no curso de expansão (3º Tempo), estando as duas válvulas fechadas.
4. Curso de descarga (4º Tempo), durante o qual o êmbolo expulsa de dentro do cilindro os gases resultantes da queima, estando aberta apenas a válvula de descarga.

Figura 2-1 Ciclo Otto para um motor de combustão interna. [STERNIN (2005)]

Em 1876, Otto, engenheiro alemão, utilizando as idéias de Beau de Rochas, construiu um motor de combustão interna com ignição por centelha de quatro tempos, que obteve um grande sucesso técnico. Desde então, a seqüência de operação proposta por Beau de Rochas passou a ser conhecida como ciclo de Otto ou simplesmente ciclo Otto.

Desde a sua criação, os motores de combustão interna ciclo Otto vêm sofrendo inúmeras atualizações tecnológicas permitindo que se alcancem níveis ótimos de potência e consumo, reduzindo em muito a emissão de poluentes atmosféricos e mais recentemente a “flexibilização” da mistura combustível, isto é, o motor se adapta de

maneira automática ao combustível que lhe é fornecido, seja ele álcool, gasolina, gás ou uma mistura deles.

No estudo de máquinas motrizes, as expressões “cilindrada”, “espaço morto”, “taxa de compressão” e “taxa de expansão” são utilizadas com frequência. Cilindrada (v) é o volume varrido pelo êmbolo durante um curso, sendo, portanto, numericamente igual ao produto do valor numérico do curso pelo valor numérico da área da seção transversal do cilindro. Chama-se deslocamento do motor ao produto do valor numérico da cilindrada pelo número de cilindros do motor. Espaço morto (c) é o valor do volume dos gases comprimidos no fim do curso de compressão, evidentemente igual ao volume da câmara de combustão. A taxa de compressão (igual à de expansão), também conhecida como quociente volumétrico r_v , é definida pela relação:

$$r_v = \frac{c + v}{c} \quad (2.1)$$

A taxa de compressão varia em função das características do motor e dos combustíveis a serem utilizados, atualmente este valor se encontra em torno de 10.

Nos motores ciclo Otto existem duas posições do eixo de manivelas, para os quais o êmbolo está em completo repouso. É nestas posições denominadas, respectivamente, ponto morto superior (PMS) e ponto morto inferior (PMI), Figura 2-2, que o êmbolo inverte o seu sentido de movimento. Uma vez que no motor ciclo Otto a queima do combustível se inicia nas imediações do PMS, a combustão se processa praticamente a volume constante.

Figura 2-2 Ponto morto superior e inferior.

2.1.2. Combustão

A combustão é um processo químico exotérmico composto de dois elementos distintos, o combustível e o comburente. Varias reações são caracterizadas como combustão, como, por exemplo, a combinação de carbono e outros elementos com o oxigênio, a combinação do cloro com o hidrogênio e a do fósforo com o iodo. Entretanto, a reação considerada neste trabalho, que é também a mais comum, é a que tem do oxigênio como elemento comburente.

Os combustíveis são compostos basicamente constituídos de carbono e hidrogênio, contendo ainda pequenas porcentagens de enxofre e outros elementos. O comburente mais utilizado é o ar atmosférico, pelo fato de ser a fonte mais abundante e barata de oxigênio. Na maioria das vezes o ar é utilizado sem nenhum tratamento específico, sendo composto principalmente de nitrogênio e oxigênio, contendo parcelas de dióxido de carbono, vapor de água e gases raros. Em certas regiões do planeta, o ar pode ainda conter parcelas de dióxidos de enxofre e nitrogênio, ozônio e mesmo partículas sólidas. A composição média do ar seco é dada na Tabela 2-1.

Elemento	Composição Média (%)		Valores Práticos (%)	
	Em peso	Em volume	Em peso	Em volume
Nitrogênio	75,55	78,13	77	79
Oxigênio	23,10	20,90	23	21
Outros	1,35	0,97	---	---

Tabela 2-1 Composição média do ar seco. [MARTINS (2001)]

O início do processo de combustão pode ser induzido através de uma centelha ou espontaneamente quando a mistura atinge o ponto de inflamação que é característica de cada combustível. O processo de combustão ocorre de maneira diferente, dependendo da natureza dos combustíveis. No caso dos combustíveis gasosos, havendo uma mistura adequada de ar e gás, o simples alcance do ponto de inflamação já é suficiente para que ocorra a combustão. No caso dos combustíveis líquidos, inicialmente, sob a ação do calor e do oxigênio, há um desdobramento molecular dos compostos do combustível em frações gasosas mais simples, ocorrendo então a combustão destas frações.

2.1.3. Combustão estequiométrica

MARTINS (2001) explica que combustão pode ser classificada de duas maneiras: completa ou incompleta, dependendo de como se dá a reação entre o combustível e o oxigênio. Na combustão completa ocorre a reação total dos elementos ativos do combustível, carbono, hidrogênio e eventualmente enxofre, com o oxigênio, gerando como produtos deste processo dióxido de carbono, vapor de água, óxidos de enxofre e nitrogênio. Na combustão incompleta, parte do carbono não reage ou reage parcialmente com o oxigênio, produzindo, além dos compostos anteriores, monóxido de carbono e, algumas vezes, fuligem, se houver falta considerável de ar. Em alguns casos, podem ainda ser encontrados traços do combustível nos gases de saída do processo. As principais reações entre os constituintes básicos dos combustíveis e o oxigênio são dados na Tabela 2-2.

Reação	Calor Liberado (kJ/kg)
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	32.600
$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	10.100
$2C + O_2 \rightarrow 2CO$	9.990
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	142.120
$S + O_2 \rightarrow SO_2$	9.190

Tabela 2-2 Reações químicas e respectivo calor liberado. [MARTINS (2001)]

Uma outra classificação possível é em função da chamada combustão estequiométrica, que é um caso particular da combustão completa, na qual a quantidade de ar admitida no processo é exatamente a necessária para que ocorra a reação total da mistura combustível com o oxigênio. A partir da composição do combustível pode-se chegar a esta quantidade mínima teórica de ar necessária a sua combustão através de um balanço químico.

A quantidade de excesso de ar deve ser cuidadosamente estudada quando se procura obter o máximo rendimento da combustão. Quando ocorre falta de ar, a combustão se dá de maneira incompleta, não aproveitando todo o potencial do combustível e gerando gases poluentes como o monóxido de carbono. Quando há uma quantidade excessiva de ar, a temperatura de saída dos gases da combustão diminui consideravelmente, prejudicando sua utilização. A equação da combustão com excesso de ar de um combustível genérico é dada por:

Onde λ é o coeficiente de excesso de ar, ou, o desvio do ponto estequiométrico. Segundo MILHOR (2002):

$$\lambda = \frac{\text{mistura ar-combustível empregada}}{\text{mistura ar-combustível estequiométrica}} \quad (2.3)$$

e a mistura pode ser classificada da seguinte forma:

$$\lambda < 1,0 \Rightarrow \text{mistura rica (deficiência de ar)}$$

$$\lambda = 1,0 \Rightarrow \text{mistura estequiométrica}$$

$$\lambda > 1,0 \Rightarrow \text{mistura pobre (excesso de ar)}$$

A mistura estequiométrica, razão ar/combustível para se ter combustão completa, é de 9:1 para o álcool etílico, 14,9:1 para a gasolina pura e aproximadamente 13:1 para o gasool (gasolina utilizada no Brasil, composta por 75% de gasolina pura e 25% de álcool etílico anidro), MILHOR (2002).

Para MARTINS (2001) uma definição decorrente da combustão estequiométrica é a “Temperatura Adiabática de Chama”, ou seja, a temperatura teórica máxima que se pode alcançar com a queima de um determinado combustível na presença de ar (ou oxigênio), admitindo-se um processo adiabático, ou seja, sem perdas de calor. Esta temperatura é alcançada quando ocorre a combustão estequiométrica, sendo que, conhecendo-se a composição do combustível, pode-se determinar essa temperatura considerando-se que o calor fornecido por ele seja todo absorvido pelos gases da combustão.

2.2. Detonação e métodos de detecção

2.2.1. O Fenômeno da detonação

Vulgarmente conhecido como “batida de pino”, ou simplesmente “batida”, esse fenômeno, objeto de trabalho de diversos pesquisadores, recebe o nome na língua

inglesa de *knock*, que é a tradução exata da palavra “batida”. Para todos os efeitos o termo *knock* será traduzido como detonação.

Segundo a abordagem de WESTBROOK (1992) a detonação é o som que acompanha a indesejável ignição espontânea das sobras da mistura ar/combustível não queimada (gases finais) na câmara de combustão de um motor ciclo Otto. Normalmente, esses gases finais são consumidos pela chama turbulenta produzida pela vela de ignição, mas em condições extremas, como cargas elevadas no motor ou regimes de alta rotação, podem levar à manifestação da detonação.

PUZINAUSKAS (1992) verificou três teorias como as mais citadas na literatura por ele consultada:

- Teoria da auto-ignição: a mistura combustível ainda não queimada, adiante da frente de chama produzida pela vela de ignição, atinge uma condição de *stress* térmico e com isso desenvolve um processo rápido de auto-ignição em um ou mais pontos;
- Teoria da detonação: a frente de chama normal, produzida pela vela de ignição, experimenta uma mudança na velocidade de queima, de subsônica para supersônica, associada a uma forte onda de choque;
- Teoria da rápida convergência em fase: é definido como a tendência de dois meios oscilantes convergirem em fase e passarem a oscilar em harmonia. Ocorre quando a frente de chama normal, que possui altíssima aceleração, percorre a mistura combustível, subsonicamente turbulenta, produzindo picos de aumento de pressão;

Embora a teoria da auto-ignição, como a teoria da detonação, tenha obtido aceitação geral na literatura consultada, é a teoria da auto-ignição a mais aceita como causa comum da detonação.

Citando Oppenheim, PUSINAUSKAS (2002) considera que a detonação é um modo de combustão originado espontaneamente e esporadicamente no motor,

produzindo pulsos de pressão agudos associados ao movimento vibratório da carga mecânica e ao som característico de uma batida.

Em um motor ciclo Otto tradicional, a mistura de ar e combustível é levada até a câmara de combustão e comprimida pelo movimento do pistão. Uma vela de ignição inicia a queima da mistura em algum instante próximo ao PMS (quando o volume na câmara de combustão é mínimo) após o que, uma frente de chama turbulenta se propaga pela câmara de combustão. Os últimos gases a serem consumidos pela frente de chama recebem o nome de gases finais e são geralmente encontrados distantes do ponto de ignição. Os gases finais são aquecidos e comprimidos pelo movimento do pistão e pela frente de chama e começa a reagir homogeneamente. Caso atinjam uma determinada condição, os gases vão entrar em combustão espontaneamente. Em condições normais, a frente de chama consome toda a mistura antes que a ignição espontânea possa ocorrer e assim observamos uma combustão normal. Do contrário, se os gases finais entram em combustão antes que a frente de chama termine, a ignição explosiva resulta em ondas de pressão na câmara de combustão. Essas ondas são a fonte do ruído característico associado com a detonação. A Figura 2-3 ilustra essa seqüência.

Figura 2-3 Seqüência que demonstra uma das formas de ocorrência da detonação. [NGK (2004)]

2.2.2. Os efeitos da detonação

Os efeitos causados pelo fenômeno da detonação dependem diretamente de sua duração e intensidade. Enquanto moderado, a detonação não produz alterações significativas no desempenho e na durabilidade do motor, mas, quando intensa e / ou por períodos prolongados, pode danificá-lo, levando-o à inoperância [HEYWOOD (1998)]. Dentre os vários danos produzidos ao motor, (Figura 2-4), encontram-se:

- Empenamento e derretimento de partes do pistão.
- Erosão do cabeçote e do topo do perímetro do pistão
- Deterioração da junta do cabeçote.
- Quebra dos anéis do pistão.

Figura 2-4 Vista de um pistão após exposição prolongada à detonação. [WESTBROOK (2006)]

2.2.3. Instrumentação para a detecção da detonação

Projetos de sistemas de controle da detonação fazem uso de instrumentos que monitoram o processo de combustão e fornecem a necessária realimentação à unidade de controle eletrônico do motor (ECU). HORNER (1995) classifica os sistemas de detecção, com relação ao seu método de medida, em duas categorias, medida direta e medida remota.

No método de medida direta, sensores medem a pressão no interior da câmara de combustão do motor em funcionamento, essa medida direta do processo de combustão fornece qualitativamente o melhor sinal para se analisar e detectar a detonação. Contudo, cada cilindro requer o seu próprio sensor, e o custo individual por sensor é relativamente alto.

O resultado disso é que os sensores de pressão são basicamente utilizados em configurações de pesquisa. É possível que o método de medida direta seja mais utilizado no futuro, quando os custos dos sensores forem reduzidos e as empresas automotivas desenvolverem estratégias mais sofisticadas para a monitoração da combustão.

No método de medida remota, os sensores utilizam as vibrações transmitidas através da estrutura do motor para detectar a detonação na câmara de combustão. Ao contrário do método de medida direta, os sinais recebidos pelos sensores remotos geralmente estão contaminados por outras fontes de sinais que não apenas a detonação. Isso aumenta a dificuldade na sua utilização, especialmente nas altas rotações do motor onde o ruído de fundo das vibrações mecânicas é muito grande, diminuindo efetivamente a relação sinal/ruído. Uma vantagem da utilização de sensores remotos é que, com o posicionamento correto, somente um ou dois sensores são necessários para monitorar todos os cilindros. Além disso, os sensores são mais baratos, principalmente por trabalharem em um ambiente menos agressivo.

Quanto a sua funcionalidade, os sensores remotos podem ser classificados em: ressonantes (ou sintonizados) e não ressonantes (Banda Larga). Os sensores do tipo ressonante são tradicionalmente utilizados em sistemas de controle da detonação de baixo custo. Através de sistemas mecânicos ou elétricos, o sensor excitado pela detonação, amplifica os sinais na sua frequência de ressonância (também conhecida como frequência fundamental).

Como cada modelo de motor manifesta a detonação em uma frequência diferente, precisamos de um sensor para cada modelo de motor, criando assim o maior inconveniente do método. Um grande fabricante teria a proliferação do número de diferentes componentes e como consequência o aumento global de seus custos. Numa tentativa de diminuir a quantidade de sensores, os mesmos poderiam ser fabricados para ressonarem em todas as esperadas variações na frequência da detonação, porém, esse procedimento iria reduzir em muito o desempenho do sistema. A Figura 2-5 apresenta a curva de resposta em frequência de um sensor ressonante.

Figura 2-5 Resposta em frequência de um sensor de detonação ressonante. [NGK (2004)]

Já nos sensores não-ressonantes (Banda Larga), não existem picos de amplificação na faixa de frequências até 20 kHz. Este sensor trabalha igualmente bem para qualquer tipo de configuração do motor. Contudo, algum tipo de pós-processamento é necessário para identificar as frequências características, exigindo recursos de condicionamento de sinal no sistema. Como variações na frequência de ressonância são esperadas para diferentes configurações de motor, uma solução programável fornece a flexibilidade para facilmente modificar a faixa de frequências monitorada com um impacto mínimo no custo do sistema. A Figura 2-6 apresenta a curva de resposta em frequência de um sensor não ressonante. Nota-se que a curva se aproxima bastante de uma reta.

Figura 2-6 Resposta em frequência de um sensor de detonação não-ressonante. [NGK (2004)]

2.2.4. Controle da detonação

Esta subsecção é baseada no trabalho de HORNER (1995). Quando a detonação ocorre, uma onda de choque é gerada dentro da câmara de combustão. A onda de choque excita a frequência natural de vibração do motor, que se situa tipicamente na faixa de 5 a 7 kHz. A geometria e a temperatura da câmara de combustão são as principais variáveis que afetam essa frequência natural de vibração. Variações na frequência fundamental de vibração em uma mesma configuração de motor ficam em ± 400 Hz. Câmaras maiores e/ou a baixas temperaturas resultam em uma frequência natural de vibração mais baixa.

O sinal recebido pelo sensor remoto contém modos de vibração adicionais que são ressonâncias estruturais no motor, resultado da excitação produzida pelas ondas de choque. Normalmente, de dois a quatro outros picos de frequência são evidentes entre a frequência natural de oscilação e o limite de 20 kHz. Como cada estrutura pode ter diferentes modos de vibração, a posição de montagem do sensor pode afetar a maneira como estes modos são detectados e a amplitude de cada um em relação ao ruído de fundo.

Um algoritmo ideal de detecção da detonação precisa ser capaz de se adaptar a certo número de variáveis habilitando o controlador a gerar uma temporização ótima da ignição, situada no limiar da detonação. Como mencionado anteriormente, o projeto estrutural do motor e a posição de montagem dos sensores de detonação afeta a maneira como os modos de frequência são detectados pelo sensor. Usualmente, a função transferência entre o cilindro e o sensor é diferente para cada cilindro, fazendo com que os modos de vibração cheguem ao sensor com diferentes amplitudes. Por isso, um bom procedimento de detecção deve permitir diferentes calibrações para cada cilindro.

Outro fator que precisa ser considerado é o ruído de fundo. Como a velocidade do motor aumenta, o nível da vibração de fundo também aumenta. Quando um limiar de detonação com referência fixa é adotado, uma perda no desempenho pode ser experimentada, pois as amplitudes dos sinais que indicam a detonação em baixas condições de rotação podem ser menores ou iguais às do ruído de fundo em altas rotações. A referência então precisa ser ajustada no nível mais baixo possível para que a

detonação possa ser detectada em baixas rotações, o que limita bastante a habilidade do algoritmo para funcionar em altas rotações. Em função disso, alguns sistemas de detecção são desligados quando a rotação passa de 4000 rpm, e uma estratégia de ignição “conservadora” é adotada para que a detonação não ocorra. Uma boa estratégia de detecção deveria se adaptar a níveis variados de vibração de fundo para permitir que traços de detonação sejam detectados em todas as faixas de rotação do motor.

2.2.5. Condicionamento do sinal

Os sistemas de detecção da detonação precisam realizar algum tipo de condicionamento do sinal antes de executar a estratégia de detecção. Informações sobre a intensidade do sinal na faixa de frequências excitada pela detonação precisam ser obtidas através de medidas. Se um sensor ressonante com um pico de ressonância na frequência fundamental muito estreito está sendo utilizado, nenhum condicionamento de sinal adicional é necessário. Em todas as outras situações, as técnicas de filtragem eletrônica (analógica ou digital) ou a técnica de estimação espectral precisam ser utilizadas. A filtragem analógica é o método predominante na atualidade devido ao seu baixo custo, facilidade de projeto, e a não utilização do poder de processamento da unidade central de processamento (CPU) da unidade de controle eletrônico do motor (ECU).

A saída de um filtro analógico simples, sintonizado na frequência fundamental, é integrado e enviado à ECU que executa a estratégia de detecção. Porém, agora que alta precisão e/ou monitoração de múltiplas faixas de frequência são desejadas, a implementação analógica começa a se tornar tecnicamente proibitiva. Os filtros digitais estão se tornando alternativas práticas à medida que o desempenho computacional das ECU's aumenta. A programação permite que o mesmo hardware possa ser empregado em um grande número de configurações de motor. Essa redução do número de plataformas resulta em grande economia aos fabricantes automotivos em todos os passos no ciclo de vida de seus produtos. O aumento do desempenho do filtro ou a adição de faixas de frequência pode ser facilmente incrementados, desde que não excedam os limites operacionais da CPU da ECU.

Outra técnica digital de condicionamento de sinal é a análise espectral. A Transformada Rápida de Fourier (FFT) proporciona um maior poder para a determinação de frequências do que um filtro digital. Além disso, múltiplas faixas de frequência são disponíveis na saída básica de uma FFT. O limitado rendimento computacional das ECU's e a não familiaridade com a técnica têm limitado o seu emprego na pesquisa e desenvolvimento. Não existe atualmente nenhum sistema em produção que utilize a técnica de análise espectral. O advento de processadores digitais de sinais de baixo custo tornou a potência computacional acessível tornando a técnica de análise espectral proeminente HORNER (1995).

2.2.6. Sensor de detonação magnetostritivo

Os sensores apresentados nesta e nas próximas subseções foram descritos por WOLBER (1995). O sensor de detonação magnetostritivo, Figura 2-8, foi o primeiro sensor de detonação a ser bastante utilizado. Sua finalidade era identificar e quantificar o fenômeno da detonação em motores utilizados em ensaios para determinar a octanagem de combustíveis.

Figura 2-7 Vista explodida do sensor de detonação magnetostritivo. [WOLBER (1995)]

Este sensor é constituído de uma mola do tipo aranha que provoca uma compressão mecânica em todos os seus componentes internos, com exceção da bobina. No centro do conjunto, bastões magnetostritivos feitos de uma liga de níquel, pressionados na direção de seu comprimento, e magneticamente polarizados por um campo imposto por um ímã permanente, com suas linhas de campo se fechando através

da cobertura de aço ferromagnético. Os bastões de níquel são os elementos de mais alta relutância no circuito magnético e estão em estado de saturação magnética.

As vibrações produzidas pela combustão são colhidas no bloco do motor pelo parafuso de montagem e chegam aos bastões de liga de níquel. Estes bastões se assemelham em comprimento a um elemento mecânico ressonante do tipo passa-banda. A pressão mecânica é suficientemente intensa para que as ondas de compressão e retração captadas nunca sejam fortes o suficiente para tirar o bastão do seu estado. As ondas captadas no bastão modulam então, linearmente, a relutância do circuito magnético.

A grande quantidade de espiras da bobina, excitadas através do bastão magnetostritivo, gera uma tensão elétrica proporcional à taxa de variações do fluxo magnético. Este fluxo, em contrapartida, é inversamente proporcional à relutância magnética do bastão. Se as vibrações captadas forem devidas a acelerações provocadas pela detonação e transmitidas através do bloco do motor, a tensão elétrica na bobina representa a terceira derivada no tempo dessa variação.

Por possuir muitos componentes, a construção do sensor de detonação magnetostritivo é difícil e cara. Muito embora apresente um excelente desempenho e uma relação sinal / ruído elevada, foi gradativamente substituído por outras tecnologias.

2.2.7. Sensores de detonação baseados em acelerômetros

Na tentativa de alcançar soluções de baixo custo, a indústria descobriu que a segunda derivada no tempo da variação da aceleração pode ser medida e utilizada para projetar um controle de detonação plenamente funcional. A desvantagem de se utilizar um acelerômetro comparado ao sensor magnetostritivo é que o primeiro não produz uma boa relação sinal / ruído. De qualquer forma, com os avanços da eletrônica é possível utilizar filtros apropriados, e um bom sinal de controle pode ser alcançado.

O primeiro acelerômetro utilizado foi um sistema passa banda ressonante, mecanicamente sintonizado. Em função disso cada modelo de motor exigia o projeto de acelerômetro específico casando a frequência de ressonância do sensor à frequência

fundamental da detonação. Nos anos 90, a tendência mudou para sensores de banda larga utilizados com filtros eletrônicos. Isto traz a vantagem de que um mesmo modelo de sensor pode ser usado para todos os motores, com as características de frequências dos filtros, específicos de um determinado motor, incluídas no módulo eletrônico, que já é específico para aquele modelo de motor. Se as características do filtro forem implementadas digitalmente, elas podem ser instaladas como parte do *software* específico da ECU do motor.

2.2.8. Acelerômetro piezelétrico

Certos tipos de cristais, de cortes específicos ou processos de orientação de sua estrutura atômica, quando submetidos a deformações, produzem uma tensão elétrica proporcional. A esse fenômeno é dado o nome de piezoelectricidade. Se um cristal é carregado com uma massa e uma mola, vibrações induzidas nesse sistema comprimem a montagem e deformam o cristal contra a massa, resultando em uma tensão elétrica que é uma medida da aceleração do corpo a que está montado e preso. Esses sinais são substanciais em amplitude, mas são eletricamente gerados em um ponto de alta impedância. Deste modo, é preciso ter cuidado para que capacitâncias parasitas não contaminem o sinal.

Figura 2-8 Vista em corte de um sensor de detonação piezelétrico. [WOLBER (1995)]

O quartzo é um dos materiais que pode ser usado para a construção de um acelerômetro piezelétrico monolítico de cristal. Isso é possível por usar a massa do elemento piezelétrico como massa do sistema, e combinar a mola com um dos eletrodos do cristal.

2.2.9. Acelerômetro piezocerâmico

Outro tipo de elemento piezelétrico é o dispositivo piezocerâmico. Piezocerâmicas não são cristais simples. Elas podem ser moldadas sobre qualquer forma, como um isolador cerâmico ou um vaso. Impondo-se uma alta tensão elétrica através dos eletrodos na cerâmica enquanto o material está em uma alta temperatura, acima de sua temperatura Curie, e então gradualmente diminuindo sua temperatura, a piezocerâmica se transforma em polarizada, ou piezelétrica, através dos eletrodos.

O melhor tipo de piezocerâmica pertence à família do Chumbo – Zircônio - Titânio (PZT). Estes materiais têm uma temperatura Curie da ordem de 250 a 500 °C. Se o sensor sempre ficar acima de sua temperatura Curie isso provocará a sua degradação e a sua calibração passa a não ser mais válida. De qualquer forma, como estes sensores montados no bloco do motor não experimentam temperaturas muito acima de 125 ou 150 °C, mesmo durante a absorção de calor, eles podem ser usados como sensores de detonação. Acelerômetros piezelétricos de cristais simples também possuem uma temperatura Curie, mas são tipicamente muito maiores que a das piezocerâmicas. O quartzo, por exemplo, tem uma temperatura Curie acima de 600 °C. Na Figura 2-10 temos uma vista em corte do sensor de detonação piezocerâmico NGK (2004).

Figura 2-9 Vista em corte de um sensor de detonação piezocerâmico. [NGK (2004)]

Devido ao fato dos materiais piezocerâmicos poderem ser moldados em qualquer forma, cortados, usinados e revestidos com eletrodos metálicos de filme fino, eles se tornam uma opção simples e barata para a produção em larga escala. O resultado disso é que eles têm se tornado a principal opção da indústria automobilística para os sensores de detonação.

2.2.10. Acelerômetros de silício

O silício não é um material que produz o efeito piezelétrico. No entanto, é possível construir um micro acelerômetro de silício.

Isso é possível usinando, através de uma corrosão química, uma viga em balanço em forma de um “T” em cada célula de um *wafle* de silício. *Strain gauges* são difundidos ou implantados na barra vertical do “T” da viga em balanço. A massa da barra horizontal do “T” e a constante elástica da viga em balanço produzem a deformação mecânica no transdutor e assim uma variação de tensão proporcional à sua aceleração.

Estes acelerômetros estão em produção em massa para uso em freios ABS e como gatilhos para *Air-Bags*. Se vão substituir ou não os sensores de detonação piezocerâmicos é apenas uma questão econômica. Tecnicamente, o acelerômetro de silício é satisfatório. Sua temperatura limite de operação fica acima de 150 °C, o que o torna ideal para a montagem dentro do bloco do motor.

2.2.11. Considerações sobre seleção dos sensores de detonação

Segundo WOLBER (1995), o sinal da vibração de um motor detonando está presente em qualquer ponto do bloco do motor, superposto com sinais de todos os demais cilindros. Em veículos de passageiros que raramente possuem mais de oito cilindros, a maior parte dos sinais de detonação não são superpostas, mas sim consecutivas. O atraso devido as diferentes distâncias dos cilindros para o sensor é sempre muito menor que 1 ms, enquanto que o tempo cilindro a cilindro é de 2,5 ms até mesmo para um motor de 8 cilindros a 6000 rpm.

Contudo, deve-se observar que existem bons e maus locais para a instalação de um sensor de detonação. Assim, a sua localização e o limiar da condição de detonação devem ser determinados de maneira empírica.

Obedecendo as especificações do fabricante, o sensor de detonação deve ser montado em um ponto plano e isento de imperfeições ou substâncias que dificultem ou impeçam a transmissão da vibração para o seu corpo. Para os sensores de detonação montados por meio de uma rosca presa ao corpo do sensor ou com um parafuso que o transpassa, deve ser respeitado também o respectivo torque de aperto.

2.3. Análise Espectral

As teorias discutidas nesta seção são apresentadas na obra de VASEGUI (2000). O objetivo da estimação espectral é descrever a distribuição (no domínio da frequência) da potência de um sinal, baseado em uma série de dados finitos.

O espectro de potência revela a existência, ou a ausência, de padrões repetitivos e estruturas de correlação no sinal de um processo. Esses padrões estruturais são importantes em uma ampla gama de aplicações como previsão de dados, codificação de sinais, detecção de sinais, radar, reconhecimento de padrões e sistemas de tomada de decisão.

O método mais comum para a estimação espectral é baseado na Transformada Rápida Fourier (FFT). Para a maioria das aplicações, os métodos baseados na FFT produzem bons resultados. Porém, métodos de estimação espectral mais avançados podem oferecer uma melhor resolução em frequência e menor variância.

2.3.1. Espectro de potência e correlação

O espectro de potência de um sinal apresenta a distribuição da potência do sinal nas diversas frequências que o compõem. O espectro de potência é a transformada de Fourier da função de correlação e revela informações da estrutura de correlação de um sinal. A vantagem da transformada de Fourier na análise de sinais e reconhecimento de padrões é a sua habilidade em revelar estruturas espectrais que podem ser usadas para

caracterizar um sinal. Na Figura 2-11, verificamos dois casos extremos, uma onda senoidal e um sinal totalmente randômico. Para um sinal periódico, a potência está concentrada em bandas de frequência muito estreita, indicando uma estrutura e o caráter preditivo do sinal. No caso da onda senoidal pura mostrada na Figura 2-11 (a), a potência do sinal é concentrada em uma frequência. Para o sinal randômico mostrado na Figura 2-11 (b), a potência do sinal é espalhada no domínio da frequência indicando falta de estrutura do sinal.

Figura 2-10 Exemplos de sinais preditivo (a) e randômico (b). [VASEGHI (2000)]

VASEGHI (2000) afirma que em geral quanto mais correlacionado ou preditivo for o sinal, mais concentrado é o seu espectro de potência. Inversamente, quanto mais randômico ou não - preditivo o sinal, mais espalhado será o seu espectro de potência.

Então, o espectro de potência de um sinal pode ser usado para deduzir a existência de estruturas repetitivas ou padrões correlacionados no sinal em processo. Essa informação é crucial na detecção e tomada de decisão em análise de sistemas.

2.3.2. Série de Fourier e representação de sinais periódicos

As três funções senoidais a seguir formam a base da análise de Fourier:

$$x_1(t) = \cos \omega_0 t \quad (2.4)$$

$$x_2(t) = \sin \omega_0 t \quad (2.5)$$

$$x_3(t) = \cos \omega_0 t + j \sin \omega_0 t = e^{j\omega_0 t} \quad (2.6)$$

A Figura 2-11(a) mostra as componentes de seno e co-seno de um sinal exponencial complexo da equação (2.6). A Figura 2-11(b) mostra a representação vetorial da exponencial complexa num plano complexo nas dimensões real (Re), e imaginária (Im).

Figura 2-11 Funções básicas de Fourier: (a) componentes real e imaginária de uma senóide complexa, (b) representação vetorial de uma exponencial complexa. [VASEGHI (2000)]

As funções básicas de Fourier são periódicas com uma velocidade angular de ω_0 (rad/s) e um período $T_0 = 2\pi / \omega_0 = 1 / F_0$, onde F_0 é a frequência fundamental (Hz). Essas propriedades fazem da função senoidal a escolha ideal como bloco de construção elementar para a análise e síntese de sinais:

- I. Ortogonalidade: duas funções senoidais de diferentes frequências têm a seguinte propriedade ortogonal:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) dt = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \cos(\omega_1 + \omega_2) dt + \frac{1}{2} \cos(\omega_1 - \omega_2) dt = 0 \quad (2.7)$$

Para senóides harmonicamente relacionadas, a integral pode ser calculada para um período. Equações similares podem ser derivadas para um produto de senos e co-senos de diferentes frequências. A ortogonalidade implica que as funções senoidais são independentes e podem ser processadas independentemente. Por exemplo, em um equalizador gráfico de áudio, podem-se alterar as amplitudes relativas de um grupo de frequências, como os graves, sem afetar as outras frequências.

- II. Funções senoidais são infinitamente diferenciais. Isto é importante, pois a maioria dos métodos de análise de sinais faz uso de sinais diferenciáveis.
- III. Seno e co-seno da mesma frequência têm uma diferença de fase de $\pi/2$ ou um atraso de tempo relativo a um quarto de período ($T_0/4$).

Quando as funções básicas de Fourier são associadas à função exponencial complexa $e^{j\omega_0 t}$, obtemos um arranjo de exponenciais complexas harmonicamente relacionadas na forma:

$$[1, e^{\pm j\omega_0 t}, e^{\pm j2\omega_0 t}, e^{\pm j3\omega_0 t}, \dots] \quad (2.8)$$

O arranjo de sinais exponenciais da equação (2.8) é periódico com uma frequência fundamental $\omega_0 = 2\pi/T_0 = 2\pi F_0$, em que: T_0 é o período e F_0 é a frequência fundamental. Esses sinais formam o arranjo de funções básicas da análise de Fourier. Qualquer combinação linear desses sinais na forma:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jk\omega_0 t} \quad (2.9)$$

é também periódico com um período T_0 . Reciprocamente, qualquer sinal periódico $x(t)$ pode ser sintetizado por uma combinação linear de exponenciais harmonicamente relacionadas. A representação da série de Fourier de um sinal periódico é dada pelas seguintes equações:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jk\omega_0 t} \quad k = \dots -1, 0, 1, \dots \quad (2.10)$$

$$c_k = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0}^{T_0} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt \quad k = \dots -1, 0, 1, \dots \quad (2.11)$$

O coeficiente complexo c_k contém a amplitude (uma medida de intensidade) e a fase do conteúdo de frequência no sinal à $k\omega_0$ (Hz). Na equação (2.11), o coeficiente c_k pode ser interpretado como a medida da correlação do sinal $x(t)$ e a exponencial complexa $e^{-jk\omega_0 t}$.

2.3.3. Transformada de Fourier e representação de sinais aperiódicos

A representação da série de Fourier para sinais periódicos consiste de linhas espectrais harmonicamente relacionadas, espaçadas em múltiplos inteiros da frequência fundamental. A representação de Fourier para sinais aperiódicos pode ser desenvolvida considerando um sinal aperiódico como um caso especial de um sinal periódico com período infinito. Se o período de um sinal é infinito então o sinal não se repete, e é aperiódico.

Considere os espectros discretos para um sinal periódico com um período T_0 , como mostrado na Figura 2-12(a). Como o período T_0 aumenta, a frequência fundamental $F_0 = 1/T_0$ diminui, e as linhas espectrais sucessivas se tornam menos espaçadas. Nos limites, como o período tende ao infinito (isto é, o sinal se torna aperiódico), as linhas espectrais se fundem e formam um espectro contínuo. Então, as equações de Fourier para um sinal aperiódico (mais conhecido como transformada de

Fourier) precisam refletir o fato de que o espectro de frequência de um sinal aperiódico é contínuo.

Figura 2-12 (a) Um trem de pulsos periódicos e suas respectivas linhas espectrais, (b) Pulso unitário com T_{off} infinito e o envelope de seu espectro. [VASEGHI (2000)]

Conseqüentemente, para obter a relação de transformação de Fourier, as operações e variáveis com frequências discretas nas equações da série de Fourier (2.10) e (2.11) precisam ser substituídas por suas contrapartes com frequência contínua. Ou seja, o sinal de soma discreta $\sum$ precisa ser substituído pela soma contínua integral $\int$, a harmônica discreta da frequência fundamental kF_0 substituído pela variável de frequência contínua f , e o espectro discreto de frequências c_k substituído pelo espectro de frequências contínuo chamado $X(f)$.

As equações Fourier para sinais aperiódicos, simplesmente chamados par de transformada de Fourier são dadas por:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \quad (2.12)$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.13)$$

O espectro $X(f)$ pode ser interpretado como uma medida da correlação do sinal $x(t)$ e a senóide complexa $e^{-j2\pi ft}$. A condição para a existência e cálculo da transformada de Fourier do sinal $x(t)$ é que o sinal precisa ter energia finita:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (2.14)$$

2.3.4. Transformada discreta de Fourier (DFT)

Para uma duração finita, um sinal $x(m)$ discreto no tempo com N amostras de comprimento, tem a transformada discreta de Fourier (DFT) definida como N amostras espectrais uniformemente espaçadas:

$$X(k) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) e^{-j(2\pi/N)mk}, k = 0, \dots, N-1 \quad (2.15)$$

A transformada discreta inversa de Fourier (IDFT) é dada por:

$$x(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j(2\pi/N)mk}, m = 0, \dots, N-1 \quad (2.16)$$

Da equação (2.16), o cálculo direto da transformada de Fourier requer $N(N-1)$ multiplicações e um similar número de adições. Algoritmos que reduzem a complexidade computacional da transformada discreta de Fourier são conhecidos como transformada rápida Fourier (FFT). O método FFT utiliza as propriedades de simetria e periodicidade para $e^{-j2\pi/N}$ evitando cálculos redundantes.

2.3.5. Resolução no tempo e na frequência

Sinais como voz, música ou imagem são compostas por eventos não estacionários (isto é, variantes no tempo e/ou variantes no espaço). Por exemplo, a voz é

composta por uma cadeia de sons de curta duração chamados fonemas e uma imagem é composta de vários objetos. Na utilização da DFT é desejável ter uma alta resolução no espaço com a finalidade de obter as características espectrais de cada objeto ou elemento individual no sinal de entrada. Porém, existe uma inter-relação fundamental entre a máxima resolução no tempo/espaço do sinal de entrada e a máxima resolução de frequência para o espectro de saída.

A DFT tem como entrada uma janela de N amostras uniformemente espaçadas no tempo $[x(0), x(1), \dots, x(N-1)]$ com duração $\Delta T = N.T_s$, e como saída N amostras espectrais $[X(0), X(1), \dots, X(N-1)]$ espaçadas uniformemente entre 0 Hz e a frequência de amostragem $F_s = 1/T_s$ Hz. Conseqüentemente, a resolução de frequência espectral na DFT Δf , isto é, o espaço entre amostras de frequência sucessivas, é dado por:

$$\Delta f = \frac{1}{\Delta T} = \frac{1}{N.T_s} = \frac{F_s}{N} \quad (2.17)$$

A resolução de frequência Δf e a resolução do tempo ΔT são inversamente proporcionais de modo que os dois não podem ser simultaneamente aumentados; de fato, $\Delta T \Delta f = 1$. Isso é chamado princípio da incerteza.

2.3.6. Densidade espectral de energia e densidade espectral de potência

Análise espectral tem por finalidade apresentar a distribuição de energia ou potência de um sinal no domínio da frequência. Para um sinal determinístico discreto no tempo, a densidade espectral de energia é definida como:

$$|X(f)|^2 = \left| \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m) e^{-j2\pi f m} \right|^2 \quad (2.18)$$

O espectro de energia de $x(m)$ pode ser expresso como a transformada de Fourier da função de autocorrelação de $x(m)$:

$$|X(f)|^2 = X(f) \cdot X^*(f) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} r_{xx}(m) e^{-j2\pi fm} \quad (2.19)$$

Onde a variável $r_{xx}(m)$ é a função de autocorrelação para $x(m)$. A transformada de Fourier existe somente para sinais com energia finita. Uma classe importante de sinais teóricos são os estocásticos estacionários, que, como uma consequência de sua condição estacionária, são infinitamente longos e têm energia infinita, portanto, não possuem uma transformada de Fourier. Para sinais estocásticos, a quantidade em interesse é a densidade espectral de potência, definida como a transformada de Fourier da função de autocorrelação:

$$P_{xx}(f) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} r_{xx}(m) e^{-j2\pi fm} \quad (2.20)$$

Onde a função de autocorrelação $r_{xx}(m)$ é definida como:

$$r_{xx}(m) = E[x(m) \cdot x(m+k)] \quad (2.21)$$

Na prática, a função de autocorrelação é estimada para um sinal registrado com N amostras de comprimento como:

$$\hat{r}_{xx}(m) = \frac{1}{N-|m|} \cdot \sum_{k=0}^{N-|m|-1} x(k) \cdot x(k+m), k = 0, \dots, N-1 \quad (2.22)$$

Na equação (2.22), como o atraso na correlação m se aproxima do comprimento registro N , a estimação de $r_{xx}(m)$ é obtida através do cálculo da média com menos amostras e como consequência possui uma variância mais alta, uma janela triangular precisa ser utilizada para reduzir as estimativas de correlação para valores muito grandes de atraso m . A janela triangular tem a forma:

$$w(m) = \begin{cases} 1 - \frac{|m|}{N}, & |m| \leq N-1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.23)$$

Multiplicando a equação (2.22) pela janela da equação (2.23) obtemos

$$\hat{r}_{xx}(m) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-|m|-1} x(k) \cdot x(k+m) \quad (2.24)$$

A expectativa da correlação após a aplicação da janela $\hat{r}_{xx}(m)$ é dada por:

$$E[\hat{r}_{xx}(m)] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-|m|-1} E[x(k) \cdot x(k+m)] = \left(1 - \frac{|m|}{N}\right) r_{xx}(m) \quad (2.25)$$

E a variância:

$$Var[\hat{r}_{xx}(m)] \approx \frac{1}{N} \sum_{k=-\infty}^{\infty} [r_{xx}^2(k) + r_{xx}(k-m) \cdot r_{xx}(k+m)] \quad (2.26)$$

2.3.7. Estimação espectral de potência não paramétrica

O método clássico para a estimação da densidade espectral de potência para um registro de N amostras é o periodograma, apresentado por Sir Arthur Schuster em 1899. O periodograma é definido como:

$$\hat{P}_{xx}(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{m=0}^{N-1} x(m) e^{-j2\pi f m} \right|^2 = \frac{1}{N} |X(f)|^2 \quad (2.27)$$

A densidade espectral de potência definida na equação (2.27) é a base dos métodos não paramétricos de estimação espectral. Devido ao comprimento finito e a natureza randômica da maioria dos sinais, os espectros obtidos de registros diferentes de um sinal variam em torno de um espectro médio.

2.3.8. Filtros digitais

Segundo RORABAUGH (1993), os filtros digitais podem ser usualmente classificados quanto à duração de sua resposta a um impulso, que pode ser finita ou infinita. Os métodos para projetar e construir filtros dessas duas classes são

consideravelmente diferentes. Filtros com resposta finita ao impulso (FIR) são filtros digitais onde a resposta a um impulso unitário tem uma duração finita. Em contraste, o filtro de resposta infinita ao impulso (IIR) é aquele cuja resposta a um impulso unitário tem duração infinita. Tanto os filtros FIR como IIR tem vantagens e desvantagens, e nenhum deles é adequado para todas as situações. Os filtros FIR podem ser implementados com técnicas recursivas ou não recursivas, mas usualmente as não recursivas são as mais utilizadas. Devido a sua utilização neste trabalho, serão descritos somente os filtros FIR.

2.3.9. Filtros digitais FIR

A modelo geral para a saída de um sistema FIR linear e invariante no tempo $y[k]$, no instante k é dada por:

$$y[k] = \sum_{n=0}^{N-1} h[n]x[k-n] \quad (2.28)$$

Onde $h[n]$ é a resposta do sistema ao impulso. Como a Equação (2.28) indica, a saída é uma combinação linear da entrada atual e, de N entradas anteriores.

RORABAUGH (1993) afirma que os filtros FIR têm as seguintes vantagens:

- Podem ser facilmente projetados para ter defasagem constante e/ou atraso de grupo constante;
- Quando implementados com técnicas não recursivas, são sempre estáveis e livres das oscilações que são comuns nos filtros IIR;
- O ruído de arredondamento (que é devido ao limite da precisão aritmética do processador digital) pode se tornar relativamente pequeno com a utilização de técnicas não recursivas;
- Os filtros FIR também podem ser implementados através de técnicas recursivas, se isso for desejado;

Apesar de suas vantagens, os filtros FIR possuem também desvantagens significativas.

- A resposta ao impulso de um filtro FIR, embora finita, pode ser demasiado longa para determinadas curvas de atenuação;
- O projeto de filtros FIR é matematicamente mais difícil que o projeto de um filtro IIR para aplicações semelhantes;

2.3.10. A resposta em frequência dos filtros FIR

A resposta ao impulso de um filtro digital $h[n]$ é relacionada com a resposta em frequência $H(e^{j\lambda})$ via transformada de Fourier discreta no tempo (DTFT):

$$H(e^{j\lambda}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h[n]e^{-jn\lambda} \quad (2.29)$$

Para um filtro FIR, $h[n]$ não assume valor zero somente quando $0 \leq n \leq N$. Então os limites da somatória podem ser reescritos como:

$$H(e^{j\lambda}) = \sum_{n=0}^{N-1} h[n]e^{-jn\lambda} \quad (2.30)$$

A Equação (2.30) pode ser diretamente desenvolvida para qualquer valor desejado de λ . É importante notar o fato de que $\lambda = \omega T$ e que o valor contínuo da frequência em radianos ω_m corresponde à frequência discreta com índice m que é dado por:

$$\omega_m = 2\pi mF \quad (2.31)$$

Substituindo-se $\omega_m = 2\pi mF$ por λ , e $H[m]$ por $H(e^{j\lambda})$ na Equação (2.29), temos a transformada discreta de Fourier (DFT):

$$H[m] = \sum_{n=0}^{N-1} h[n] e^{-2\pi jnmFT} \quad (2.32)$$

Assim, a DTFT pode ser calculada como um grupo de frequências discretas $\omega = \omega_m$, $0 \leq m \leq N$, usando a DFT, que pode ser calculada de um modo computacionalmente mais eficiente através de um dos vários algoritmos de FFT.

O atraso em grupo constante é uma propriedade desejável nos filtros já que o atraso em grupos não constante causa a distorção da envoltória em sinais modulados em amplitude e distorção dos pulsos em sinais digitais. A resposta em frequência dos pulsos $H(e^{j\omega})$ pode ser expressa em termos de resposta em amplitude $A(\omega)$ e resposta em fase $\theta(\omega)$ como:

$$H(e^{j\omega}) = A(\omega) e^{j\theta(\omega)} \quad (2.33)$$

Se um filtro tem uma resposta com fase linear na forma:

$$\theta(\omega) = -\alpha\omega \quad -\pi \leq \omega \leq \pi \quad (2.34)$$

então, tem a defasagem τ_p e atraso de grupo τ_g , constantes. De fato, neste caso $\tau_p = \tau_g = \alpha$. Para $\alpha \neq 0$, a Equação (2.34) é satisfeita se e somente se:

$$\alpha = \frac{N-1}{2} \quad (2.35a)$$

$$h[n] = h[N-1-n] \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (2.35b)$$

Dentro das restrições impostas pela Equação (2.34), RORABAUGH (1993) classifica os possíveis filtros em dois tipos. Os filtros do tipo 1 satisfazem a Equação (2.34) com N ímpar, e os filtros do tipo 2 satisfazem a Equação (2.34) com N par. Para os filtros do tipo 1, o eixo de simetria para $h[n]$ encontra-se em $n = (N-1)/2$, como mostrado na Figura 2-13(a). Para os filtros do tipo 2, os eixos de simetria

encontram-se no ponto central entre $n = N/2$ e $n = (N-2)/2$ como mostrado na Figura 2-13(b).

Figura 2-13 Localização do eixo de simetria para os filtros FIR dos tipos 1 e 2. [RORABAUGH (1993)]

A transformada de Fourier discreta no tempo (DTFT) pode ser utilizada diretamente para determinar a resposta em frequência de qualquer filtro FIR. Porém, para o caso particular do filtro FIR de fase linear, a simetria e as propriedades de resposta a impulso podem ser utilizadas para modificar a DTFT reduzindo-se o esforço computacional necessário.

2.3.11. Implementação de filtros pela série de Fourier

O método de implementação de filtros pela série de Fourier é baseado no fato de que a resposta em frequência do filtro digital é periódica e, então, é representável como uma série de Fourier. A resposta em frequência desejada é selecionada e expandida como uma série de Fourier. Esta expansão é truncada para um número finito de termos que são então utilizados como coeficientes do filtro. O filtro resultante tem uma resposta em frequência que se aproxima em muito da resposta desejada RORABAUGH (1993).

O projeto de filtros FIR baseados na série de Fourier deve seguir os seguintes passos:

- Especificar a resposta e frequência desejada $H_d(\lambda)$;
- Especificar a ordem de atenuação desejada (Número de coeficientes do filtro) N ;

- Calcular os coeficientes do filtro $H[n]$ para $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ usando:

$$h[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} Hd(\lambda) [\cos(m\lambda) + j.\text{sen}(m\lambda)] d\lambda \quad (2.36)$$

Simplificações da Equação (2.36) são admitidas quando Hd é a resposta em frequência de um filtro passa – baixas, passa – altas, passa – banda ou rejeita banda ideal.

3. TRABALHOS CORRELATOS

A pesquisa bibliográfica para embasar a discussão sobre o emprego alternativo de sensores de detonação na observação de fenômenos da combustão resultou em trabalhos correlatos que são apresentados e discutidos a seguir.

HÄRLE et al. (1987) apresenta e compara o método clássico para a detecção de detonação com a sua nova proposta, na qual ele dedicou especial atenção às condições de detonação leve que não eram detectadas pelo método clássico.

O autor afirma que medir os níveis de detonação através do sinal da vibração estrutural é uma tarefa relativamente simples devido à disponibilidade de acelerômetros (sensores de detonação). Contudo, essa solução produz uma relação sinal / ruído muito pobre especialmente em altas rotações. Esse ruído é gerado simultaneamente por diversas fontes como engrenagens, rolamentos e principalmente o fechamento de válvulas de admissão e escape. Por este motivo não é fácil reconhecer o sinal de detonação na maioria dos sinais de vibração.

HÄRLE et al. (1987) comenta que o método tradicional para a detecção da detonação consiste em filtrar o sinal de vibração com um filtro passa-faixa (ou a integral do sinal retificado) e comparar com um limiar previamente ajustado. Porém, segundo ele, esse método não é muito sensível, a detecção pode ser facilmente mascarada pelo ruído de fundo, especialmente o ruído do fechamento de válvulas.

HÄRLE et al. (1987) sugere então que o sinal da detonação deve ser precisamente modelado para o desenvolvimento de um método de detecção sensível, e, nesse intuito explica:

“Observando-se a potência do sinal de vibração estrutural de um motor, em diversos ciclos de combustão, e com dois diferentes ângulos de ignição, um dos ângulos de ignição sabidamente não provocando detonação e outro que favorecia sua ocorrência, os ciclos com detonação são facilmente reconhecíveis em função de sua alta potência. Além disso a potência média do sinal aumenta devido aos diferentes modos de operação (ângulos de ignição) e isso não é uma das características da detonação.”

“Como a ressonância na câmara de combustão é uma consequência da detonação, um modelo acústico para as ressonâncias precisa ser usado porque as amplitudes das ressonâncias são bem menores que a amplitude da pressão absoluta. O movimento do pistão causa um deslocamento de frequência extremamente rápido nas ressonâncias que dependem da altura do cilindro. As frequências de ressonância que são independentes da altura do cilindro, para um cilindro com paredes sólidas e devidamente preenchidas com gás homogêneo, podem ser calculadas através da equação de Draper.”

O formato da câmara de combustão de um motor difere consideravelmente de um cilindro ideal, particularmente se o pistão está próximo ao PMS. Porém, com o pistão se afastando do PMS, a câmara se aproxima cada vez mais da forma de um cilindro. Iniciando com alguns valores específicos, as frequências de ressonância deslocam-se tendendo às frequências de um cilindro ideal. Em seu trabalho HÄRLE et al. (1987) desconsiderou estas frequências de ressonância.

Segundo HÄRLE et al. (1987), os deslocamentos de frequência também podem ser devidos às mudanças de temperatura. Em um motor, a temperatura do gás cai abruptamente depois da detonação como resultado da expansão do gás, alterando assim a velocidade da propagação do som no meio.

O modelo proposto por HÄRLE et al. (1987) para o cálculo das ressonâncias na câmara de combustão pode ser escrito como:

$$\bar{x}(t) = u(t - t_0) \sum_{i=1}^p A_i e^{\alpha_i(t-t_0)} \sin(2\pi f_i g(t)t + \phi_i) \quad (3.1)$$

e

$$g(t) = [V(t_s)/V(\alpha_0)]^{(\gamma-1)/2} \quad (3.2)$$

Onde $\bar{x}$ é o modelo do sinal da detonação, t o tempo, s a rotação, p o número de ressonâncias, A_i as amplitudes, α_i os amortecimentos, f_i frequências de ressonância para $\alpha = \alpha_0$, g a função de varredura das frequências, ϕ_i a fase, u função degrau e t_0 o instante de inicio da detonação.

RIZZONI et al. (1996) apresenta também uma abordagem diferente para a detecção da detonação, utilizando-se técnicas de análise no tempo – frequência. Ele descreve também a equação de DRAPPER, que será estudada mais adiante, e fornece detalhes preciosos dos seus parâmetros de ensaio cujos mais relevantes são descritos adiante.

RIZZONI et al. (1996) amostrou os sinais de pressão na câmara de combustão e de vibração no bloco do motor para posterior correlação. Seu sistema amostrava cada sinal a uma taxa de 50.000 amostras por segundo sendo esta taxa definida pelo cálculo das frequências de ressonância através da equação de Drapper.

O sistema de aquisição de dados de RIZZONI et al. (1996) possuía um gatilho para amostrar os sinais apenas na faixa que vai de pouco antes do PMS até 60° após o PMS, por ser esta a faixa onde pode ocorrer a detonação.

Concomitante à aquisição, RIZZONI et al. (1996) utilizou um filtro passa banda com frequências de corte em 1kHz e 20kHz do tipo Butterworth de quarta ordem.

O ciclo de transitórios que decorrem da detonação, que ocupam uma ampla faixa do espectro, são seguidos por um estreitamento da faixa de frequência de ressonância. Isso é devido à mudança na temperatura do gás. A frequência de ressonância se desloca

com o tempo variando em aproximadamente 300 Hz num intervalo de 1 ms, RIZZONI et al. (1996).

BEHRENS et al. (1999) apresentou modelos de sinais levando-se em consideração o ângulo do eixo de manivelas para a utilização de filtros variantes no tempo.

As informações de maior contribuição de seu trabalho foram os parâmetros utilizados em seus ensaios, a saber:

- i. Tanto a rotação quanto a carga mecânica no motor em ensaio, constantes;
- ii. Seleção das frequências de interesse através da equação de Draper, recaindo neste caso sobre as frequências de 7, 12 e 16kHz;
- iii. Estimação espectral da vibração estrutural através de um periodograma dos sinais em torno das frequências de ressonância selecionadas com uma largura de banda de 500 Hz sem demodulação em frequência para manter a simplicidade;

BEHRENS et al. (1999) comparou a energia instantânea de cada frequência de ressonância com a média das combustões anteriores de acordo com a sua frequência. E concluiu que, se essa energia exceder o limiar predefinido como detonação, tem-se a indicação positiva da mesma.

Em WAGNER et al.(1999), é apresentada uma abordagem para estimar a pressão no cilindro de um motor ciclo Otto através de medidas da vibração estrutural. Propondo um método para identificar a função transferência da pressão no cilindro para a vibração do motor, ele afirma poder reconstruir os valores de pressão interna através de medidas de vibração.

Assim como neste trabalho, WAGNER et al. (1999) cita como uma das motivações o fato de o sensor de detonação ter baixo custo e já ser utilizado nos atuais motores em produção.

Embora o autor cite por diversas vezes em seu trabalho que o sinal da vibração estrutural deve ser corretamente filtrado, o mesmo não fez qualquer referência às faixas de frequências utilizadas ou aos filtros adotados.

Em sua abordagem WAGNER et al. (1999) considera que o sinal de pressão $p_k(t)$ para o k - ésimo cilindro ($k=0,...,k-1$) é a soma de três componentes.

$$p_k(t) = b_k(t) + v_k(t) + u_k(t) \quad (3.1)$$

Em que b_k é a contribuição devido à compressão (movimento do pistão quando as válvulas estão fechadas sem combustão), v_k a parcela relativa à combustão e u_k são os demais ruídos envolvidos.

A parcela da compressão, b_k , para um motor quatro tempos mostra um comportamento periódico com uma periodicidade de 4π , e que este sinal desaparece (aproximadamente) durante o tempo em que as válvulas estão abertas.

WAGNER et al. (1999) diz que a pressão em cada cilindro p_k excita a vibração estrutural onde, a resposta do sistema ao impulso é assumido como dependente do tempo, motivado pelas seguintes considerações:

- i. Como o pistão se move dentro do cilindro, o volume da câmara e conseqüentemente à função transferência de $p_k(t)$ para $s_k(t)$ varia continuamente com a posição do pistão;
- ii. Isso o motiva a reescrever esta parcela para uma função da posição do pistão, não dependendo então da velocidade do motor;
- iii. Naturalmente a resposta de um único cilindro não pode ser medida. Um acelerômetro montado na superfície do motor coletará as vibrações de todos os k cilindros sobrepostos pela parcela do ruído;

Em suas conclusões WAGNER et al. (1999) relata que a baixas rotações, sua abordagem funciona perfeitamente. Contudo, os resultados obtidos em altas rotações do motor mostraram grandes desvios dos sinais de pressão medidos.

JÄRGENSTEDT (2000) descreve uma técnica em que emprega o sensor de detonação para detectar o instante de início da combustão em motores ciclo DIESEL.

O objetivo de seu trabalho foi desenvolver uma técnica alternativa ao da medida direta de pressão na câmara de combustão para determinar o exato instante da ignição espontânea no motor ciclo DIESEL, com isso é possível determinar com precisão o ponto de injeção de combustível diminuindo o consumo e a emissão de poluentes.

Em seus testes o autor utilizou sensores de detonação piezelétricos com resposta em frequência na faixa de 2 a 20kHz com um sistema de aquisição de dados a uma taxa de amostragem de 200.000 amostras por segundo, 14 bits de resolução. Com o auxílio do software MATLAB para aplicar um filtro passa banda e calcular a envoltória do sinal resultante, o autor conclui que quando a envoltória do sinal atinge um pico de 30% do da maior envoltória registrada, ocorreu o início da combustão.

Em BEHRENS et al. (2001), é apresentada a aplicação de três diferentes métodos de análise tempo - frequência aos sinais de pressão e vibração do bloco do motor para melhorar os diagnósticos de fenômenos de combustão em motores ciclo Otto.

O autor explica que a detonação provoca fortes ressonâncias na câmara de combustão e podem ser detectadas utilizando-se medidas diretas de pressão já que por se tratar de gás com uma distribuição homogênea, as frequências de ressonância dependem unicamente da velocidade do som e da geometria da câmara de combustão.

BEHRENS et al. (2001) lamenta que os sensores de pressão disponíveis são muito caros para veículos de série. Os sinais de vibração do bloco do motor, medidos através de sensores de aceleração na superfície do bloco do motor, contêm versões distorcidas das frequências de ressonância no interior do cilindro. BEHRENS et al. (2001) sugere que aplicar a análise tempo – frequência nos sinais de pressão e vibração

do motor pode ajudar a entender a natureza do sinal e melhorar a detecção da detonação. Pois, como a pressão e a vibração consistem de uma superposição de componentes modulados em amplitude e frequência, sua identificação somente no domínio do tempo ou da frequência é difícil.

Em suas conclusões, BEHRENS et al. (2001) reporta que a estimação espectral pelo método Wigner-Ville Spectrum do sinal de vibração mostra alguns componentes estranhos nas frequências de 6.5, 10 e 12kHz, podendo isso ser devido à influência da função de transferência do bloco do motor ou ruídos adicionais.

BEHRENS et al. (2001) afirma que como as ressonâncias são frequências moduladas, a estimação da energia ressonante ótima da detonação requer filtros passa-banda variantes no tempo. Porém, com fins de simplificação, para pressões amostradas ou sinais da vibração com ressonâncias em frequências aproximadamente constantes, um filtro passa banda simples é suficiente para separar os componentes.

Para BEHRENS et al. (2001) os sensores de detonação dos motores atuais, usualmente, estimam a energia do sinal em uma ampla faixa, isto é, de 5 a 12KHz. A energia do sinal é comparada com um limiar que indica a ocorrência da detonação. Para o autor, seu método pode ser melhorado levando em conta que o sinal da energia é a soma das energias das ressonâncias. Devido à atenuação ou amplificação de ressonâncias a distribuição de energia no sinal de vibração do bloco do motor pode diferir da energia do sinal de pressão usado como referência.

SAMAT (2001) et al. propõe o uso da estimação espectral com correlação cruzada do espectro para monitorar a condição de um motor automotivo baseado em sua assinatura sonora.

O autor escolheu a estimação espectral não paramétrica em função da alta disponibilidade de amostras do sinal não manifestando assim problemas de espalhamento e resolução de frequência.

SAMAT et al. (2001) afirma que o motor de um carro emite um padrão espectral único que pode ser utilizada para monitorar a condição do mesmo. O som de um motor

é devido ao ciclo interno de combustão e ao mecanismo do motor. Assim, foram estudadas as técnicas de estimação espectral Periodograma, Bartlett, Welch and Blackman-Tukey. Após seus ensaios o autor concluiu que a técnica com a menor variância para a estimação da assinatura espectral de motores ciclo Otto é a Blackman-Tukey.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Descrição do experimento

O seguinte experimento, realizado no Laboratório de Motores da EESC-USP, foi constituído no intuito de comprovar que os fenômenos associados à combustão em um motor de combustão interna ciclo Otto podem se manifestar também na forma de vibração de sua estrutura.

Para isso foram realizados ensaios com dois motores ciclo Otto, onde o sensor de detonação original fora removido e, em sua localização original, instalado um sensor de detonação não ressonante de banda larga.

Mantiveram-se constantes as condições de carga mecânica aplicada ao motor, rotação e avanço de ignição, considerou-se que não ocorreram variações sensíveis na constituição física do motor ao longo do tempo de ensaio, variou-se a mistura combustível entre ensaios, com o objetivo de encontrar diferentes assinaturas espectrais para cada ensaio, comprovando assim o objetivo deste trabalho.

4.2. Materiais

4.2.1. O motor AT1000

Como o diâmetro do cilindro formado pela câmara de combustão é o principal parâmetro para a determinação da frequência de ressonância da combustão gerada pelo motor em funcionamento, este foi o primeiro dos materiais de ensaio a ser definido.

Devido principalmente à sua disponibilidade e farta documentação disponível, a escolha recaiu sobre o motor AT1000 produzido pela Volkswagen. O Laboratório de Motores da EESC-USP, local onde foram realizados todos os ensaios, dispõe de duas unidades deste modelo de motor, ambos os modelos a álcool. Os dados técnicos fornecidos pelo fabricante encontram-se disponíveis no ANEXO A e a preparação dos motores para os ensaios são apresentados adiante.

4.2.2. O Sensor de detonação não ressonante NGK

O sensor selecionado para este estudo foi o Sensor de Detonação não Ressonante fabricado pela NGK do Brasil. Muito embora o fabricante forneça pouquíssimos detalhes técnicos sobre o seu componente, seu catálogo informa tratar-se de um sensor de detonação não ressonante do tipo piezelétrico NGK (2004). Seu torque de aperto está numa faixa de 2,0 a 2,5 Kgf.m e, a sua curva de resposta em frequência é a que pode-se ver no gráfico da Figura 4-2.

Figura 4-1 Resposta em frequência do sensor de detonação não ressonante NGK [NGK (2004)].

Sua resposta em frequência tem uma variação máxima de 10 mV na faixa de 2 a 16 kHz.

Um dos pontos de maior dificuldade neste projeto foi a busca de informações técnicas detalhadas sobre os sensores de detonação. Os fabricantes omitem informações importantes em sua folha de dados, repassando-as somente aos fabricantes de motores.

Este modelo de sensor de detonação é geralmente encontrado em automóveis equipados com motores da marca FIAT e foi o único sensor do tipo piezelétrico, não ressonante, com documentação disponível no mercado nacional, sendo este então o motivo de sua utilização. Contudo, sua faixa de resposta em frequência (2 kHz a 16 kHz) limitou a pesquisa pois não é possível prever o comportamento do sensor de detonação fora da faixa de frequências especificada pelo fabricante.

Não foram utilizados outros modelos de sensores de detonação produzidos, porque dentre os fabricantes nacionais de sensores de detonação, o único a fornecer a curva de resposta em frequência foi a NGK.

Outra dificuldade encontrada foi a falta de excitadores que operassem acima de 10 kHz. Por este motivo não foi possível ensaiar o sensor de detonação e verificar a sua curva de resposta em frequência.

A Figura 4-3 mostra o sensor de detonação da NGK.

Figura 4-2 Sensor de detonação da NGK. [NGK (2004)]

4.2.3. O Sistema de aquisição de dados

Conhecendo então a faixa de frequências em que se deseja trabalhar (2 a 16 kHz da curva de resposta do sensor) e as características elétricas do sensor utilizado, prossegue-se à seleção do equipamento de aquisição de dados adequado.

A utilização de sistemas comerciais de aquisição de dados foi descartada por serem equipamentos tecnicamente diferentes dos sistemas de aquisição empregados em ECU's comerciais utilizadas nas motores atuais. Sendo assim, visando futuramente desenvolver um sistema de aquisição de dados que seja compatível com a ECU's

comerciais, que utilizam microcontroladores ou conversores analógico/digital de baixo desempenho, foi feita a opção por placas de aquisição de áudio.

O primeiro parâmetro de seleção para as placas de aquisição de áudio foi a impedância de entrada. Para um perfeito casamento de impedâncias entre o sensor de detonação e o sistema de aquisição, sua impedância de entrada deve ser maior que 100k Ω , o que resultou em apenas três modelos de placas de aquisição de áudio, os modelos Sound Blaster 16 e Sound Blaster Live! 24 fabricados pela Creative Labs e o modelo Soundmax Cadenza fabricado pela Analog Devices. A Tabela 4-1 apresenta os modelos selecionados, sua taxa de amostragem, resolução e frequência máxima do sinal de entrada.

Modelos	Taxa	Resolução	f_{max}
Sound Blaster 16	44.1k amostras / s	16 bits	22.050 Hz
Sound Blaster Live! 24	96k amostras / s	24 bits	48.000 Hz
SoundMax Cadenza	44.1k amostras / s	16 bits	22.050 Hz

Tabela 4-1 Modelos de placas de aquisição de áudio e suas características.

Embora as folhas de dados dos fabricantes das placas de aquisição informassem que seus sistemas possuem resposta em frequência plana para a faixa de 20 Hz a 20 kHz, foi conveniente realizar um teste para a verificação dessas informações.

O ensaio foi realizado conforme o arranjo da Figura 4-3. Utilizando-se um gerador de frequências calibrado modelo HP33120A capaz de alcançar a frequência de 15Mhz, foram gerados sinais de 50 mV pico a pico com frequências de 25Hz a 20kHz em intervalos de 1/3 de oitava. Este intervalo cobre toda a faixa de resposta em frequência do sensor de detonação utilizado e não ultrapassa o limite de frequência máxima de entrada das placas Sound Blaster 16 e Soundmax Cadenza.

Figura 4-3 Arranjo para teste de resposta em frequência da placa de aquisição.

Foram realizadas então aquisições destes sinais com os três modelos de placa, e as aquisições foram gravadas em arquivos do tipo WAV, um para cada frequência conforme mostra a Figura 4-4. De posse destes arquivos e usando o software MATLAB, cuja rotina utilizada encontra-se no Apêndice A, foram construídos os gráficos de resposta em frequência da Figura 4-5.

Figura 4-4 Gráfico da resposta em frequência das placas de aquisição de dados.

Da Figura 4.5 pode-se verificar que:

Todas as placas de aquisição possuem variações muito menores que 0,05dB na faixa de 20Hz a 18kHz, contudo, a Sound Max Cadenza e Sound Blaster 16, apresentaram grande atenuação após os 18 kHz. Fato este que levou à escolha da Sound Blaster Live! 24 como placa de aquisição. A característica da Sound Blaster Live! 24 de não produzir atenuação nos sinais acima de 18 kHz se deve a sua capacidade de adquirir sinais a uma taxa de 96.000 amostras por segundo em detrimento das demais que só amostram 44.100 vezes por segundo.

A Figura 4-5 mostra a realização do ensaio para seleção da placa de aquisição.

Figura 4-5 Ensaio de seleção da placa de aquisição.

4.2.4. *O software Sound Forge*

Um dos sucessos deste projeto foi a abordagem dos sinais provenientes do sensor de detonação não como uma sequência de amostras, mas sim como sinais de áudio. Essa abordagem permitiu a utilização de uma gama de ferramentas de pós-processamento já desenvolvidas para o trabalho com áudio.

A principal destas ferramentas foi o software Sound Forge da empresa japonesa Sony. Esta ferramenta foi utilizada para a gravação dos sinais do sensor de detonação em arquivos no formato Microsoft Wave (.wav), fornecendo recursos para monitorar a gravação e a sua posterior visualização além de possibilitar uma análise espectral previa dos sinais em gravação. Cabe destacar que foi utilizada uma versão de avaliação, plenamente funcional por um prazo de 30 dias, e disponível para *download* no sítio do fabricante.

Figura 4-6 Tela de gravação do software *Sound Forge*.

As Figuras 4-6 e 4-7 mostram respectivamente as telas de gravação dos sinais de áudio e a posterior visualização dos sinais gravados no Sound Forge. Na parte inferior da Figura 4-7, é possível visualizar o sinal proveniente do sensor de detonação com o motor em funcionamento e, logo acima, o sinal piloto proveniente do sensor de efeito Hall que fornece à unidade de controle eletrônico do motor informações sobre a posição do eixo de manivelas.

Figura 4-7 Tela do software Sound Forge com a visualização dos sinais gravados.

4.3. Métodos

4.3.1. Ressonância da detonação

A frequência de ressonância fundamental do sinal de pressão gerado pela detonação, segundo WOLBER (1995), é dependente da geometria do cilindro e da velocidade do som no gás em seu interior. Utilizando ensaio realizado em um dos cilindros de um motor ciclo Otto de seis cilindros, WOLBER demonstrou que os componentes de alta frequência da vibração estrutural são bons indicadores de detonação. Outras vibrações estruturais introduzidas por eventos mecânicos, como a atuação de mecanismos e as diversas massas em movimento circular no motor, introduzem ruídos que podem ser confundidos com os sinais produzidos pela detonação. A frequência de ressonância em um cilindro típico em motores de veículos de passeio situa-se na faixa de 2 a 12 kHz. Segundo WOLBER (1995), uma estimativa da frequência de ressonância da detonação em um cilindro pode ser obtida através da equação (4.1), conhecida como equação de Draper:

$$fr_{m,n} = \frac{c.\eta_{m,n}}{\pi.B} \quad (4.1)$$

em que fr é a frequência fundamental de ressonância da detonação que irá excitar o motor, $\eta_{m,n}$ é uma constante adimensional determinada em função da configuração do modo de vibração dos gases no interior do cilindro sendo o índice m o número de modos de vibração radiais e n o de vibrações circunferenciais conforme demonstra a Figura 4-8. A variável c é a velocidade do som no gás no interior do cilindro (supondo que a carga combustível pré-misturada comporta-se como um gás ideal), B que é o diâmetro do cilindro e T a temperatura do gás na câmara durante a combustão. WOLBER (1995) afirma ainda que as modalidades axiais da vibração podem ser desprezadas em função da pequena altura da câmara de combustão quando comparada ao seu diâmetro.

Segundo TAYLOR (1976), [Tabela 3-1, Pág. 54], tem-se que as velocidades do som na mistura combustível no interior do cilindro são 857,67 m/s e 859,5 m/s, para o álcool etílico e gasolina respectivamente. Admitindo-se uma temperatura média dos gases no cilindro como 2000 K, pode-se estimar em que frequência do espectro ocorrerá o impulso fundamental provocado pela combustão.

m,n	1,0	2,0	0,1	3,0	1,1
η	1,841	3,054	3,832	4,201	5,332

Figura 4-8 Modos de vibração em um cilindro e suas constantes. [TAYLOR (1976)]

Como a determinação do modo de ressonância dos motores utilizados em nos ensaios foge ao escopo deste trabalho, optamos por calcular uma tabela de estimativas com todas as possíveis ressonâncias geradas pelos diversos modos de vibração discutidos por WOLBER (1995).

Considerando-se o diâmetro do cilindro, $B = 0,0671$ m para ambos os motores, conforme os dados fornecidos pelo fabricante (ANEXO A), obteve-se uma expectativa das frequências de ressonância. Estes resultados estão apresentados na Tabela 4.2.

Modo	$\eta_{m,n}$	F_s Gasolina [Hz]	F_s Álcool [Hz]
1,0	1,841	7506,3	7490,3
2,0	3,054	12452,1	12425,6
0,1	3,832	15624,2	15591,0
3,0	4,201	17128,8	17092,3
1,1	5,332	21740,2	21693,9

Tabela 4-2 Frequências de ressonância calculadas.

As frequências de ressonância, F_s , para as diversas condições situam-se numa faixa de frequências que vai de aproximadamente 7,4 a 21,8 KHz. Sendo estes então os limites inferior e superior para o sistema de aquisição usado neste trabalho. Na Tabela 4.3 são apresentadas as diferenças entre as frequências de ressonância do álcool e da gasolina para cada um dos modos de vibração.

Modo	F_s Gasolina – F_s Álcool [Hz]	%
1,0	16,0	0,21
2,0	26,5	0,21
0,1	33,2	0,21
3,0	36,5	0,21
1,1	46,3	0,21

Tabela 4-3 Diferenças entre F_s da Gasolina e Etanol.

Levando os dados de ressonância da gasolina da tabela 4.2 ao gráfico da Figura 4-1, temos:

Figura 4-9 Gráfico da ressonância da gasolina versus a constante do modo de vibração no cilindro.

As frequências de ressonância (F_s) da gasolina e do álcool variam linearmente em função da constante do modo de vibração. Disso conclui-se que mesmo adotando um modo de ressonância incorreto para o motor em ensaio ou que o mesmo varie

durante um ciclo de combustão, podemos afirmar que a sua ressonância irá se comportar de forma semelhante aos modos de ressonância conhecidos dentro dessa faixa.

4.3.2. Preparação dos motores

Após a seleção dos equipamentos necessários, passou-se aos preparativos das dependências do laboratório e equipamentos.

Quanto aos motores, foram utilizadas duas configurações para os ensaios. Na primeira configuração denominada Ensaio_1, foi utilizado um motor AT 1000 a álcool, montado sobre uma bancada metálica e mecanicamente acoplado a um dinamômetro de corrente de Foucault, através de um eixo Cardan. O dinamômetro possui um controlador que permite aplicar uma carga mecânica variável a fim de manter a rotação constante. A Figura 4-10 mostra a montagem do motor do Ensaio_1 e seu acoplamento ao dinamômetro.

Figura 4-10 Montagem do motor para a realização do Ensaio_1.

Para o Ensaio_2 foi utilizado outro motor AT 1000, a álcool, montado sobre um cavalete metálico e não tendo sido acoplado a nenhuma carga mecânica. Sua aceleração foi controlada regulando-se a abertura da borboleta de aceleração e a rotação monitorada através de um *scanner* automotivo modelo Rasther EX fabricado pela Tecnomotor, acoplado a unidade de controle eletrônico original do motor.

Figura 4-11 Montagem do motor para a realização do Ensaio_2.

Em ambos os ensaios a alimentação de combustível foi realizada através de uma linha pressurizada por uma bomba conforme as indicações da folha de dados. A alimentação do sistema elétrico (ignição e controle eletrônico) foi fornecida por uma bateria. A tomada de ar para o motor foi feita no interior do laboratório e os gases de escape retirados do ambiente através de uma tubulação.

Os combustíveis utilizados nos ensaios foram dosados utilizando-se um béquer graduado. Ao término de cada ensaio o reservatório foi esvaziado e a sua mistura combustível descartada. A cada troca da mistura combustível o motor permanecia em funcionamento aguardando que o ventilador do sistema de arrefecimento fosse acionado ao menos duas vezes indicando dois ciclos de troca de água, com isso, pressupôs-se que

a mistura combustível do ensaio anterior que ainda estava na linha pressurizada foi consumida e que o motor entrou em seu regime ótimo de funcionamento.

O microcomputador IBM-PC compatível, utilizado na aquisição de dados, foi montado na área reservada para tal finalidade no Laboratório de Motores que é acusticamente isolada da área de ensaios onde ficam os motores.

Nessa mesma área, conforme podemos ver na Figura 4-12, localiza-se a bancada para o controle operacional do motor do Ensaio_1. Sobre a bancada está o reservatório de combustível com a respectiva bomba, ligado a instrumentos para medidas de vazão. À esquerda da bancada, fica o acelerador que atua sobre a borboleta do motor e no painel frontal ficam os controles do dinamômetro.

Figura 4-12 Vista da área reservada do laboratório de motores.

O sensor de detonação original do motor foi retirado e em seu lugar montado o sensor de detonação ligado ao sistema de aquisição conforme mostra a Figura 4-13. A conexão elétrica entre o sensor de detonação e a placa de aquisição foi feita através de cabos blindados a fim de impedir que ruídos provenientes do acionamento dos sistemas auxiliares do motor ou do sistema elétrico do laboratório pudessem interferir nos sinais em aquisição.

O desligamento do sensor de detonação original da ECU do motor não provocou mudanças no funcionamento do motor, pois, segundo manual de manutenção do fabricante, a unidade de controle eletrônico atrasa o ponto de ignição quando ocorre o fenômeno da detonação, como o sensor original foi mecanicamente separado do motor, mas não desligado eletricamente, a ECU interpretou que o motor estava funcionando corretamente e sem a ocorrência da detonação, não alterando assim o avanço da centelha.

Figura 4-13 Montagem do sensor de detonação alternativo no ponto original.

As diversas misturas combustíveis utilizadas nos ensaios, as rotações e os respectivos arquivos de áudio produzidos pelo sistema de aquisição estão listados na tabela 4-4, Ensaio_1 com índices de 01 a 09 e Ensaio_2 com índices 01 a 12.

Nome do Arquivo	Rotação [rpm]	Mistura	
		% Volume	
		% AEHC	% Gasolina C
Ensaio_1_01.wav	2500	100,00	0,00
Ensaio_1_02.wav	3000	100,00	0,00
Ensaio_1_03.wav	3500	100,00	0,00
Ensaio_1_04.wav	2500	50,00	50,00
Ensaio_1_05.wav	3000	50,00	50,00
Ensaio_1_06.wav	3500	50,00	50,00
Ensaio_1_07.wav	2500	44,44	55,56
Ensaio_1_08.wav	3000	44,44	55,56
Ensaio_1_09.wav	3500	44,44	55,56
Ensaio_2_01.wav	2500	100,00	0,00
Ensaio_2_02.wav	3000	100,00	0,00
Ensaio_2_03.wav	3500	100,00	0,00
Ensaio_2_04.wav	2500	0,00	100,00
Ensaio_2_05.wav	3000	0,00	100,00
Ensaio_2_06.wav	3500	0,00	100,00
Ensaio_2_07.wav	2500	30,00	70,00
Ensaio_2_08.wav	3000	30,00	70,00
Ensaio_2_09.wav	3500	30,00	70,00
Ensaio_2_10.wav	2500	44,44	55,56
Ensaio_2_11.wav	3000	44,44	55,56
Ensaio_2_12.wav	3500	44,44	55,56

Tabela 4-4 Nome dos arquivos de áudio e suas proporções de combustível.

4.3.3. Aquisição de sinais

O sistema de aquisição de dados selecionado suporta a aquisição de até dois canais de áudio simultâneos com a mesma taxa de aquisição. Como um dos canais de aquisição foi dedicado aos sinais do sensor de detonação nos dois ensaios, o outro canal foi utilizado de dois diferentes modos.

No Ensaio_1 o canal 1 foi utilizado para a aquisição dos sinais provenientes do sensor rotação do motor. Esse sinal foi obtido derivando-se a conexão entre o sensor de efeito hall e unidade de controle eletrônico, através de um divisor resistivo para adequar a tensão de saída do sensor com a máxima tensão de entrada da placa de aquisição. O arranjo dessa derivação pode ser visto na Figura 4.14.

Figura 4-14 Arranjo para a aquisição de dados do sensor Hall.

Esses sinais foram adquiridos no intuito de indicar a combustão no primeiro cilindro, permitindo assim que demais eventos seqüenciais pudessem ser identificados.

Já no Ensaio_2, optou-se por utilizar o canal 1 para outra finalidade. Como o sistema de aquisição de dados não possui uma escala calibrada em tensão, mas em decibéis, não é possível estabelecer um relação entre os sinais e a intensidade da aceleração que os geraram. Então, ligando ao canal de aquisição R um gerador de sinais senoidal, calibrado, gerando um sinal de piloto de frequência 1 kHz com amplitude de 50 mV pico a pico, foi possível estabelecer a relação entre Tensão e decibéis no sistema de aquisição.

Nos dois ensaios, o sensor de detonação foi conectado diretamente à placa de aquisição no canal 2, sem o uso de qualquer tipo de condicionamento de sinal. Através da curva de resposta em frequência do sensor de detonação, a maior frequência da faixa garantida pelo fabricante é 16 kHz. Obedecendo-se o critério de Nyquist, o sinal deve ser amostrado a pelo menos o dobro dessa frequência, ou seja 32.000 amostras por segundo pelo menos, RORABAUGH (1993). No sistema de aquisição, foi selecionada a primeira taxa superior disponível, que é de 44.100 amostras por segundo.

Para cada variação de combustível, foram registrados três arquivos de aquisição, um deles para cada rotação do motor. Cada arquivo tem uma duração de 30 segundos, o que totaliza 1.323.000 amostras. Nas três faixas de rotação escolhidas para os ensaios, 2500, 3000 e 3500 rpm, considerando-se que para cada rotação do eixo motor temos 2 ciclos completos de combustão, em 30 segundos temos respectivamente a aquisição de

2500, 3000 e 3500 ciclos de combustão completos, o que, na média, é suficiente para diluir imperfeições de alguns ciclos de combustão.

4.3.4. O software Matlab

Para o trabalho de processamento dos sinais adquiridos durante os ensaios, foi utilizado o *software* Matlab. Todas as rotinas de processamento digital de sinais utilizadas neste trabalho foram escritas utilizando – se a ferramenta *m-File Editor* do próprio Matlab.

Figura 4-15 Tela principal da ferramenta para projeto de filtros digitais do Matlab.

Para o projeto dos filtros digitais foi utilizada a ferramenta *Filter Design & Analysis Tool*. Nessa ferramenta é possível projetar filtros digitais FIR e IIR e estudar a sua resposta em frequência e estabilidade. A Tela principal dessa ferramenta pode ser vista na Figura 4-15.

Foram projetados sete filtros para a utilização neste trabalho. O primeiro deles foi um filtro FIR, passabaixas de ordem 50 com frequência de corte em 1 kHz. Esse

filtro, cujo gráfico de resposta em frequência e fase pode ser visto na Figura 4-16, foi projetado para a análise da resposta em baixa frequência do sensor de detonação nos ensaios 1 e 2.

Figura 4-16 Resposta em frequência e fase dos filtros passa - baixa.

O segundo filtro projetado também um FIR, do tipo passabanda, ordem 50 com frequências de corte em 2 e 16 kHz. O propósito deste filtro é o de selecionar no ensaio as faixas de frequência em que o sensor de detonação apresenta resposta conhecida fornecida pelo fabricante. O seu gráfico de resposta em frequência e fase pode ser visto na Figura 4-17.

Figura 4-17 Resposta em frequência e fase dos filtros passa - faixa.

Os demais cinco filtros utilizados são todos do tipo FIR, passabanda, ordem 100, com 500 Hz de faixa passante e frequências de corte centradas nos valores próximos aos das frequências de ressonância calculados na subseção 4.3.1. Estes valores são apresentados na Tabela (4-5).

Filtro	F_s Gasolina [Hz]	F_s Álcool [Hz]	F_c Filtro [Hz]
1	7506,3	7490,3	7500
2	12452,1	12425,6	12400
3	15624,2	15591,0	15600
4	17128,8	17092,3	17100
5	21740,2	21693,9	21700

Tabela 4-5 Frequências de ressonância e os respectivos filtros.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados dois ensaios, cada um deles com o seu respectivo número de repetições e seus dados registrados conforme versa o item 4.3. Sobre esses dados foram realizadas três diferentes análises espectrais. Essas análises estão descritas e discutidas em três subitens a seguir, sendo que as análises foram aplicadas em ambos os ensaios.

5.1.1. Análise espectral na faixa de 0 a 2 khz

Nesta primeira análise foi estudada a resposta em frequência das vibrações captadas pelo sensor de detonação, na faixa de frequências abaixo de 2 kHz. Embora essa faixa não seja contemplada pelo fabricante na curva de resposta em frequências do sensor de detonação, optou-se por analisá-la pois é nesta faixa que os fenômenos de baixa frequência associados a rotação do eixo do motor e da carga mecânica (no caso do motor ligado ao dinamômetro) manifestam-se.

Aplicou-se um filtro FIR passa – baixas de ordem 50 nos arquivos de áudio das nove repetições do Ensaio_1 e das 12 repetições do Ensaio_2. Desse sinal resultante realizou-se a estimação espectral conforme técnica descrita na subseção 2.3.6. Com isso obteve-se a densidade espectral de potência dos sinais na faixa de 0 a 2 kHz, de cada uma das repetições dos Ensaios. Os algoritmos em Matlab utilizados nestes cálculos estão disponíveis nos Apêndices B e H, respectivamente para os Ensaios 1 e 2.

No gráfico da Figura 5-1 pode-se ver a densidade espectral de potência (PSD) do Ensaio_1_08 realizado a 3000 rpm. Nota-se neste gráfico que o primeiro pico de energia a partir de zero está situado na frequência de 50 Hz, que corresponde exatamente a frequência de rotação do eixo do motor em rotações por segundo. Os demais picos

encontram-se nas frequências múltiplas de 50 Hz demonstrando assim o comportamento de vibrações harmônicas.

Figura 5-1 PSD do Ensaio_1_08 com filtro passa-baixas em 1kHz.

Já o gráfico da Figura 5-2 apresenta a PSD do Ensaio_2_09 realizado a 3500 rpm. Comparando-se este com o gráfico da Figura 5-1, nota-se claramente a diminuição das magnitudes das harmônicas da frequência fundamental. Novamente a frequência proeminente é a de rotação do motor, situada neste exemplo em 58,33 Hz para a rotação de 3500 rpm. Essa grande mudança na magnitude dos harmônicos se explica pela ausência de carga mecânica aplicada ao motor neste ensaio, conforme descrito na subsecção 4.3.2. Isso mostra que a carga mecânica produz alterações significativas no espectro de vibração do bloco do motor e que sensor também pode ser utilizado para a observação de fenômenos abaixo de sua frequência nominal de trabalho, levando-se sempre em consideração que as amplitudes podem não corresponder às amplitudes reais da vibração. Essa questão poderia ter sido resolvida com a realização de um ensaio para determinar a curva de resposta em frequência do sensor de detonação. Contudo, não foi possível realizá-lo pela indisponibilidade dos equipamentos necessários.

Figura 5-2 PSD do Ensaio_2_09 @3500 rpm filtrado em 2 kHz.

Dada a grande semelhança entre as diferentes repetições de cada ensaio, os gráficos individuais das PSD's de cada repetição dos Ensaios foram suprimidos do corpo deste texto. Esses gráficos estão disponíveis nos Apêndices C e I, respectivamente para os ensaios 1 e 2.

No intuito de permitir que se estabeleça uma comparação entre as diferentes repetições de cada ensaio, foram preparados os gráficos em 3 dimensões que podem ser vistos nas Figuras 5-3 e 5-4, respectivamente para os ensaios 1 e 2. Nesses gráficos o eixo Z representa a magnitudes, o eixo X as frequências em Hertz e o eixo Y as respectivas repetições de cada ensaio. O algoritmo em Matlab utilizado na confecção dos gráficos está disponível nos Apêndices B e H

Figura 5-3 Comparação entre as PSD's dos sinais abaixo de 1 kHz, das nove repetições do Ensaio_1.

Figura 5-4 Comparação entre as PSD's dos sinais abaixo de 1 kHz, das doze repetições do Ensaio 2.

5.1.2. Análise espectral na faixa de 2 kHz a 16 kHz.

A segunda análise espectral consistiu em aplicar um filtro passa banda também do tipo FIR, ordem 50, com frequências de corte em 2 kHz e 16 kHz, que é a faixa de resposta em frequência conhecida do sensor de detonação, em cada uma das repetições dos Ensaios 1 e 2. Desse sinal resultante realizou-se a estimação espectral conforme técnica descrita na subseção 2.3.6. O gráfico da Figura 5-5 ilustra a PSD no Ensaio_1 repetição 3 com o motor a 3500 rpm. Esse gráfico mostra que devido a larga faixa do espectro em estudo, o mesmo se torna poluído, sendo necessário aplicar filtros mais seletivos no intuito de isolar as frequências de interesse.

As demais PSD's individuais das repetições dos ensaios podem ser vistas nos Apêndices G e L respectivamente para os ensaios 1 e 2, e os respectivos algoritmos em Matlab podem ser vistos nos Apêndices F e K.

Figura 5-5 PSD do Ensaio_1 Repetição 3.

Optou-se então por aplicar a análise da energia das vibrações produzidas pelo bloco de motor na faixa de 2 kHz a 16 kHz, em todas as repetições dos ensaios 1 e 2. Esse cálculo foi realizado através da somatória dos pontos da PSD do sinal depois de filtrado, correspondendo este a área sob a envoltória entre 2 kHz e 16 kHz do gráfico da Figura 5-5. De posse da energia individual de cada repetição, esses dados foram levados

à um gráfico com a variação de energia versus a variação da mistura combustível na faixa de 2kHz a 16 kHz dos ensaios 1 e 2 pode ser visto nas Figuras 5-6 e 5-7 respectivamente.

Figura 5-6 Variação de energia na faixa de 2 kHz a 16 kHz nas três faixas de rotação do Ensaio_1.

Figura 5-7 Variação de energia na faixa de 2 kHz a 16 kHz nas três faixas de rotação do Ensaio_2.

Observando-se esses gráficos nota-se que energia em cada ensaio varia acompanhando variações na rotação e na mistura combustível, mas mantendo uma tendência de variação em cada motor. Comparando-se as tendências e amplitudes da energia nos dois motores é possível observar uma grande diferença. É importante destacar que apesar de similares, esses motores foram submetidos a diferentes misturas combustíveis, condições de carga mecânica e principalmente a forma de montagem (um motor sobre bancada metálica fixa no concreto e o outro sobre rodízios de borracha), fatores estes que influenciam em sua frequência de vibração. Como pode ser visto no subitem anterior que analisa o espectro dos sinais entre 0 e 2 kHz, o acoplamento mecânico é um dos fatores que provoca grande perturbação nas vibrações do motor.

5.1.3. Análise espectral nas frequências de ressonância.

Esta ultima análise foi realizada aplicando-se aos sinais de cada uma das repetições dos ensaios 1 e 2, cinco filtros FIR do tipo passabanda, ordem 50, centrados nas frequências determinadas na Tabela 4-5, com uma largura de banda de 500 Hz cada. Desse sinal resultante realizou-se a estimação espectral conforme técnica descrita na subseção 2.3.6. Estes sinais filtrados foram agrupados em gráficos de acordo com a frequência do filtro e nas três faixas de rotação a que foram submetidos os motores em teste, estes gráficos estão disponíveis nos Apêndices E e K. Os algoritmos em Matlab para esta análise estão disponíveis nos Apêndices D e J.

A análise nessa faixa de frequências não foi conclusiva, não sendo possível relacionar uma dada mistura combustível a um pico proeminente de frequência de ressonância. Optou-se então por realizar a análise da energia espectral no intervalo definido pelos filtros. A energia espectral total da vibração produzida pelo motor em funcionamento, nas cinco frequências definidas na Tabela 4-5 foi determinada através da somatória dos pontos da PSD, no intervalo da banda passante dos filtros (500 Hz).

Os gráficos com a variação de energia nos filtros 1, 3, 4 e 5 do Ensaio_1 e dos filtros 2, 3, 4 e 5 do Ensaio_2 podem ser vistos de maneira condensada nas Figura 5-8 e 5-9 respectivamente. Estes gráficos foram agrupados pelo fato de não apresentarem comportamentos coerentes para as diferentes faixas de rotação e mistura combustível de um mesmo motor, variando de maneira imprevisível.

Figura 5-8 Variação da energia vs. variação na mistura combustível nos filtros 1,3,4 e 5 do Ensaio_1.

Figura 5-9 Variação da energia vs. variação na mistura combustível nos filtros 2,3,4 e 5 do Ensaio_2.

Contudo, nos filtros 2 do Ensaio_1 e 1 do Ensaio_2, foi possível observar comportamentos de variação coerente. Essas variações embora novamente diferentes para os dois motores ensaiados, apresentou uma forte coerência entre as diversas rotações e mistura combustível em cada motor.

O gráfico da Figura 5-9 apresenta a variação de energia no filtro 2 do Ensaio_1 (12400 Hz), e o gráfico da Figura 5-10 a variação de energia no filtro 1 do Ensaio_2 (7500 Hz).

Figura 5-10 Variação da energia vs. variação na mistura combustível, em três faixas de rotação para o Ensaio_1, filtro 2.

Figura 5-11 Variação da energia vs. variação na mistura combustível, em três faixas de rotação para o Ensaio_2, filtro 1.

Cabe observar com relação ao gráfico da Figura 5-11 que o comportamento da quantidade de energia é coerente com a quantidade do poder calorífico da mistura conforme pode ser observado interpretando-se o gráfico da Figura 5-12.

Figura 5-12 Aumento da massa de combustível (%) x Porcentagem de AEHC ao gasohol. [DAL BEM (2003)]

Para o motor operando somente com álcool, para manter a mistura estequiométrica, o poder calorífico terá que ser superior ao poder calorífico do Gasohol (Curva Azul), porque a massa de combustível é maior do que a necessária para manter o poder calorífico da mistura constante. A medida que a proporção de gasohol aumenta o poder calorífico da mistura diminui atingindo o máximo próximo da região de 50 – 60% de álcool na mistura. De maneira semelhante o gráfico da Figura 5-11 apresenta uma queda na mesma região. Progredindo-se a diminuição de álcool na mistura a diferença no poder calorífico tende a diminuir, confirmando a tendência encontrada no gráfico da Figura 5-11.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho, inspirado nos estudos de WAGNER et al. (1999), comprova as observações de SAMAT et al. (2001) onde afirmam que o motor de um carro emite uma assinatura sonora única que pode ser utilizada para monitorar a condição do mesmo. O som de um motor é devido ao ciclo interno de combustão e ao mecanismo do motor.

A utilização das técnicas de análise espectral permitiu comprovar que o sensor de detonação piezelétrico não ressonante da NGK conserva as suas características de acelerômetro, mesmo fora das especificações de catálogo do seu fabricante, devendo apenas a sua curva de amplitude vs. frequência ser corrigida, o que não pôde ser realizado pela ausência de equipamentos para tal finalidade. O fato de conservar as suas características de acelerômetro abre novos campos de emprego para o sensor de detonação.

No que tange ao emprego desses sensores no monitoramento de outros fenômenos que não a detonação, pode-se afirmar que constituição mecânica, modo de montagem e acoplamentos, são fatores que provocam alterações significativas na assinatura espectral do sinal de vibração de um motor ciclo Otto. A variação da mistura combustível também contribui com sua parcela de variação no espectro de vibração do motor por modificar o poder calorífico da mesma.

Dando continuidade a esta linha de pesquisa, considera-se que esses estudos sejam relevantes como sugestão para trabalhos futuros:

- Determinação da resposta em frequência de sensores de detonação piezelétricos não ressonantes através de ensaios;

- Modelamento e simulação das ressonâncias de um processo normal de combustão e sua função transferência para o bloco do motor;
- Determinação empírica da assinatura espectral dos ruídos mecânicos produzidos por um motor de combustão ciclo Otto em rotação;
- Verificação da influencia do poder calorífico da mistura sobre a variação da energia da vibração no bloco do motor;
- Realização de ensaios dos motores utilizando-se acoplamento visco-elástico no eixo do motor com o dinamômetro diminuindo a contaminação dos sinais por vibração;
- Realização de ensaios em automóveis a fim de verificar os resultados observados no Ensaio_2;
- Determinação da figura de ruído de um motor ciclo Otto através da rotação do eixo motor com um motor elétrico.
- Verificar a influencia da relação ar/combustível na assinatura espectral do motor em funcionamento.

7. BIBLIOGRAFIA

7.1. Bibliografia Referenciada

BEHRENS, S. C. et al. (1999). *Improved knock detection by time variant filtered structure-borne sound*. IEEE Paper. Ruhr University Bochum, Department of Electrical Engineering, Bochum, Germany, 1999.

BEHRENS, S. C. et al. (2001). *Applying time-frequency methods to pressure and structure-borne sound for combustion diagnosis*. IEEE Paper. International Symposium on Signal Processing and its Applications (ISSPA). Kuala Lumpur, Malaysia, 13 - 16 August. 2001.

DAL BEM, A. J. (2003). *Um estudo da adaptabilidade dos sistemas eletrônicos de controle de malha fechada pelo sensor de oxigênio de motores ciclo Otto à gasolina ao receber álcool etílico hidratado como combustível alternativo*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

HÄRLE, N. et al. (1987). *Detection of knocking for spark ignition engines based on structural vibrations*. Ruhr University Bochum, Lehrstuhl für Signaltheorie, Bochum, Germany, 1987.

HEYWOOD, J. B. (1998). *Internal Combustion engines fundamentals*. McGraw-Hill.

HORNER, T. G. (1995). *Engine knock detection using spectral analysis techniques with a TMS320 DSP*. Texas Instruments Application Report SPRA039. U.S.A, 1995.

JÄRGENSTEDT, M. (2000). *Detecting start of combustion using knock sensor signals*. 35p. Dissertação (Mestrado) – Vehicular Systems, Dept. of Electrical Engineering, Linkopings Universitet. 2000.

MARTINS, A. R. S. (2001). *Caldeira e fornos In: Conservação de energia, Eficiência energética de instalações e equipamentos*. Editora da EFEI, 2ª. Edição, Cap. 9, Itajubá, 2001.

MILHOR, C. E. (2002). *Sistema de desenvolvimento para controle eletrônico dos motores de combustão interna ciclo Otto*. São Carlos. 72p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

NGK do Brasil Ltda. Manual Técnico de Produtos. São Paulo. 2004.

PUZINAUSKAS, P. V. (2002). *Examination of methods used to characterize engine knock*. SAE Technical Paper Series. Paper N°. 920808. Detroit, Michigan, 1992.

RIZZONI, G. et al. (1996). *Mechanical signature analysis using time-frequency signal processing: Application to internal combustion engine knock detection*. Proceedings of the IEEE, Vol. 84, No. 9, 1996.

RORABAUGH, C. B. (1993). *Digital filter designer's handbook: Featuring C routines*. McGraw-Hill Education, Europe, September 1993.

SAMAT, S. A. et al. (2001). *Engines condition monitoring based on spectrum analysis of sound signals*. International Symposium on Signal Processing and its Applications. Kuala Lumpur, Malaysia, 2001.

STERNIN, E. *Fluids, heat and light*. Physics Department, Brock University. Disponível em: < <http://www.physics.brocku.ca/courses/1p23/images/Otto.GIF>>. Acesso em: 23/05/2005.

TAYLOR (1976), C. F. *Análise dos motores de combustão interna*. [trad.] Mauro Ormeu Cardoso Amorelli, Imprensa São Paulo: Edgard Blucher, 1971-1976.

VASEGHI, S. V. (2000). *Advanced digital signal processing and noise reduction*. Segunda Edição. 472p. Editora John Willey & Sons Ltd. England. 2000.

WAGNER, M. et al. (1999). *In-Cylinder Pressure Estimation Using Structural Vibration Measurements of Spark Ignition Engines*. Signal Theory Division, Ruhr University Bochum.

WESTBROOK, C. K. (1992) *The chemistry behind engine knock*. Gale Group - Chemistry and Industry, 1992, n.15, p.562-565, Agosto 1992.

WESTBROOK (2006), C. K.; Pitz W. J. *Computer Modeling of engine knock chemistry*. Lawrence Livermore National Laboratory. Livermore, Califórnia. Disponível em: < http://www-cms.llnl.gov/s-t/int_combustion_eng.html >. Acesso em: 18/06/2006.

WOLBER, W. G. (1995). *Engine knock sensors in: Automotive electronics handbook*, McGraw-Hill. Cap. 8, 1995.

7.2. Bibliografia Consultada

BEAUCHAMP, K. G. et al. (1979). *Digital methods for signal analysis*. 316p. G. Allen and UnWin, Londres, 1979.

CHEN, C. (2001). *Digital signal processing*. Oxford University Press. New York. 2001.

CHEN, C. (2004). *Signals and systems*. Third Edition. Oxford University Press. New York. 2004.

FRUETT, F. *Sensores Integrados de Silício, Piezoeifeitos de Silício*. UNICAMP, p. 14

INTERSIL (1999). *Engine knock signal processor*. HIP9011 Datasheet. Irvine, USA, 1999.

LATHI, B. P. (2005). *Linear systems and signals. Second Edition*. Oxford University Press. New York. 2005.

MAGNETI-MARELLI; Weber, *Princípio de funcionamento e manutenção do sistema eletrônico de alimentação do motor “Single point injection”*.

MOLINARO, F. et al. (1992). *Knocking recognition in engine vibration signal using the wavelet transform*. IEEE Paper. Toulouse, France, 1992.

MORGAN ELETRO CERAMICS. (2005) *Technical Publication TP-238 – Piezoelectricity*. p. 8

SANCHES, A. G. (2002). *Identificação e quantificação do fenômeno de detonação em motores de combustão interna utilizando análise espectral*. 93p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2002.

SCHAUMANN, R. et. Al. (2001). *Design of Analog Filters*. Oxford University Press. New York. 2001.

SILVA, M. R. (1997). *Instrumentação micro processada para análise espectral em motores alternativos de Combustão Interna*. 107p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1997.

TEXAS INSTRUMENTS (2003). *Knock sensor interface*. TPIC8101 Datasheet. Dallas, Texas, 2003.

THOMAS, J. H. et al. (1997). *Engine knock detection from vibration signals using pattern recognition*. Meccanica 32, Kluwer Academic Publishers. Netherlands, 1997.

UNGAR, E. U. (2002). *Acoustics from A to Z*. In: *Sound and Vibration* 36 n. 1 Jan 2002.

BLAIR, G. P. (1998). *Design and simulation of four-stroke engines*. Editora: Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, USA, 1998.

ANEXO A

Tabela 7-1 Dados técnicos do motor AT1000

Itens	Motor “Álcool”	Motor “Gasolina”
Fabricante	Volkswagen do Brasil Ltda.	
Modelo	AT1000	
Combustível	Etanol	Gasohol
Sistema de gerenciamento	Motronic MP9.0	
Diâmetro dos cilindros	67,1 mm	67,1 mm
Curso do êmbolo	70,6 mm	70,6 mm
Cilindrada	999 cm ³	999 cm ³
Relação de Compressão	13,5:1	10,5:1
Potência máxima	45kW @ 5000 rpm	48kW @ 6000 rpm
Torque máximo	95 N.m @ 3500 rpm	89 N.m @ 4500 rpm
Fluxo dos gases	Fluxo cruzado	
Alimentação Injeção Pressão	Multiponto 3,0 +/- 0,2 bar	
Distribuidor Localização Acionamento	No cabeçote Comando de Válvulas	
Índice de CO na marcha Lenta	0,2 a 0,8 %	
Peso do motor com óleo	95,0 Kg	

APÊNDICE A

```

%-----
% Rotina para a determinação da resposta em frequência de sistemas de
% aquisição de dados.
% Breno Ortega Fernandez, Lins - SP
% Escrita para MATLAB 7 (Release 14)
%-----
%
% Calcula a média da placa Sound Blaster 16
y1 = zeros(1,30);
for n = 1:30
    [sinais, fs, bits] = wavread(strcat('c:\Placas\blaster16\p', int2str(n),
    '.wav'));
    media = mean(abs(sinais));
    % Calcula a média entre os canais L e R
    y1(n) = (media(1,1) + media(1,2)) / 2;
end
%
% Calcula a média da placa Creative Labs Live 24
y2 = zeros(1,30);
for n = 1:30
    [sinais, fs, bits] = wavread(strcat('c:\Placas\creative24\p', int2str(n),
    '.wav'));
    media = mean(abs(sinais));
    % Calcula a média entre os canais L e R
    y2(n) = (media(1,1) + media(1,2)) / 2;
end
%
% Calcula a média da placa Sound Max Cadenza 16
y3 = zeros(1,30);
for n = 1:30
    [sinais, fs, bits] = wavread(strcat('c:\Placas\cadenza16\p', int2str(n),
    '.wav'));
    media = mean(abs(sinais));
    % Calcula a média entre os canais L e R
    y3(n) = (media(1,1) + media(1,2)) / 2;
end
%
%
% Exibe as frequências no gráfico
x = zeros(30,1);
x(1,1) = 25;
x(2,1) = 31.5;
x(3,1) = 40;
x(5,1) = 50;
x(4,1) = 50;
x(5,1) = 63;
x(6,1) = 80;
x(7,1) = 100;
x(8,1) = 125;
x(9,1) = 160;
x(10,1) = 200;
x(11,1) = 250;
x(12,1) = 315;
x(13,1) = 400;
x(14,1) = 500;
x(15,1) = 630;
x(16,1) = 800;
x(17,1) = 1000;
x(18,1) = 1250;
x(19,1) = 1600;
x(20,1) = 2000;
x(21,1) = 2500;
x(22,1) = 3150;
x(23,1) = 4000;
x(24,1) = 5000;
x(25,1) = 6300;
x(26,1) = 8000;
x(27,1) = 10000;
x(28,1) = 12500;
x(29,1) = 16000;
x(30,1) = 20000;
semilogx(x,y1,'b',x,y2,'k',x,y3,'r')
grid on
% Linha Azul = Sound Blaster 16
% Linha Preto = Creative Labs Live
% Linha vermelha = Cadenza 16

```

APÊNDICE B

```

%-----
% Rotina para cálculo da PSD dos sinais do Ensaio_1 com filtro passa-baixa
% com frequência de corte em 2kHz
% Breno Ortega Fernandez, Lins-SP
% Escrita para MATLAB 7 (Release 14)
%-----
%
txt = ['Ensaio-1-01 @2500 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-1-02 @3000 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-1-03 @3500 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-1-04 @2500 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-1-05 @3000 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-1-06 @3500 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-1-07 @2500 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-1-08 @3000 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-1-09 @3500 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'];

Z = zeros(2913, 9);

%Filtro Passa-Banda FIR Window: Hamming, ordem 50, Fs = 44100, Fc = 1000
Fs = 44100;          % Frequencia de Amostragem
N = 50;              % Ordem
Fc = 2000;           % Frequencia de Corte
flag = 'noscale';    % Flag de Amostragem

%Cria o vetor "janela"
win = hamming(N+1);

%Calcula os coeficientes usando a função FIR1
b = fir1(N, Fc/(Fs/2), 'low', win, flag);
hd = dfilt.dfir(b);
filtro = get(hd, 'numerator')

%Especifica o número de pontos com que será calculada a FFT
sizfft = 65536;

%Especifica o número de ensaios a serem plotados
k = 9;

%Laço principal do programa
for n = 1:k

    %concatena as strings para a formação do nome do arquivo wav
    if n >= 10
        arquivo = strcat('E:\sanca\Ensaios\Ensaio_1_', int2str(n), '.wav');
    else
        arquivo = strcat('E:\sanca\Ensaios\Ensaio_1_0', int2str(n), '.wav');
    end

    %abre o arquivo wav
    [y, Fs, bits] = wavread(arquivo);
    %seleciona o canal de áudio adequado (L ou R)
    y = y(:, 1);

    %filtra o sinal usando o filtro indicado
    s = filter(filtro, 1, y);

    %calcula a FFT do sinal com o número de pontos definido anteriormente
    Y = fft(s, sizfft);
    %Calcula o valor quadrático da FFT
    Pyy = Y.*conj(Y) / sizfft;

    %Remove a parte "Espelhada" da PSD
    Z(:, n) = Pyy(60:2972); %32768);

    %monta a escala do eixo x
    f = 0: ((Fs / 2) / (sizfft/2)) : (Fs / 2);
    %cria uma nova figura
    figure;
    %plota
    plot(f, Pyy(1: (sizfft/2 + 1)), 'k')
    %Configura os eixos
    %axis([0, 1000, 0, 1]);
    xlim([0 2000])
    ylim('auto')
    titulo = ['PSD do ' txt(n,:)];
    title(titulo);
    xlabel('Frequência [Hz]');
    ylabel('Magnitude');

end;

%cria uma nova figura

```

```

figure;

%Monta o vetor das frequências X
Y = [(0: ((Fs / 2) / (sizefft/2)) : Fs/2)];
Y = Y(60:2972); %32768);
Y = Y';

%Monta o vetor Y
X = [1 2 3 4 5 6 7 8 9];

%Reordena o vetor Z
Z = [Z(:,1) Z(:,4) Z(:,7) Z(:,2) Z(:,5) Z(:,8) Z(:,3) Z(:,6) Z(:,9)];
Z=Z;
%Monta o vetor de cores
Z = Z';
C = Z;
C = C .* 0;

%Desenha o gráfico em waterfall
waterfall(Y,X,Z,C);
%Configura o mapa de cores
colormap copper;
%Configura o limite dos eixos
%set(gca, 'ZLim', [0 1]);
set(gca, 'XLim', [40 2000]);

%Configura o modo de linhas tracejadas (Ticks)
set(gca, 'XTickMode', 'manual');
set(gca, 'YTickMode', 'manual');
set(gca, 'YTick', [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9]);
set(gca, 'XTick', [50; 100; 200; 500; 1000; 1500; 2000]);

%Rótulo do eixo X
set(get(gca,'XLabel'), 'String','Frequência [Hz]');

%Rótulo do eixo Y
set(get(gca,'YLabel'), 'String','Ensaios');

%Rótulo do eixo Z
set(get(gca,'ZLabel'), 'String','Magnitude');

%Título do gráfico
title('Comparação das PSD's dos sinais abaixo de 2kHz para o motor a Gasolina');

%Configura os rótulos das PSD's do eixo Y
set(gca, 'YTickLabel', {'Ensai o_1_01'; 'Ensai o_1_04'; 'Ensai o_1_07'
                        'Ensai o_1_02'; 'Ensai o_1_05'; 'Ensai o_1_08'
                        'Ensai o_1_03'; 'Ensai o_1_06'; 'Ensai o_1_09'});

%Libera a memória
clear all;

```

APÊNDICE C

APÊNDICE D

```
%-----
% Rotina para cálculo da PSD dos sinais do Ensaio_1 com filtro passa-banda
% em 5 faixas de frequência
% Breno Ortega Fernandez, Lins-SP
% Escrita para MATLAB 7 (Release 14)
%-----
%
ordem = 100;      % Define a ordem dos filtros
ff1 = 7500;      % Frequência de corte do filtro 1
ff2 = 12400;     % Frequência de corte do filtro 2
ff3 = 15600;     % Frequência de corte do filtro 3
ff4 = 17100;     % Frequência de corte do filtro 4
ff5 = 21700;     % Frequência de corte do filtro 5
bw = 500;        % Largura de banda dos filtros
bg = 2000;       % Largura de banda dos gráficos
% Especifica o número de pontos com que será calculada a FFT
sizefft = 65536;
%-----
% Todas as frequências em Hz Hz.
Fs = 44100;      % Frequência de amostragem

N = ordem;      % Ordem do filtro
Fc1 = ff1 - (bw / 2); % Primeira frequência de corte
Fc2 = ff1 + (bw / 2); % Segunda frequência de corte
flag = 'noscale'; % Flag
% Cria o vetor janela
win = hamming(N+1);

% Calcula os coeficientes usando a função FIR1.
b = fir1(N, [Fc1 Fc2]/(Fs/2), 'bandpass', win, flag);
Hd = dfilt.dfir(b);
filtro1 = get(Hd, 'numerator');
%-----

%-----
% Todas as frequências em Hz Hz.
Fs = 44100;      % Frequência de amostragem

N = ordem;      % Ordem do filtro
Fc1 = ff2 - (bw / 2); % Primeira frequência de corte
Fc2 = ff2 + (bw / 2); % Segunda frequência de corte
flag = 'noscale'; % Flag
% Cria o vetor janela
win = hamming(N+1);

% Calcula os coeficientes usando a função FIR1.
b = fir1(N, [Fc1 Fc2]/(Fs/2), 'bandpass', win, flag);
Hd = dfilt.dfir(b);
filtro2 = get(Hd, 'numerator');
%-----

%-----
% Todas as frequências em Hz Hz.
Fs = 44100;      % Frequência de amostragem

N = ordem;      % Ordem do filtro
Fc1 = ff3 - (bw / 2); % Primeira frequência de corte
Fc2 = ff3 + (bw / 2); % Segunda frequência de corte
flag = 'noscale'; % Flag
% Cria o vetor janela
win = hamming(N+1);

% Calcula os coeficientes usando a função FIR1.
b = fir1(N, [Fc1 Fc2]/(Fs/2), 'bandpass', win, flag);
Hd = dfilt.dfir(b);
filtro3 = get(Hd, 'numerator');
%-----

%-----
% Todas as frequências em Hz Hz.
Fs = 44100;      % Frequência de amostragem

N = ordem;      % Ordem do filtro
Fc1 = ff4 - (bw / 2); % Primeira frequência de corte
Fc2 = ff4 + (bw / 2); % Segunda frequência de corte
flag = 'noscale'; % Flag
% Cria o vetor janela
win = hamming(N+1);

% Calcula os coeficientes usando a função FIR1.
b = fir1(N, [Fc1 Fc2]/(Fs/2), 'bandpass', win, flag);
Hd = dfilt.dfir(b);
```

```

filtro4 = get(Hd, 'numerator');
%-----

%-----
% Todas as frequências em Hz.
Fs = 44100; % Frequência de amostragem

N = ordem; % Ordem do filtro
Fc1 = ff5 - (bw / 2); % Primeira frequência de corte
Fc2 = ff5 + (bw / 2); % Segunda frequência de corte
flag = 'noscale'; % Flag
% Cria o vetor janela
win = hamming(N+1);

% Calcula os coeficientes usando a função FIR1.
b = fir1(N, [Fc1 Fc2]/(Fs/2), 'bandpass', win, flag);
Hd = dfilt.dfir(b);
filtro5 = get(Hd, 'numerator');
%-----

%Especifica o número de pontos com que será calculada a FFT
sizfft = 1024;

%abre o arquivo wav
[y1, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaios\Ensai o_1_01. wav');
y1 = y1(:, 1);
[y2, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaios\Ensai o_1_02. wav');
y2 = y2(:, 1);
[y3, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaios\Ensai o_1_03. wav');
y3 = y3(:, 1);
[y4, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaios\Ensai o_1_04. wav');
y4 = y4(:, 1);
[y5, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaios\Ensai o_1_05. wav');
y5 = y5(:, 1);
[y6, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaios\Ensai o_1_06. wav');
y6 = y6(:, 1);
[y7, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaios\Ensai o_1_07. wav');
y7 = y7(:, 1);
[y8, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaios\Ensai o_1_08. wav');
y8 = y8(:, 1);
[y9, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaios\Ensai o_1_09. wav');
y9 = y9(:, 1);

%filtra os sinais usando os filtros indicados
%Para os ensaios a 2500 rpm
z11 = filter(filtro1, 1, y1);
z14 = filter(filtro1, 1, y4);
z17 = filter(filtro1, 1, y7);
z21 = filter(filtro2, 1, y1);
z24 = filter(filtro2, 1, y4);
z27 = filter(filtro2, 1, y7);
z31 = filter(filtro3, 1, y1);
z34 = filter(filtro3, 1, y4);
z37 = filter(filtro3, 1, y7);
z41 = filter(filtro4, 1, y1);
z44 = filter(filtro4, 1, y4);
z47 = filter(filtro4, 1, y7);
z51 = filter(filtro5, 1, y1);
z54 = filter(filtro5, 1, y4);
z57 = filter(filtro5, 1, y7);

%libera memória do sistema
clear y1;
clear y4;
clear y7;

%Para os ensaios a 3000 rpm
z12 = filter(filtro1, 1, y2);
z15 = filter(filtro1, 1, y5);
z18 = filter(filtro1, 1, y8);
z22 = filter(filtro2, 1, y2);
z25 = filter(filtro2, 1, y5);
z28 = filter(filtro2, 1, y8);
z32 = filter(filtro3, 1, y2);
z35 = filter(filtro3, 1, y5);
z38 = filter(filtro3, 1, y8);
z42 = filter(filtro4, 1, y2);
z45 = filter(filtro4, 1, y5);
z48 = filter(filtro4, 1, y8);
z52 = filter(filtro5, 1, y2);
z55 = filter(filtro5, 1, y5);
z58 = filter(filtro5, 1, y8);

%libera memória do sistema
clear y2;
clear y5;
clear y8;

```

%Para os ensaios a 3500 rpm

```
z13 = filter(fil tro1, 1, y3);
z16 = filter(fil tro1, 1, y6);
z19 = filter(fil tro1, 1, y9);
z23 = filter(fil tro2, 1, y3);
z26 = filter(fil tro2, 1, y6);
z29 = filter(fil tro2, 1, y9);
z33 = filter(fil tro3, 1, y3);
z36 = filter(fil tro3, 1, y6);
z39 = filter(fil tro3, 1, y9);
z43 = filter(fil tro4, 1, y3);
z46 = filter(fil tro4, 1, y6);
z49 = filter(fil tro4, 1, y9);
z53 = filter(fil tro5, 1, y3);
z56 = filter(fil tro5, 1, y6);
z59 = filter(fil tro5, 1, y9);
```

%Libera memória do sistema

```
clear y3;
clear y6;
clear y9;
```

%calcula a FFT do sinal com o número de pontos definido anteriormente

%Para 2500 rpm

```
Y11 = fft(z11, sizefft);
Y14 = fft(z14, sizefft);
Y17 = fft(z17, sizefft);
Y21 = fft(z21, sizefft);
Y24 = fft(z24, sizefft);
Y27 = fft(z27, sizefft);
Y31 = fft(z31, sizefft);
Y34 = fft(z34, sizefft);
Y37 = fft(z37, sizefft);
Y41 = fft(z41, sizefft);
Y44 = fft(z44, sizefft);
Y47 = fft(z47, sizefft);
Y51 = fft(z51, sizefft);
Y54 = fft(z54, sizefft);
Y57 = fft(z57, sizefft);
```

%Libera memória do sistema

```
clear z11;
clear z14;
clear z17;
clear z21;
clear z24;
clear z27;
clear z31;
clear z34;
clear z37;
clear z41;
clear z44;
clear z47;
clear z51;
clear z54;
clear z57;
```

%Para 3000 rpm

```
Y12 = fft(z12, sizefft);
Y15 = fft(z15, sizefft);
Y18 = fft(z18, sizefft);
Y22 = fft(z22, sizefft);
Y25 = fft(z25, sizefft);
Y28 = fft(z28, sizefft);
Y32 = fft(z32, sizefft);
Y35 = fft(z35, sizefft);
Y38 = fft(z38, sizefft);
Y42 = fft(z42, sizefft);
Y45 = fft(z45, sizefft);
Y48 = fft(z48, sizefft);
Y52 = fft(z52, sizefft);
Y55 = fft(z55, sizefft);
Y58 = fft(z58, sizefft);
```

%Libera memória do sistema

```
clear z12;
clear z15;
clear z18;
clear z22;
clear z25;
clear z28;
clear z32;
clear z35;
clear z38;
```

```
clear z42;
clear z45;
clear z48;
clear z52;
clear z55;
clear z58;
```

```
%Para 3500 rpm
Y13 = fft(z13, si zefft);
Y16 = fft(z16, si zefft);
Y19 = fft(z19, si zefft);
Y23 = fft(z23, si zefft);
Y26 = fft(z26, si zefft);
Y29 = fft(z29, si zefft);
Y33 = fft(z33, si zefft);
Y36 = fft(z36, si zefft);
Y39 = fft(z39, si zefft);
Y43 = fft(z43, si zefft);
Y46 = fft(z46, si zefft);
Y49 = fft(z49, si zefft);
Y53 = fft(z53, si zefft);
Y56 = fft(z56, si zefft);
Y59 = fft(z59, si zefft);
```

```
%Libera memória do sistema
```

```
clear z13;
clear z16;
clear z19;
clear z23;
clear z26;
clear z29;
clear z33;
clear z36;
clear z39;
clear z43;
clear z46;
clear z49;
clear z53;
clear z56;
clear z59;
```

```
%-----
%Calcula o valor quadrático da FFT
%Para 2500 rpm
```

```
PY11 = Y11. * conj(Y11) / si zefft;
PY14 = Y14. * conj(Y14) / si zefft;
PY17 = Y17. * conj(Y17) / si zefft;
PY21 = Y21. * conj(Y21) / si zefft;
PY24 = Y24. * conj(Y24) / si zefft;
PY27 = Y27. * conj(Y27) / si zefft;
PY31 = Y31. * conj(Y31) / si zefft;
PY34 = Y34. * conj(Y34) / si zefft;
PY37 = Y37. * conj(Y37) / si zefft;
PY41 = Y41. * conj(Y41) / si zefft;
PY44 = Y44. * conj(Y44) / si zefft;
PY47 = Y47. * conj(Y47) / si zefft;
PY51 = Y51. * conj(Y51) / si zefft;
PY54 = Y54. * conj(Y54) / si zefft;
PY57 = Y57. * conj(Y57) / si zefft;
```

```
%Libera memória do sistema
```

```
clear Y11;
clear Y14;
clear Y17;
clear Y21;
clear Y24;
clear Y27;
clear Y31;
clear Y34;
clear Y37;
clear Y41;
clear Y44;
clear Y47;
clear Y51;
clear Y54;
clear Y57;
```

```
%Para 3000 rpm
PY12 = Y12. * conj(Y12) / si zefft;
PY15 = Y15. * conj(Y15) / si zefft;
PY18 = Y18. * conj(Y18) / si zefft;
PY22 = Y22. * conj(Y22) / si zefft;
PY25 = Y25. * conj(Y25) / si zefft;
PY28 = Y28. * conj(Y28) / si zefft;
PY32 = Y32. * conj(Y32) / si zefft;
PY35 = Y35. * conj(Y35) / si zefft;
```

```

PY38 = Y38.* conj (Y38) / si zefft;
PY42 = Y42.* conj (Y42) / si zefft;
PY45 = Y45.* conj (Y45) / si zefft;
PY48 = Y48.* conj (Y48) / si zefft;
PY52 = Y52.* conj (Y52) / si zefft;
PY55 = Y55.* conj (Y55) / si zefft;
PY58 = Y58.* conj (Y58) / si zefft;

%libera memória do sistema
clear Y12;
clear Y15;
clear Y18;
clear Y22;
clear Y25;
clear Y28;
clear Y32;
clear Y35;
clear Y38;
clear Y42;
clear Y45;
clear Y48;
clear Y52;
clear Y55;
clear Y58;

%Para 3500 rpm
PY13 = Y13.* conj (Y13) / si zefft;
PY16 = Y16.* conj (Y16) / si zefft;
PY19 = Y19.* conj (Y19) / si zefft;
PY23 = Y23.* conj (Y23) / si zefft;
PY26 = Y26.* conj (Y26) / si zefft;
PY29 = Y29.* conj (Y29) / si zefft;
PY33 = Y33.* conj (Y33) / si zefft;
PY36 = Y36.* conj (Y36) / si zefft;
PY39 = Y39.* conj (Y39) / si zefft;
PY43 = Y43.* conj (Y43) / si zefft;
PY46 = Y46.* conj (Y46) / si zefft;
PY49 = Y49.* conj (Y49) / si zefft;
PY53 = Y53.* conj (Y53) / si zefft;
PY56 = Y56.* conj (Y56) / si zefft;
PY59 = Y59.* conj (Y59) / si zefft;

%libera memória do sistema
clear Y13;
clear Y16;
clear Y19;
clear Y23;
clear Y26;
clear Y29;
clear Y33;
clear Y36;
clear Y39;
clear Y43;
clear Y46;
clear Y49;
clear Y53;
clear Y56;
clear Y59;

%-----

%monta a escala de frequencias no eixo x
f = 0: ((Fs / 2) / (si zefft/2)) : (Fs / 2);

%-----

%----- Gráficos do Filtro 1 -----
%----- 7500 Hz -----

%-----Para 2500 RPM - Filtro 1
%cria uma nova figura
figure;
%plota
plot(f, PY11(1: (si zefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY14(1: (si zefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY17(1: (si zefft/2 + 1)), 'r');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([ (ff1 - (bg / 2)) (ff1 + (bg / 2))]);
title('@2500 rpm - Fc = 7500 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Magnitude');
legend('Ensaio-1-01', 'Ensaio-1-04', 'Ensaio-1-07');

%-----Para 3000 RPM - Filtro 1
%cria uma nova figura

```

```

figure;
%plota
plot(f, PY12(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY15(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY18(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff1 - (bg / 2)) (ff1 + (bg / 2))]);
title('@3000 rpm - Fc = 7500 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Magnitude');
legend('Ensaio-1-02', 'Ensaio-1-05', 'Ensaio-1-08');

%-----Para 3500 RPM - Filtro 1
%cria uma nova figura
figure;
%plota
plot(f, PY13(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY16(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY19(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff1 - (bg / 2)) (ff1 + (bg / 2))]);
title('@3500 rpm - Fc = 7500 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Magnitude');
legend('Ensaio-1-03', 'Ensaio-1-06', 'Ensaio-1-09');

%----- Gráficos do Filtro 2 -----
%----- 12400 Hz -----
%cria uma nova figura
%Para 2500 RPM - Filtro 2
figure;
%plota
plot(f, PY21(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY24(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY27(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff2 - (bg / 2)) (ff2 + (bg / 2))]);
title('@2500 rpm - Fc = 12400 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Magnitude');
legend('Ensaio-1-01', 'Ensaio-1-04', 'Ensaio-1-07');

%cria uma nova figura
%Para 3000 RPM - Filtro 2
figure;
%plota
plot(f, PY22(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY25(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY28(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff2 - (bg / 2)) (ff2 + (bg / 2))]);
title('@3000 rpm - Fc = 12400 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Magnitude');
legend('Ensaio-1-02', 'Ensaio-1-05', 'Ensaio-1-08');

%cria uma nova figura
%Para 3500 RPM - Filtro 2
figure;
%plota
plot(f, PY23(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY26(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY29(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff2 - (bg / 2)) (ff2 + (bg / 2))]);
title('@3500 rpm - Fc = 12400 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Magnitude');
legend('Ensaio-1-03', 'Ensaio-1-06', 'Ensaio-1-09');

%----- Gráficos do Filtro 3 -----
%----- 15600 Hz -----
%cria uma nova figura
%Para 2500 RPM - Filtro 3
figure;
%plota

```

```

plot(f, PY31(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY34(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY37(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff3 - (bg / 2)) (ff3 + (bg / 2))]);
title('@2500 rpm - Fc = 15600 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Magnitude');
legend('Ensaio-1-01', 'Ensaio-1-04', 'Ensaio-1-07');

```

```

%cria uma nova figura
%Para 3000 RPM - Filtro 3
figure;
%plota
plot(f, PY32(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY35(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY38(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff3 - (bg / 2)) (ff3 + (bg / 2))]);
title('@3000 rpm - Fc = 15600 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Magnitude');
legend('Ensaio-1-02', 'Ensaio-1-05', 'Ensaio-1-08');

```

```

%cria uma nova figura
%Para 3500 RPM - Filtro 3
figure;
%plota
plot(f, PY33(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY36(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY39(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff3 - (bg / 2)) (ff3 + (bg / 2))]);
title('@3500 rpm - Fc = 15600 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Magnitude');
legend('Ensaio-1-03', 'Ensaio-1-06', 'Ensaio-1-09');

```

```

%----- Gráficos do Filtro 4 -----
%----- 17100 Hz -----

```

```

%cria uma nova figura
%Para 2500 RPM - Filtro 4
figure;
%plota
plot(f, PY41(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY44(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY47(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff4 - (bg / 2)) (ff4 + (bg / 2))]);
title('@2500 rpm - Fc = 17100 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Magnitude');
legend('Ensaio-1-01', 'Ensaio-1-04', 'Ensaio-1-07');

```

```

%cria uma nova figura
%Para 3000 RPM - Filtro 4
figure;
%plota
plot(f, PY42(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY45(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY48(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff4 - (bg / 2)) (ff4 + (bg / 2))]);
title('@3000 rpm - Fc = 17100 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Magnitude');
legend('Ensaio-1-02', 'Ensaio-1-05', 'Ensaio-1-08');

```

```

%cria uma nova figura
%Para 3500 RPM - Filtro 4
figure;
%plota
plot(f, PY43(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY46(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');

```

```

plot(f, PY49(1: (sizefft/2 + 1)), 'r');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([ (ff4 - (bg / 2)) (ff4 + (bg / 2))]);
title('@3500 rpm - Fc = 17100 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Magnitude');
legend('Ensaio-1-03', 'Ensaio-1-06', 'Ensaio-1-09');

%----- Gráficos do Filtro 5 -----
%----- 21700 Hz -----
%cria uma nova figura
%Para 2500 RPM - Filtro 5
figure;
%plota
plot(f, PY51(1: (sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY54(1: (sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY57(1: (sizefft/2 + 1)), 'r');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([ (ff5 - (bg / 2)) (ff5 + (bg / 2))]);
title('@2500 rpm - Fc = 21700 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Magnitude');
legend('Ensaio-1-01', 'Ensaio-1-04', 'Ensaio-1-07');

%cria uma nova figura
%Para 3000 RPM - Filtro 5
figure;
%plota
plot(f, PY52(1: (sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY55(1: (sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY58(1: (sizefft/2 + 1)), 'r');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([ (ff5 - (bg / 2)) (ff5 + (bg / 2))]);
title('@3000 rpm - Fc = 21700 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Magnitude');
legend('Ensaio-1-02', 'Ensaio-1-05', 'Ensaio-1-08');

%cria uma nova figura
%Para 3500 RPM - Filtro 5
figure;
%plota
plot(f, PY53(1: (sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY56(1: (sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY59(1: (sizefft/2 + 1)), 'r');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([ (ff5 - (bg / 2)) (ff5 + (bg / 2))]);
title('@3500 rpm - Fc = 21700 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Magnitude');
legend('Ensaio-1-03', 'Ensaio-1-06', 'Ensaio-1-09');

%Para 2500 rpm
E1F1 = sum(PY11);
E4F1 = sum(PY14);
E7F1 = sum(PY17);
E1F2 = sum(PY21);
E4F2 = sum(PY24);
E7F2 = sum(PY27);
E1F3 = sum(PY31);
E4F3 = sum(PY34);
E7F3 = sum(PY37);
E1F4 = sum(PY41);
E4F4 = sum(PY44);
E7F4 = sum(PY47);
E1F5 = sum(PY51);
E4F5 = sum(PY54);
E7F5 = sum(PY57);

%Para 3000 rpm
E2F1 = sum(PY12);
E5F1 = sum(PY15);
E8F1 = sum(PY18);
E2F2 = sum(PY22);
E5F2 = sum(PY25);
E8F2 = sum(PY28);
E2F3 = sum(PY32);
E5F3 = sum(PY35);
E8F3 = sum(PY38);

```



```

E2F4 = sum(PY42);
E5F4 = sum(PY45);
E8F4 = sum(PY48);
E2F5 = sum(PY52);
E5F5 = sum(PY55);
E8F5 = sum(PY58);

%Para 3500 rpm
E3F1 = sum(PY13);
E6F1 = sum(PY16);
E9F1 = sum(PY19);
E3F2 = sum(PY23);
E6F2 = sum(PY26);
E9F2 = sum(PY29);
E3F3 = sum(PY33);
E6F3 = sum(PY36);
E9F3 = sum(PY39);
E3F4 = sum(PY43);
E6F4 = sum(PY46);
E9F4 = sum(PY49);
E3F5 = sum(PY53);
E6F5 = sum(PY56);
E9F5 = sum(PY59);

%-----
figure;
pa = [58.33 62.5 100];
ec = [E7F1 E4F1 E1F1];
plot(pa,ec, '-.sk');
hold on;
ec = [E8F1 E5F1 E2F1];
plot(pa,ec, '-.ok');
ec = [E9F1 E6F1 E3F1];
plot(pa,ec, '-.dk');
title('Energia vs. variação do combustível - Ensaio-1 - Filtro-1');
xlabel('Percentual de álcool na mistura [%]');
ylabel('Magnitude');
legend('2500 rpm','3000 rpm','3500 rpm');
%-----

%-----
figure;
pa = [58.33 62.5 100];
ec = [E7F2 E4F2 E1F2];
plot(pa,ec, '-.sk');
hold on;
ec = [E8F2 E5F2 E2F2];
plot(pa,ec, '-.ok');
ec = [E9F2 E6F2 E3F2];
plot(pa,ec, '-.dk');
title('Energia vs. variação do combustível - Ensaio-1 - Filtro-2');
xlabel('Percentual de álcool na mistura [%]');
ylabel('Magnitude');
legend('2500 rpm','3000 rpm','3500 rpm');
%-----

%-----
figure;
pa = [58.33 62.5 100];
ec = [E7F3 E4F3 E1F3];
plot(pa,ec, '-.sk');
hold on;
ec = [E8F3 E5F3 E2F3];
plot(pa,ec, '-.ok');
ec = [E9F3 E6F3 E3F3];
plot(pa,ec, '-.dk');
title('Energia vs. variação do combustível - Ensaio-1 - Filtro-3');
xlabel('Percentual de álcool na mistura [%]');
ylabel('Magnitude');
legend('2500 rpm','3000 rpm','3500 rpm');
%-----

%-----
figure;
pa = [58.33 62.5 100];
ec = [E7F4 E4F4 E1F4];
plot(pa,ec, '-.sk');
hold on;
ec = [E8F4 E5F4 E2F4];
plot(pa,ec, '-.ok');
ec = [E9F4 E6F4 E3F4];
plot(pa,ec, '-.sk');
title('Energia vs. variação do combustível - Ensaio-1 - Filtro-4');
xlabel('Percentual de álcool na mistura [%]');
ylabel('Magnitude');
legend('2500 rpm','3000 rpm','3500 rpm');
%-----

```

```

%-----
figure;
pa = [58.33 62.5 100];
ec = [E7F5 E4F5 E1F5];
plot(pa, ec, '--sk');
hold on;
ec = [E8F5 E5F5 E2F5];
plot(pa, ec, '--ok');
ec = [E9F5 E6F5 E3F5];
plot(pa, ec, '--sk');
title('Energia vs. variação do combustível - Ensaio-1 - Filtro-5');
xlabel('Porcentagem de álcool na mistura [%]');
ylabel('Magnitude');
legend('2500 rpm', '3000 rpm', '3500 rpm');
%-----
clear all;

```

APÊNDICE E

APÊNDICE F

```

%-----
% Rotina para cálculo da PSD dos sinais do Ensaio_1 após filtro passa-banda
% com frequências de corte em 2kHz e 16kHz
% Breno Ortega Fernandez, Lins-SP
% Escrita para MATLAB 7 (Release 14)
%-----
%
txt = ['Ensaio-1-01 @2500 RPM com filtro passa-banda em 2-16kHz'
      'Ensaio-1-02 @3000 RPM com filtro passa-banda em 2-16kHz'
      'Ensaio-1-03 @3500 RPM com filtro passa-banda em 2-16kHz'
      'Ensaio-1-04 @2500 RPM com filtro passa-banda em 2-16kHz'
      'Ensaio-1-05 @3000 RPM com filtro passa-banda em 2-16kHz'
      'Ensaio-1-06 @3500 RPM com filtro passa-banda em 2-16kHz'
      'Ensaio-1-07 @2500 RPM com filtro passa-banda em 2-16kHz'
      'Ensaio-1-08 @3000 RPM com filtro passa-banda em 2-16kHz'
      'Ensaio-1-09 @3500 RPM com filtro passa-banda em 2-16kHz'];
Z = zeros(32768, 9);
sizefft = 65536;
k = 9;
e = [0 0 0 0 0 0 0 0 0];
Fs = 44100;
N = 50;
Fc1 = 2000;
Fc2 = 16000;
flag = 'noscale';
% Cria o vetor janela
win = hamming(N+1);
% Calcula os coeficientes usando a função FIR1.
b = fir1(N, [Fc1 Fc2]/(Fs/2), 'bandpass', win, flag);
Hd = dfilt.dfir(b);
filtro = get(Hd, 'numerator');
% Laço principal do programa
for n = 1:k
    %concatena as strings para a formação do nome do arquivo wav
    if n >= 10
        arquivo = strcat('E:\sanca\Ensaios\Ensaio_1_', int2str(n), '.wav');
    else
        arquivo = strcat('E:\sanca\Ensaios\Ensaio_1_0_', int2str(n), '.wav');
    end
    %abre o arquivo wav
    [y, Fs, bits] = wavread(arquivo);
    %seleciona o canal de áudio adequado (L ou R)
    y = y(:, 1);
    %filtra o sinal usando o filtro indicado
    z = filter(filtro, 1, y);
    %calcula a FFT do sinal com o número de pontos definido anteriormente
    Y = fft(z, sizefft);
    %Calcula o valor quadrático da FFT
    Pyy = Y.*conj(Y)/sizefft;
    %Calcula a energia do espectro
    e(n) = sum(Pyy);
    %Remove a parte "Espelhada" da PSD
    Z(:, n) = Pyy(1:32768); %32768);
    %monta a escala do eixo x
    f = 0:((Fs/2)/(sizefft/2)):(Fs/2);
    %cria uma nova figura
    figure;
    %plota
    plot(f, Pyy(1:(sizefft/2+1)), 'k')
    %Configura os eixos
    axis([2000, 16000, 0, 0.35]);
    titulo = ['PSD do ' txt(n, :)];
    title(titulo);
    xlabel('Frequência [Hz]');
    ylabel('Magnitude');
end;
% Plota o gráfico da energia espectral dos ensaios
figure;
pa = [58.33 62.5 100];
ec = [e(7) e(4) e(1)];
plot(pa, ec, '-.sk');
hold on;
ec = [e(8) e(5) e(2)];
plot(pa, ec, '-.ok');
ec = [e(9) e(6) e(3)];
plot(pa, ec, '-.dk');
title('Variação da energia vs. variação do combustível na faixa de 2 a 16 kHz');
xlabel('Percentual de álcool na mistura [%]');
ylabel('Magnitude');
legend('@2500 rpm', '@3000 rpm', '@3500 rpm');
%Libera a memória
clear all;

```

APÊNDICE G

APÊNDICE H

```

%-----
% Rotina para cálculo da PSD dos sinais do Ensaio_2 com filtro passa-baixa
% com frequência de corte em 2kHz
% Breno Ortega Fernandez, Lins-SP
% Escrita para MATLAB 7 (Release 14)
%-----
%
txt = ['Ensaio-2-01 @2500 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-2-02 @3000 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-2-03 @3500 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-2-04 @2500 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-2-05 @3000 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-2-06 @3500 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-2-07 @2500 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-2-08 @3000 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-2-09 @3500 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-2-10 @2500 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-2-11 @3000 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz'
      'Ensaio-2-12 @3500 RPM com filtro passa-baixa em 2kHz' ];

Z = zeros(2913, 12);

%Filtro Passa-Banda FIR Window: Hamming, ordem 50, Fs = 44100, Fc = 1000
Fs = 44100;          % Frequência de Amostragem
N = 50;              % Ordem
Fc = 2000;           % Frequência de Corte
flag = 'noscale';    % Flag de Amostragem

%Cria o vetor "Janela"
win = hamming(N+1);

%Calcula os coeficientes usando a função FIR1
b = fir1(N, Fc/(Fs/2), 'low', win, flag);
hd = dfilt.dfir(b);
filtro = get(hd, 'numerator');

%Especifica o número de pontos com que será calculada a FFT
sizefft = 65536;

%Especifica o número de ensaios a serem plotados
k = 12;

%Laço principal do programa
for n = 1:k

    %concatena as strings para a formação do nome do arquivo wav
    if n >= 10
        arquivo = strcat('E:\sanca\Ensaios\Ensaio_2_', int2str(n), '.wav');
    else
        arquivo = strcat('E:\sanca\Ensaios\Ensaio_2_0', int2str(n), '.wav');
    end

    %abre o arquivo wav
    [y, Fs, bits] = wavread(arquivo);
    %seleciona o canal de áudio adequado (L ou R)
    y = y(:, 1);

    %filtra o sinal usando o filtro indicado
    z = filter(filtro, 1, y);

    %calcula a FFT do sinal com o número de pontos definido anteriormente
    Y = fft(z, sizefft);
    %Calcula o valor quadrático da FFT
    Pyy = Y.*conj(Y)/sizefft;

    %Remove a parte "Espelhada" da PSD
    Z(:, n) = Pyy(60:2972); %32768);

    %monta a escala do eixo x
    f = 0: ((Fs/2)/(sizefft/2)): (Fs/2);
    %cria uma nova figura
    figure;
    %plota
    plot(f, Pyy(1:(sizefft/2+1)), 'k');
    %Configura os eixos
    %axis([0, 1000, 0, 0]);
    xlim([0 2000]);
    ylim('auto');
    titulo = ['PSD do ' txt(n,:)];
    title(titulo);
    xlabel('Frequência [Hz]');
    ylabel('Magnitude');

```

```

end;

%cria uma nova figura
figure;

%Monta o vetor das frequências X
Y = [(0: ((Fs / 2) / (sizefft/2)) : Fs/2)];
Y = Y(60:2972); %32768);
Y = Y';

%Monta o vetor Y
X = [1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12];

%Reordena o vetor Z
z = [Z(:,4) Z(:,5) Z(:,6) Z(:,7) Z(:,8) Z(:,9) Z(:,10) Z(:,11) Z(:,12) Z(:,1)
Z(:,2) Z(:,3)];
Z=z;
%Monta o vetor de cores
Z = Z';
C = Z;
C = C .* 0;

%Desenha o gráfico em waterfall
waterfall(Y,X,Z,C);
%Configura o mapa de cores
colormap copper;
%Configura o limite dos eixos
set(gca, 'ZLim', [0 1]);
set(gca, 'XLim', [40 2000]);

%Configura o modo de linhas tracejadas (Ticks)
set(gca, 'XTickMode', 'manual');
set(gca, 'YTickMode', 'manual');
set(gca, 'YTick', [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12]);
set(gca, 'XTick', [50; 100; 200; 500; 1000; 1500; 2000]);

%Rótulo do eixo X
set(get(gca, 'XLabel'), 'String', 'Frequência [Hz]');

%Rótulo do eixo Y
set(get(gca, 'YLabel'), 'String', 'Ensaios');

%Rótulo do eixo Z
set(get(gca, 'ZLabel'), 'String', 'Magnitude');

%Título do gráfico
title('Comparação das PSD's dos sinais abaixo de 2kHz para o motor a Água');

%Configura os rótulos das PSD's do eixo Y
set(gca, 'YTickLabel', {'Ensai o_2_04'; 'Ensai o_2_05'; 'Ensai o_2_06'
'Ensai o_2_07'; 'Ensai o_2_08'; 'Ensai o_2_09'
'Ensai o_2_10'; 'Ensai o_2_11'; 'Ensai o_2_12'
'Ensai o_2_01'; 'Ensai o_2_02'; 'Ensai o_2_03'});

%Libera a memória
clear all;

```

APÊNDICE I

APÊNDICE J

```

%-----
% Rotina para cálculo da PSD dos sinais do Ensaio_2 com filtro passa-banda
% com 5 filtros
% Breno Ortega Fernandez, Lins-SP
% Escrita para MATLAB 7 (Release 14)
%-----
%
ordem = 100;      % Define a ordem dos filtros
ff1 = 7500;       % Frequência de corte do filtro 1
ff2 = 12400;      % Frequência de corte do filtro 2
ff3 = 15600;      % Frequência de corte do filtro 3
ff4 = 17100;      % Frequência de corte do filtro 4
ff5 = 21700;      % Frequência de corte do filtro 5
bw = 500;         % Largura de banda dos filtros
bg = 2000;        % Largura de banda dos gráficos
% Especifica o número de pontos com que será calculada a FFT
sizefft = 65536;

%
%-----
% Todas as frequências em Hz Hz.
Fs = 44100; % Frequência de amostragem

N = ordem;      % Ordem do filtro
Fc1 = ff1 - (bw / 2); % Primeira frequência de corte
Fc2 = ff1 + (bw / 2); % Segunda frequência de corte
flag = 'noscale'; % Flag
% Cria o vetor janela
win = hamming(N+1);

% Calcula os coeficientes usando a função FIR1.
b = fir1(N, [Fc1 Fc2]/(Fs/2), 'bandpass', win, flag);
Hd = dfilt.dfir(b);
filtro1 = get(Hd, 'numerator');
%-----

%-----
% Todas as frequências em Hz Hz.
Fs = 44100; % Frequência de amostragem

N = ordem;      % Ordem do filtro
Fc1 = ff2 - (bw / 2); % Primeira frequência de corte
Fc2 = ff2 + (bw / 2); % Segunda frequência de corte
flag = 'noscale'; % Flag
% Cria o vetor janela
win = hamming(N+1);

% Calcula os coeficientes usando a função FIR1.
b = fir1(N, [Fc1 Fc2]/(Fs/2), 'bandpass', win, flag);
Hd = dfilt.dfir(b);
filtro2 = get(Hd, 'numerator');
%-----

%-----
% Todas as frequências em Hz Hz.
Fs = 44100; % Frequência de amostragem

N = ordem;      % Ordem do filtro
Fc1 = ff3 - (bw / 2); % Primeira frequência de corte
Fc2 = ff3 + (bw / 2); % Segunda frequência de corte
flag = 'noscale'; % Flag
% Cria o vetor janela
win = hamming(N+1);

% Calcula os coeficientes usando a função FIR1.
b = fir1(N, [Fc1 Fc2]/(Fs/2), 'bandpass', win, flag);
Hd = dfilt.dfir(b);
filtro3 = get(Hd, 'numerator');
%-----

%-----
% Todas as frequências em Hz Hz.
Fs = 44100; % Frequência de amostragem

N = ordem;      % Ordem do filtro
Fc1 = ff4 - (bw / 2); % Primeira frequência de corte
Fc2 = ff4 + (bw / 2); % Segunda frequência de corte
flag = 'noscale'; % Flag
% Cria o vetor janela
win = hamming(N+1);

```

```

% Calcula os coeficientes usando a função FIR1.
b = fir1(N, [Fc1 Fc2]/(Fs/2), 'bandpass', win, flag);
Hd = dfilt.dfir(b);
filtro4 = get(Hd, 'numerator');
%-----

%-----
% Todas as frequências em Hz.
Fs = 44100; % Frequência de amostragem

N = ordem; % Ordem do filtro
Fc1 = ff5 - (bw / 2); % Primeira frequência de corte
Fc2 = ff5 + (bw / 2); % Segunda frequência de corte
flag = 'noscale'; % Flag
% Cria o vetor janela
win = hamming(N+1);

% Calcula os coeficientes usando a função FIR1.
b = fir1(N, [Fc1 Fc2]/(Fs/2), 'bandpass', win, flag);
Hd = dfilt.dfir(b);
filtro5 = get(Hd, 'numerator');
%-----

%Especifica o número de pontos com que será calculada a FFT
sizfft = 1024;

%abre o arquivo wav
[y1, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaio\Ensaio_2_01.wav');
y1 = y1(:, 1);
[y2, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaio\Ensaio_2_02.wav');
y2 = y2(:, 1);
[y3, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaio\Ensaio_2_03.wav');
y3 = y3(:, 1);
[y4, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaio\Ensaio_2_04.wav');
y4 = y4(:, 1);
[y5, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaio\Ensaio_2_05.wav');
y5 = y5(:, 1);
[y6, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaio\Ensaio_2_06.wav');
y6 = y6(:, 1);
[y7, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaio\Ensaio_2_07.wav');
y7 = y7(:, 1);
[y8, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaio\Ensaio_2_08.wav');
y8 = y8(:, 1);
[y9, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaio\Ensaio_2_09.wav');
y9 = y9(:, 1);
[y10, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaio\Ensaio_2_10.wav');
y10 = y10(:, 1);
[y11, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaio\Ensaio_2_11.wav');
y11 = y11(:, 1);
[y12, Fs, bits] = wavread('E:\sanca\Ensaio\Ensaio_2_12.wav');
y12 = y12(:, 1);

%filtra os sinais usando os filtros indicados
%Para os ensaios a 2500 rpm
z11 = filter(filtro1, 1, y1);
z14 = filter(filtro1, 1, y4);
z17 = filter(filtro1, 1, y7);
z110 = filter(filtro1, 1, y10);

z21 = filter(filtro2, 1, y1);
z24 = filter(filtro2, 1, y4);
z27 = filter(filtro2, 1, y7);
z210 = filter(filtro2, 1, y10);

z31 = filter(filtro3, 1, y1);
z34 = filter(filtro3, 1, y4);
z37 = filter(filtro3, 1, y7);
z310 = filter(filtro3, 1, y10);

z41 = filter(filtro4, 1, y1);
z44 = filter(filtro4, 1, y4);
z47 = filter(filtro4, 1, y7);
z410 = filter(filtro4, 1, y10);

z51 = filter(filtro5, 1, y1);
z54 = filter(filtro5, 1, y4);
z57 = filter(filtro5, 1, y7);
z510 = filter(filtro5, 1, y10);

%libera memória do sistema
clear y1;
clear y4;
clear y7;
clear y10;

%Para os ensaios a 3000 rpm
z12 = filter(filtro1, 1, y2);

```

```

z15 = filter(fil tro1, 1, y5);
z18 = filter(fil tro1, 1, y8);
z111 = filter(fil tro1, 1, y11);

z22 = filter(fil tro2, 1, y2);
z25 = filter(fil tro2, 1, y5);
z28 = filter(fil tro2, 1, y8);
z211 = filter(fil tro2, 1, y11);

z32 = filter(fil tro3, 1, y2);
z35 = filter(fil tro3, 1, y5);
z38 = filter(fil tro3, 1, y8);
z311 = filter(fil tro3, 1, y11);

z42 = filter(fil tro4, 1, y2);
z45 = filter(fil tro4, 1, y5);
z48 = filter(fil tro4, 1, y8);
z411 = filter(fil tro4, 1, y11);

z52 = filter(fil tro5, 1, y2);
z55 = filter(fil tro5, 1, y5);
z58 = filter(fil tro5, 1, y8);
z511 = filter(fil tro5, 1, y11);

%libera memória do sistema
clear y2;
clear y5;
clear y8;
clear y11;

%Para os ensaios a 3500 rpm

z13 = filter(fil tro1, 1, y3);
z16 = filter(fil tro1, 1, y6);
z19 = filter(fil tro1, 1, y9);
z112 = filter(fil tro1, 1, y12);

z23 = filter(fil tro2, 1, y3);
z26 = filter(fil tro2, 1, y6);
z29 = filter(fil tro2, 1, y9);
z212 = filter(fil tro2, 1, y12);

z33 = filter(fil tro3, 1, y3);
z36 = filter(fil tro3, 1, y6);
z39 = filter(fil tro3, 1, y9);
z312 = filter(fil tro3, 1, y12);

z43 = filter(fil tro4, 1, y3);
z46 = filter(fil tro4, 1, y6);
z49 = filter(fil tro4, 1, y9);
z412 = filter(fil tro4, 1, y12);

z53 = filter(fil tro5, 1, y3);
z56 = filter(fil tro5, 1, y6);
z59 = filter(fil tro5, 1, y9);
z512 = filter(fil tro5, 1, y12);

%libera memória do sistema
clear y3;
clear y6;
clear y9;
clear y12;

%calcula a FFT do sinal com o número de pontos definido anteriormente

%Para 2500 rpm
Y11 = fft(z11, si zefft);
Y14 = fft(z14, si zefft);
Y17 = fft(z17, si zefft);
Y110 = fft(z110, si zefft);

Y21 = fft(z21, si zefft);
Y24 = fft(z24, si zefft);
Y27 = fft(z27, si zefft);
Y210 = fft(z210, si zefft);

Y31 = fft(z31, si zefft);
Y34 = fft(z34, si zefft);
Y37 = fft(z37, si zefft);
Y310 = fft(z310, si zefft);

Y41 = fft(z41, si zefft);
Y44 = fft(z44, si zefft);
Y47 = fft(z47, si zefft);
Y410 = fft(z410, si zefft);

Y51 = fft(z51, si zefft);

```

```

Y54 = fft(z54, si zefft);
Y57 = fft(z57, si zefft);
Y510 = fft(z510, si zefft);

```

```

%libera memória do sistema
clear z11;
clear z14;
clear z17;
clear z110;
clear z21;
clear z24;
clear z27;
clear z210;
clear z31;
clear z34;
clear z37;
clear z310;
clear z41;
clear z44;
clear z47;
clear z410;
clear z51;
clear z54;
clear z57;
clear z510;

```

```

%Para 3000 rpm
Y12 = fft(z12, si zefft);
Y15 = fft(z15, si zefft);
Y18 = fft(z18, si zefft);
Y111 = fft(z111, si zefft);

```

```

Y22 = fft(z22, si zefft);
Y25 = fft(z25, si zefft);
Y28 = fft(z28, si zefft);
Y211 = fft(z211, si zefft);

```

```

Y32 = fft(z32, si zefft);
Y35 = fft(z35, si zefft);
Y38 = fft(z38, si zefft);
Y311 = fft(z311, si zefft);

```

```

Y42 = fft(z42, si zefft);
Y45 = fft(z45, si zefft);
Y48 = fft(z48, si zefft);
Y411 = fft(z411, si zefft);

```

```

Y52 = fft(z52, si zefft);
Y55 = fft(z55, si zefft);
Y58 = fft(z58, si zefft);
Y511 = fft(z511, si zefft);

```

```

%libera memória do sistema
clear z12;
clear z15;
clear z18;
clear z111;
clear z22;
clear z25;
clear z28;
clear z211;
clear z32;
clear z35;
clear z38;
clear z311;
clear z42;
clear z45;
clear z48;
clear z411;
clear z52;
clear z55;
clear z58;
clear z511;

```

```

%Para 3500 rpm
Y13 = fft(z13, si zefft);
Y16 = fft(z16, si zefft);
Y19 = fft(z19, si zefft);
Y112 = fft(z112, si zefft);

```

```

Y23 = fft(z23, si zefft);
Y26 = fft(z26, si zefft);
Y29 = fft(z29, si zefft);
Y212 = fft(z212, si zefft);

```

```

Y33 = fft(z33, si zefft);
Y36 = fft(z36, si zefft);

```

```

Y39 = fft(z39, si zefft);
Y312 = fft(z312, si zefft);

Y43 = fft(z43, si zefft);
Y46 = fft(z46, si zefft);
Y49 = fft(z49, si zefft);
Y412 = fft(z412, si zefft);

Y53 = fft(z53, si zefft);
Y56 = fft(z56, si zefft);
Y59 = fft(z59, si zefft);
Y512 = fft(z512, si zefft);

%libera memória do sistema
clear z13;
clear z16;
clear z19;
clear z112;
clear z23;
clear z26;
clear z29;
clear z212;
clear z33;
clear z36;
clear z39;
clear z312;
clear z43;
clear z46;
clear z49;
clear z412;
clear z53;
clear z56;
clear z59;
clear z512;

%-----
%Calcula o valor quadrático da FFT
%Para 2500 rpm
PY11 = Y11. * conj(Y11) / si zefft;
PY14 = Y14. * conj(Y14) / si zefft;
PY17 = Y17. * conj(Y17) / si zefft;
PY110 = Y110. * conj(Y110) / si zefft;

PY21 = Y21. * conj(Y21) / si zefft;
PY24 = Y24. * conj(Y24) / si zefft;
PY27 = Y27. * conj(Y27) / si zefft;
PY210 = Y210. * conj(Y210) / si zefft;

PY31 = Y31. * conj(Y31) / si zefft;
PY34 = Y34. * conj(Y34) / si zefft;
PY37 = Y37. * conj(Y37) / si zefft;
PY310 = Y310. * conj(Y310) / si zefft;

PY41 = Y41. * conj(Y41) / si zefft;
PY44 = Y44. * conj(Y44) / si zefft;
PY47 = Y47. * conj(Y47) / si zefft;
PY410 = Y410. * conj(Y410) / si zefft;

PY51 = Y51. * conj(Y51) / si zefft;
PY54 = Y54. * conj(Y54) / si zefft;
PY57 = Y57. * conj(Y57) / si zefft;
PY510 = Y510. * conj(Y510) / si zefft;

%libera memória do sistema
clear Y11;
clear Y14;
clear Y17;
clear Y110;
clear Y21;
clear Y24;
clear Y27;
clear Y210;
clear Y31;
clear Y34;
clear Y37;
clear Y310;
clear Y41;
clear Y44;
clear Y47;
clear Y410;
clear Y51;
clear Y54;
clear Y57;
clear Y510;

%Para 3000 rpm
PY12 = Y12. * conj(Y12) / si zefft;

```

```

PY15 = Y15. * conj (Y15) / si zeffft;
PY18 = Y18. * conj (Y18) / si zeffft;
PY111 = Y111. * conj (Y111) / si zeffft;

```

```

PY22 = Y22. * conj (Y22) / si zeffft;
PY25 = Y25. * conj (Y25) / si zeffft;
PY28 = Y28. * conj (Y28) / si zeffft;
PY211 = Y211. * conj (Y211) / si zeffft;

```

```

PY32 = Y32. * conj (Y32) / si zeffft;
PY35 = Y35. * conj (Y35) / si zeffft;
PY38 = Y38. * conj (Y38) / si zeffft;
PY311 = Y311. * conj (Y311) / si zeffft;

```

```

PY42 = Y42. * conj (Y42) / si zeffft;
PY45 = Y45. * conj (Y45) / si zeffft;
PY48 = Y48. * conj (Y48) / si zeffft;
PY411 = Y411. * conj (Y411) / si zeffft;

```

```

PY52 = Y52. * conj (Y52) / si zeffft;
PY55 = Y55. * conj (Y55) / si zeffft;
PY58 = Y58. * conj (Y58) / si zeffft;
PY511 = Y511. * conj (Y511) / si zeffft;

```

```

%Libera memória do sistema

```

```

clear Y12;
clear Y15;
clear Y18;
clear Y111;
clear Y22;
clear Y25;
clear Y28;
clear Y211;
clear Y32;
clear Y35;
clear Y38;
clear Y311;
clear Y42;
clear Y45;
clear Y48;
clear Y411;
clear Y52;
clear Y55;
clear Y58;
clear Y511;

```

```

%Para 3500 rpm

```

```

PY13 = Y13. * conj (Y13) / si zeffft;
PY16 = Y16. * conj (Y16) / si zeffft;
PY19 = Y19. * conj (Y19) / si zeffft;
PY112 = Y112. * conj (Y112) / si zeffft;

```

```

PY23 = Y23. * conj (Y23) / si zeffft;
PY26 = Y26. * conj (Y26) / si zeffft;
PY29 = Y29. * conj (Y29) / si zeffft;
PY212 = Y212. * conj (Y212) / si zeffft;

```

```

PY33 = Y33. * conj (Y33) / si zeffft;
PY36 = Y36. * conj (Y36) / si zeffft;
PY39 = Y39. * conj (Y39) / si zeffft;
PY312 = Y312. * conj (Y312) / si zeffft;

```

```

PY43 = Y43. * conj (Y43) / si zeffft;
PY46 = Y46. * conj (Y46) / si zeffft;
PY49 = Y49. * conj (Y49) / si zeffft;
PY412 = Y412. * conj (Y412) / si zeffft;

```

```

PY53 = Y53. * conj (Y53) / si zeffft;
PY56 = Y56. * conj (Y56) / si zeffft;
PY59 = Y59. * conj (Y59) / si zeffft;
PY512 = Y512. * conj (Y512) / si zeffft;

```

```

%Libera memória do sistema

```

```

clear Y13;
clear Y16;
clear Y19;
clear Y112;
clear Y23;
clear Y26;
clear Y29;
clear Y212;
clear Y33;
clear Y36;
clear Y39;
clear Y312;
clear Y43;
clear Y46;

```

```

clear Y49;
clear Y412;
clear Y53;
clear Y56;
clear Y59;
clear Y512;
%-----

%monta a escala de frequencias no eixo x
f = 0: ((Fs / 2) / (sizefft/2)) : (Fs / 2);

%-----

%----- Gráficos do Filtro 1 -----
%----- 7500 Hz -----

%-----Para 2500 RPM - Filtro 1
%cria uma nova figura
figure;
%plota
plot(f, PY11(1: (sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY14(1: (sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY17(1: (sizefft/2 + 1)), 'r');
plot(f, PY110(1: (sizefft/2 + 1)), 'y');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff1 - (bg / 2)) (ff1 + (bg / 2))]);
title('@2500 rpm - Fc = 7500 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Magnitude');
legend('Ensaio-2-01', 'Ensaio-2-04', 'Ensaio-2-07', 'Ensaio-2-10');

%-----Para 3000 RPM - Filtro 1
%cria uma nova figura
figure;
%plota
plot(f, PY12(1: (sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY15(1: (sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY18(1: (sizefft/2 + 1)), 'r');
plot(f, PY111(1: (sizefft/2 + 1)), 'y');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff1 - (bg / 2)) (ff1 + (bg / 2))]);
title('@3000 rpm - Fc = 7500 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Amplitude [dB]');
legend('Ensaio-2-02', 'Ensaio-2-05', 'Ensaio-2-08', 'Ensaio-2-11');

%-----Para 3500 RPM - Filtro 1
%cria uma nova figura
figure;
%plota
plot(f, PY13(1: (sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY16(1: (sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY19(1: (sizefft/2 + 1)), 'r');
plot(f, PY112(1: (sizefft/2 + 1)), 'y');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff1 - (bg / 2)) (ff1 + (bg / 2))]);
title('@3500 rpm - Fc = 7500 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Amplitude [dB]');
legend('Ensaio-2-03', 'Ensaio-2-06', 'Ensaio-2-09', 'Ensaio-2-12');

%----- Gráficos do Filtro 2 -----
%----- 12400 Hz -----

%cria uma nova figura
%Para 2500 RPM - Filtro 2
figure;
%plota
plot(f, PY21(1: (sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY24(1: (sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY27(1: (sizefft/2 + 1)), 'r');
plot(f, PY210(1: (sizefft/2 + 1)), 'y');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff2 - (bg / 2)) (ff2 + (bg / 2))]);
title('@2500 rpm - Fc = 12400 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Amplitude [dB]');
legend('Ensaio-2-01', 'Ensaio-2-04', 'Ensaio-2-07', 'Ensaio-2-10');

```

```

%cria uma nova figura
%Para 3000 RPM - Filtro 2
figure;
%plota
plot(f, PY22(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY25(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY28(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
plot(f, PY211(1:(sizefft/2 + 1)), 'y');
hold off;
%Configura os eixos
axis([10000, 14000, 0, 0.003]);
xlim([(ff2 - (bg / 2)) (ff2 + (bg / 2))]);
title('@3000 rpm - Fc = 12400 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Amplitude [dB]');
legend('Ensaio-2-02', 'Ensaio-2-05', 'Ensaio-2-08', 'Ensaio-2-11');

%cria uma nova figura
%Para 3500 RPM - Filtro 2
figure;
%plota
plot(f, PY23(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY26(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY29(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
plot(f, PY212(1:(sizefft/2 + 1)), 'y');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff2 - (bg / 2)) (ff2 + (bg / 2))]);
title('@3500 rpm - Fc = 12400 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Amplitude [dB]');
legend('Ensaio-1-03', 'Ensaio-1-06', 'Ensaio-1-09');

%----- Gráficos do Filtro 3 -----
%----- 15600 Hz -----
%cria uma nova figura
%Para 2500 RPM - Filtro 3
figure;
%plota
plot(f, PY31(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY34(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY37(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
plot(f, PY310(1:(sizefft/2 + 1)), 'y');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff3 - (bg / 2)) (ff3 + (bg / 2))]);
title('@2500 rpm - Fc = 15600 Hz');
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Amplitude [dB]');
legend('Ensaio-2-01', 'Ensaio-2-04', 'Ensaio-2-07', 'Ensaio-2-10');

%cria uma nova figura
%Para 3000 RPM - Filtro 3
figure;
%plota
plot(f, PY32(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY35(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY38(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
plot(f, PY311(1:(sizefft/2 + 1)), 'y');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff3 - (bg / 2)) (ff3 + (bg / 2))]);
titulo = ['@3000 rpm - Fc = 15600 Hz'];
title(titulo);
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Amplitude [dB]');
legend('Ensaio-2-02', 'Ensaio-2-05', 'Ensaio-2-08', 'Ensaio-2-11');

%cria uma nova figura
%Para 3500 RPM - Filtro 3
figure;
%plota
plot(f, PY33(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY36(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY39(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
plot(f, PY312(1:(sizefft/2 + 1)), 'y');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([(ff3 - (bg / 2)) (ff3 + (bg / 2))]);
titulo = ['@3500 rpm - Fc = 15600 Hz'];
title(titulo);

```



```

xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Amplitude [dB]');
legend('Ensaio-2-03', 'Ensaio-2-06', 'Ensaio-2-09', 'Ensaio-2-12');

%----- Gráficos do Filtro 4 -----
%----- 17100 Hz -----
%cria uma nova figura
%Para 2500 RPM - Filtro 4
figure;
%plota
plot(f, PY41(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY44(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY47(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
plot(f, PY410(1:(sizefft/2 + 1)), 'y');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([ff4 - (bg / 2) (ff4 + (bg / 2))]);
titulo = ['@2500 rpm - Fc = 17100 Hz'];
title(titulo);
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Amplitude [dB]');
legend('Ensaio-2-01', 'Ensaio-2-04', 'Ensaio-2-07', 'Ensaio-2-10');

%cria uma nova figura
%Para 3000 RPM - Filtro 4
figure;
%plota
plot(f, PY42(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY45(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY48(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
plot(f, PY411(1:(sizefft/2 + 1)), 'y');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([ff4 - (bg / 2) (ff4 + (bg / 2))]);
titulo = ['@3000 rpm - Fc = 17100 Hz'];
title(titulo);
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Amplitude [dB]');
legend('Ensaio-2-02', 'Ensaio-2-05', 'Ensaio-2-08', 'Ensaio-2-11');

%cria uma nova figura
%Para 3500 RPM - Filtro 4
figure;
%plota
plot(f, PY43(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY46(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY49(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
plot(f, PY412(1:(sizefft/2 + 1)), 'y');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([ff4 - (bg / 2) (ff4 + (bg / 2))]);
titulo = ['@3500 rpm - Fc = 17100 Hz'];
title(titulo);
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Amplitude [dB]');
legend('Ensaio-2-03', 'Ensaio-2-06', 'Ensaio-2-09', 'Ensaio-2-12');

%----- Gráficos do Filtro 5 -----
%----- 21700 Hz -----
%cria uma nova figura
%Para 2500 RPM - Filtro 5
figure;
%plota
plot(f, PY51(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY54(1:(sizefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY57(1:(sizefft/2 + 1)), 'r');
plot(f, PY510(1:(sizefft/2 + 1)), 'y');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([ff5 - (bg / 2) (ff5 + (bg / 2))]);
titulo = ['@2500 rpm - Fc = 21700 Hz'];
title(titulo);
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Amplitude [dB]');
legend('Ensaio-2-01', 'Ensaio-2-04', 'Ensaio-2-07', 'Ensaio-2-10');

%cria uma nova figura
%Para 3000 RPM - Filtro 5
figure;
%plota
plot(f, PY52(1:(sizefft/2 + 1)), 'b');

```

```

hold on;
plot(f, PY55(1: (si zefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY58(1: (si zefft/2 + 1)), 'r');
plot(f, PY511(1: (si zefft/2 + 1)), 'y');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([ (ff5 - (bg / 2)) (ff5 + (bg / 2))]);
título = ['@3000 rpm - Fc = 21700 Hz'];
title(título);
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Amplitude [dB]');
legend('Ensaio-2-02', 'Ensaio-2-05', 'Ensaio-2-08', 'Ensaio-2-11');

%cria uma nova figura
%Para 3500 RPM - Filtro 5
figure;
%plota
plot(f, PY53(1: (si zefft/2 + 1)), 'b');
hold on;
plot(f, PY56(1: (si zefft/2 + 1)), 'g');
plot(f, PY59(1: (si zefft/2 + 1)), 'r');
plot(f, PY512(1: (si zefft/2 + 1)), 'y');
hold off;
%Configura os eixos
xlim([ (ff5 - (bg / 2)) (ff5 + (bg / 2))]);
título = ['@3500 rpm - Fc = 21700 Hz'];
title(título);
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Amplitude [dB]');
legend('Ensaio-2-03', 'Ensaio-2-06', 'Ensaio-2-09', 'Ensaio-2-12');

%Para 2500 rpm
E1F1 = sum(PY11);
E4F1 = sum(PY14);
E7F1 = sum(PY17);
E10F1 = sum(PY110);
E1F2 = sum(PY21);
E4F2 = sum(PY24);
E7F2 = sum(PY27);
E10F2 = sum(PY210);
E1F3 = sum(PY31);
E4F3 = sum(PY34);
E7F3 = sum(PY37);
E10F3 = sum(PY310);
E1F4 = sum(PY41);
E4F4 = sum(PY44);
E7F4 = sum(PY47);
E10F4 = sum(PY410);
E1F5 = sum(PY51);
E4F5 = sum(PY54);
E7F5 = sum(PY57);
E10F5 = sum(PY510);

%Para 3000 rpm
E2F1 = sum(PY12);
E5F1 = sum(PY15);
E8F1 = sum(PY18);
E11F1 = sum(PY111);
E2F2 = sum(PY22);
E5F2 = sum(PY25);
E8F2 = sum(PY28);
E11F2 = sum(PY211);
E2F3 = sum(PY32);
E5F3 = sum(PY35);
E8F3 = sum(PY38);
E11F3 = sum(PY311);
E2F4 = sum(PY42);
E5F4 = sum(PY45);
E8F4 = sum(PY48);
E11F4 = sum(PY411);
E2F5 = sum(PY52);
E5F5 = sum(PY55);
E8F5 = sum(PY58);
E11F5 = sum(PY511);

%Para 3500 rpm
E3F1 = sum(PY13);
E6F1 = sum(PY16);
E9F1 = sum(PY19);
E12F1 = sum(PY112);
E3F2 = sum(PY23);
E6F2 = sum(PY26);
E9F2 = sum(PY29);
E12F2 = sum(PY212);
E3F3 = sum(PY33);
E6F3 = sum(PY36);
E9F3 = sum(PY39);

```

```

E12F3 = sum(PY312);
E3F4 = sum(PY43);
E6F4 = sum(PY46);
E9F4 = sum(PY49);
E12F4 = sum(PY412);
E3F5 = sum(PY53);
E6F5 = sum(PY56);
E9F5 = sum(PY59);
E12F5 = sum(PY512);
%-----
figure;
pa = [25 47.5 58.33 100];
ec = [E4F1 E7F1 E10F1 E1F1];
plot(pa,ec, '-.sk');
hold on;
ec = [E5F1 E8F1 E11F1 E2F1];
plot(pa,ec, '-.ok');
ec = [E6F1 E9F1 E12F1 E3F1];
plot(pa,ec, '-.dk');
title('Energia x variação do combustível - Ensaio-2 - Filtro-1');
xlabel('Percentual de álcool na mistura [%]');
ylabel('Energia [dB]');
legend('2500 rpm','3000 rpm','3500 rpm');
%-----

figure;
pa = [25 47.5 58.33 100];
ec = [E4F2 E7F2 E10F2 E1F2];
plot(pa,ec, '-.sk');
hold on;
ec = [E5F2 E8F2 E11F2 E2F2];
plot(pa,ec, '-.ok');
ec = [E6F2 E9F2 E12F2 E3F2];
plot(pa,ec, '-.dk');
title('Energia x variação do combustível - Ensaio-2 - Filtro-2');
xlabel('Percentual de álcool na mistura [%]');
ylabel('Energia [dB]');
legend('2500 rpm','3000 rpm','3500 rpm');
%-----

figure;
pa = [25 47.5 58.33 100];
ec = [E4F3 E7F3 E10F3 E1F3];
plot(pa,ec, '-.sk');
hold on;
ec = [E5F3 E8F3 E11F3 E2F3];
plot(pa,ec, '-.ok');
ec = [E6F3 E9F3 E12F3 E3F3];
plot(pa,ec, '-.dk');
title('Energia x variação do combustível - Ensaio-2 - Filtro-3');
xlabel('Percentual de álcool na mistura [%]');
ylabel('Energia [dB]');
legend('2500 rpm','3000 rpm','3500 rpm');
%-----

figure;
pa = [25 47.5 58.33 100];
ec = [E4F5 E7F5 E10F5 E1F5];
plot(pa,ec, '-.sk');
hold on;
ec = [E5F5 E8F5 E11F5 E2F5];
plot(pa,ec, '-.ok');
ec = [E6F5 E9F5 E12F5 E3F5];
plot(pa,ec, '-.dk');
title('Energia x variação do combustível - Ensaio-2 - Filtro-4');
xlabel('Percentual de álcool na mistura [%]');
ylabel('Energia [dB]');
legend('2500 rpm','3000 rpm','3500 rpm');
%-----

figure;
pa = [25 47.5 58.33 100];
ec = [E4F5 E7F5 E10F5 E1F5];
plot(pa,ec, '-.sk');
hold on;
ec = [E5F5 E8F5 E11F5 E2F5];
plot(pa,ec, '-.ok');
ec = [E6F5 E9F5 E12F5 E3F5];
plot(pa,ec, '-.dk');
title('Energia x variação do combustível - Ensaio-2 - Filtro-5');
xlabel('Percentual de álcool na mistura [%]');
ylabel('Energia [dB]');
legend('2500 rpm','3000 rpm','3500 rpm');
%-----
clear all;

```

APÊNDICE K

APÊNDICE L

```

%-----
% Rotina para cálculo da PSD dos sinais do Ensaio_2 com filtro passa-banda
% com frequências de corte em 2kHz e 16kHz
% Breno Ortega Fernandez, Lins-SP
% Escrita para MATLAB 7 (Release 14)
%-----
%
txt = ['Ensaio-2-01 @2500 RPM com filtro passa-banda 2-16kHz'
      'Ensaio-2-02 @3000 RPM com filtro passa-banda 2-16kHz'
      'Ensaio-2-03 @3500 RPM com filtro passa-banda 2-16kHz'
      'Ensaio-2-04 @2500 RPM com filtro passa-banda 2-16kHz'
      'Ensaio-2-05 @3000 RPM com filtro passa-banda 2-16kHz'
      'Ensaio-2-06 @3500 RPM com filtro passa-banda 2-16kHz'
      'Ensaio-2-07 @2500 RPM com filtro passa-banda 2-16kHz'
      'Ensaio-2-08 @3000 RPM com filtro passa-banda 2-16kHz'
      'Ensaio-2-09 @3500 RPM com filtro passa-banda 2-16kHz'
      'Ensaio-2-10 @2500 RPM com filtro passa-banda 2-16kHz'
      'Ensaio-2-11 @3000 RPM com filtro passa-banda 2-16kHz'
      'Ensaio-2-12 @3500 RPM com filtro passa-banda 2-16kHz'];
sizefft = 65536; % Número de pontos da FFT
k = 12; % Número de ensaios a serem plotados
e = [0 0 0 0 0 0 0 0 0]; % Matriz da energia
Fs = 44100; % Frequência de amostragem
N = 50; % Ordem do filtro
Fc1 = 2000; % Primeira Frequência de Corte
Fc2 = 16000; % Segunda Frequência de Corte
flag = 'noscale'; % Flag
% Cria o vetor janela
win = hamming(N+1);
% Calcula os coeficientes usando a função FIR1.
b = fir1(N, [Fc1 Fc2]/(Fs/2), 'bandpass', win, flag);
Hd = dfilt.dfir(b);
filtro = get(Hd, 'numerator');
% Laço principal do programa
for n = 1:k
    %concatena as strings para a formação do nome do arquivo wav
    if n >= 10
        arquivo = strcat('E:\sanca\Ensaios\Ensaio_2_', int2str(n), '.wav');
    else
        arquivo = strcat('E:\sanca\Ensaios\Ensaio_2_0', int2str(n), '.wav');
    end
    %abre o arquivo wav
    [y, Fs, bits] = wavread(arquivo);
    %seleciona o canal de audio adequado (L ou R)
    y = y(:, 1);
    %filtra o sinal usando o filtro indicado
    z = filter(filtro, 1, y);
    %calcula a FFT do sinal com o número de pontos definido anteriormente
    Y = fft(z, sizefft);
    %Calcula o valor quadrático da FFT
    Pyy = Y.*conj(Y)/sizefft;
    %Calcula a energia do espectro
    e(n) = sum(Pyy);
    %monta a escala do eixo x
    f = 0: ((Fs/2)/(sizefft/2)): (Fs/2);
    %cria uma nova figura
    figure;
    %plota
    plot(f, Pyy(1:(sizefft/2+1)), 'k');
    %Configura os eixos
    axis([2000, 16000, 0, 0.35]);
    titulo = ['PSD do ' txt(n,:)];
    title(titulo);
    xlabel('Frequência [Hz]');
    ylabel('Magnitude');
end;
% Plota o grafico da energia espectral dos ensaios
figure;
pa = [25 47.5 58.33 100];
ec = [e(4) e(7) e(10) e(1)];
plot(pa, ec, '-.sk');
hold on;
ec = [e(5) e(8) e(11) e(2)];
plot(pa, ec, '-.ok');
ec = [e(6) e(9) e(12) e(3)];
plot(pa, ec, '-.dk');
title('Variação da energia vs. variação do combustível na faixa de 2 a 16 kHz');
xlabel('Percentual de álcool na mistura [%]');
ylabel('Magnitude');
legend('@2500 rpm', '@3000 rpm', '@3500 rpm');
clear all;

```

APÊNDICE M