



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

“CARACTERIZAÇÃO DE DETONAÇÃO
DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA
COM ONDAS MECÂNICAS”

JOÃO BATISTA CARVALHO FILARDI

Belo Horizonte, 26 de abril de 2013

João Batista Carvalho Filardi

**“CARACTERIZAÇÃO DE DETONAÇÃO
DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA
COM ONDAS MECÂNICAS”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Eduardo Bauzer Medeiros

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

Ano 2013



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel. : +55 31 3499.5145, Fax: +55 31 3443.3783
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**"CARACTERIZAÇÃO DE DETONAÇÃO DE UM MOTOR DE
COMBUSTÃO INTERNA COM ONDAS MECÂNICAS."**

JOÃO BATISTA CARVALHO FILARDI

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Doutor em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Projeto Mecânico**".

Tese aprovada em 26 de abril de 2013.

Por:

Dr. Eduardo Bauzer Medeiros

Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Dr. Fabrício José Pacheco Pujatti

Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Dr. Horácio Valadares Duarte

Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Dr. Nilton Da Silva Maia

Departamento de Engenharia de Produção Civil/CEFET

Dr. Sérgio De Morais Hanriot

Instituto Politécnico-PUC-MINAS

Dra. Maria Alzira de Araújo Nunes

Universidade de Brasília - UnB

Que este trabalho tenha alcançado plenamente o seu propósito;
Que suporte de maneira satisfatória outros pesquisadores da área;
E que de alguma forma contribua, com quem quer que o busque como
fonte de pesquisa, para a superação de dificuldades e para o alcance de
objetivos ainda maiores.

O Autor

AGRADECIMENTOS

A Deus por permitir que este trabalho fosse finalizado apesar das dificuldades inerentes a este tipo de atividade.

Aos meus pais, Maria Thereza e João Baptista, pelos ensinamentos e experiências transmitidos ao longo de todos estes anos e, principalmente, pelo exemplo de vida que foram e sempre serão para mim. Todo o sacrifício e dedicação à família, ao longo de suas vidas, serve de inspiração e motivação para que eu continue tentando imitá-los, ainda que sem tanto sucesso.

Aos meus irmãos, pelas palavras de incentivo e apoio a mim dedicados e pelo desejo expresso de que esta conquista se realizasse.

Agradeço em particular a minha família, minha esposa Mércia e meus filhos Ana Beatriz e Pedro Victor, pelo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho e pela paciência que a mim dispensaram principalmente nos momentos mais difíceis. Em especial por terem compreendido as muitas horas de ausência e o convívio de que foram privados durante esses anos.

Ao amigo e orientador, Eduardo Bauzer Medeiros, pela paciência, pelos ensinamentos, pela orientação e, principalmente, pela confiança a mim dispensada durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Todo o tempo dedicado a conversas e discussões técnicas, muitas das vezes após o seu horário normal de trabalho, foram cruciais para a minha formação e decisivas para que eu não desanimasse face às mudanças e dificuldades surgidas ao longo deste trabalho. Sem isto, certamente, a realização do mesmo teria sido bastante comprometida ou mesmo inviabilizada.

A VSE – Vale Soluções em Energia – pela oportunidade de utilização das suas instalações mais especificamente o motor monocilindro de pesquisas (SCRE) pertencente ao Laboratório de Motores e dos seus respectivos recursos (instrumentação para aquisição e análise da combustão) sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

Agradecimentos especiais ao engenheiro Henrique Moritz pela criação dos modelos matemáticos utilizados para a simulação computacional e validação de resultados utilizando o software GT-Power, ao engenheiro Felipe Rodrigo Cardoso pela criação do modelo de elementos finitos da câmara de combustão para a simulação

computacional e validação de resultados utilizando o software Abaqus e, finalmente, ao técnico Gil Farias e ao engenheiro André Martelli pela preciosa ajuda na realização dos experimentos. Todas estas contribuições permitiram que o trabalho se tornasse tecnicamente mais completo e abrangente. A vocês, todo o meu agradecimento pela grande ajuda, pela amizade e pelo aprendizado nesses anos de convívio.

Aos funcionários da UFMG pelo profissionalismo e dedicação durante o convívio destes anos.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, através de discussões técnicas, críticas e opiniões contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Há homens que lutam um dia, e são bons;
Há outros que lutam muitos dias, e são muito bons;
Há homens que lutam muitos anos, e são melhores;
Mas há os que lutam toda a vida, esses são os imprescindíveis!”*

Bertold Brecht

*“A gente vai contra a corrente
Até não poder resistir,
Na volta do barco é que sente
O quanto deixou de cumprir.”*

Chico Buarque na música “Roda viva”

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	15
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	16
NOMENCLATURA.....	19
RESUMO	20
ABSTRACT.....	21
1 INTRODUÇÃO	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1 Histórico da detonação	26
2.2 Definição de detonação	28
2.3 Teoria da detonação	28
2.4 Características da detonação.....	29
2.4.1 Conteúdo de frequências	30
2.4.1.1 Método matemático	30
2.4.1.2 Método computacional	33
2.4.1.3 Método experimental	34
2.4.2 Fatores de influência da detonação	35
2.4.3 Maneiras de se evitar a detonação	36
2.4.4 Efeitos da detonação	37
2.5 Simulação computacional	38
2.6 Métodos de detecção da detonação	39
2.6.1 Métodos baseados na medição da vibração no bloco do motor	41
2.6.2 Métodos baseados na medição da pressão no interior do cilindro	42
2.6.2.1 Vela instrumentada.....	44
2.6.2.2 Sensor de pressão dotado de um sistema de refrigeração.....	45
2.6.2.3 Sensor de pressão sem sistema de refrigeração.....	45
2.6.3 Métodos óticos	47
2.6.4 Métodos baseados na medição da corrente de ionização	49
2.6.5 Métodos baseados na medição do ruído radiado pelo motor	49
2.6.6 Vantagens e desvantagens entre os métodos de detecção	50
2.7 Métodos para análise dos dados experimentais.....	51
2.7.1 Método baseado na Transformada de Fourier	52
2.7.2 Métodos pertencentes à família <i>JTFA</i>	52
2.7.2.1 <i>Short Time Fourier Transform (STFT)</i>	53
2.7.2.2 Transformada de <i>Wavelet (WT)</i>	54
2.7.2.3 Distribuição de <i>Wigner-Ville (WVD)</i>	54
2.8 Critérios de decisão	55
2.8.1 Índices mais comumente utilizados	56

3	METODOLOGIA	60
3.1	Definição do planejamento de provas	60
3.2	Tipos de provas realizadas.....	61
3.3	Caracterização do fenômeno da detonação	63
3.3.1	Cálculo utilizando método analítico através da solução da equação da onda	64
3.3.2	Simulação computacional utilizando o Método de Elementos Finitos (<i>FEM</i>).....	70
3.3.2.1	Modelo de elementos finitos da câmara de combustão	71
3.3.3	Determinação experimental: utilização de sensor de pressão	73
3.3.4	Determinação experimental: utilização de vela de ignição instrumentada.....	76
3.3.5	Determinação experimental: utilização de acelerômetro.....	77
3.3.6	Determinação experimental: medição do torque	79
4	RESULTADOS.....	81
4.1	Cálculo utilizando método analítico (Etapa 1)	81
4.1.1	Validação do modelo computacional utilizando o software GT-Power.....	82
4.1.2	Estudo da influência dos valores de lambda.....	86
4.1.3	Estudo da influência da estrutura de fluxo	87
4.1.4	Avaliação global	89
4.2	Cálculo utilizando o Método de Elementos Finitos - <i>FEM</i> (Etapa 2)	91
4.2.1	Sistema de injeção <i>PFI</i> utilizando <i>CNG</i>	91
4.2.1.1	Considerações gerais sobre a vela instrumentada.....	91
4.2.1.2	Considerações gerais sobre o sensor de pressão.....	94
4.2.1.3	Estudo da influência do posicionamento do sensor.....	95
4.2.1.4	Estudo da influência dos valores de lambda.....	98
4.2.2	Sistema de injeção Direta de combustível utilizando Etanol	99
4.2.2.1	Influência do posicionamento do sensor	99
4.2.2.2	Influência dos valores de lambda	100
4.2.2.3	Influência das diferentes estruturas de fluxo	102
4.2.2.4	Influência dos valores da pressão de injeção.....	103
4.2.3	Sistema de injeção direta de combustível utilizando <i>CNG</i>	104
4.2.3.1	Influência do posicionamento do sensor	104
4.2.3.2	Influência dos valores de lambda	105
4.2.3.3	Influência das diferentes estruturas de fluxo	106
4.2.4	Comparativo dos resultados do cálculo analítico e da simulação	107
4.2.5	Comparativo dos resultados da simulação.....	110
4.3	Definição preliminar de parâmetros	114
4.3.1	Definição da resolução do ângulo do eixo do motor	115
4.3.2	Definição do ciclo representativo de funcionamento do motor	118
4.3.2.1	Provas utilizando o sensor de pressão	118
4.3.2.2	Provas utilizando a vela instrumentada	120
4.3.2.3	Provas utilizando o acelerômetro	122
4.3.3	Definição dos parâmetros dos filtros	124

4.3.4	Definição dos parâmetros e métodos de avaliação	126
4.4	Determinação experimental utilizando sensor de pressão (Etapa 3)	127
4.4.1	Configuração de injeção <i>PFI</i> utilizando <i>CNG</i>	127
4.4.1.1	Influência dos valores de lambda	128
4.4.2	Configuração de injeção <i>DI</i> utilizando Etanol	133
4.4.2.1	Influência dos valores de lambda	133
4.4.2.2	Influência das diferentes estruturas de fluxo	137
4.4.2.3	Influência dos valores da pressão de injeção.....	140
4.4.3	Configuração de injeção <i>DI</i> utilizando <i>CNG</i>	143
4.4.3.1	Influência dos valores de lambda	143
4.4.3.2	Influência das diferentes estruturas de fluxo	147
4.4.4	Comparativo dos resultados do sensor de pressão e da simulação.....	150
4.5	Determinação experimental utilizando vela instrumentada (Etapa 4).....	152
4.5.1	Configuração de injeção <i>PFI</i> utilizando <i>CNG</i>	152
4.5.1.1	Influência dos valores de lambda	152
4.5.2	Configuração de injeção <i>DI</i> utilizando Etanol	156
4.5.2.1	Influência dos valores de lambda	156
4.5.2.2	Influência das diferentes estruturas de fluxo	160
4.5.2.3	Influência dos valores da pressão de injeção.....	163
4.5.3	Configuração de injeção <i>DI</i> utilizando <i>CNG</i>	166
4.5.4	Comparativo dos resultados da vela instrumentada e da simulação.....	166
4.6	Determinação experimental utilizando acelerômetro (Etapa 5)	167
4.6.1	Configuração de injeção <i>PFI</i> utilizando <i>CNG</i>	167
4.6.1.1	Influência dos valores de lambda	167
4.6.2	Configuração de injeção <i>DI</i> utilizando Etanol	170
4.6.2.1	Influência dos valores de lambda	170
4.6.2.2	Influência das diferentes estruturas de fluxo	174
4.6.2.3	Influência dos valores da pressão de injeção.....	177
4.6.3	Configuração de injeção <i>DI</i> utilizando <i>CNG</i>	180
4.6.3.1	Influência dos valores de lambda	180
4.6.3.2	Influência das diferentes estruturas de fluxo	183
5	CONCLUSÕES.....	187
	REFERÊNCIAS	193
ANEXO A	Características técnicas dos sistemas de injeção de combustível	199
ANEXO B	Características técnicas do motor monocilindro de pesquisa	200
ANEXO C	Instalações e equipamentos utilizados.....	201
ANEXO D.1	Carta de calibração do sensor de pressão	202
ANEXO D.2	Carta de calibração da vela instrumentada	203
ANEXO D.3	Carta de calibração do acelerômetro.....	204
APÊNDICE A	Modelo GT-Power do motor monocilindro de pesquisa Ricardo....	205
APÊNDICE B	Coefficientes de <i>swirl</i> e <i>tumble</i> das estruturas de fluxo avaliadas	206

APÊNDICE C.1 Configuração: sistema <i>PFI</i> utilizando <i>CNG</i> e $\lambda = 1,0$	207
APÊNDICE C.2 Configuração: sistema <i>PFI</i> utilizando <i>CNG</i> e $\lambda = 1,3$	208
APÊNDICE C.3 Configuração: sistema <i>PFI</i> utilizando <i>CNG</i> e $\lambda = 1,5$	209
APÊNDICE C.4 Configuração: sistema <i>DI</i> utilizando etanol e $\lambda = 1,0$	210
APÊNDICE C.5 Configuração: sistema <i>DI</i> utilizando etanol e $\lambda = 1,3$	211
APÊNDICE C.6 Configuração: sistema <i>DI</i> utilizando etanol e $\lambda = 1,5$	212
APÊNDICE C.7 Configuração: sistema <i>DI</i> etanol, $\lambda=1,3$, <i>low swirl</i>	213
APÊNDICE C.8 Configuração: sistema <i>DI</i> etanol, $\lambda=1,3$, <i>medium swirl and tumble</i> ..	214
APÊNDICE C.9 Configuração: sistema <i>DI</i> etanol, $\lambda=1,3$, <i>high swirl</i>	215
APÊNDICE C.10 Configuração: sistema <i>DI CNG</i> , $\lambda=1,0$, <i>low swirl</i>	216
APÊNDICE C.11 Configuração: sistema <i>DI CNG</i> , $\lambda=1,3$, <i>low swirl</i>	217
APÊNDICE C.12 Configuração: sistema <i>DI CNG</i> , $\lambda=1,5$, <i>low swirl</i>	218
APÊNDICE C.13 Configuração: sistema <i>DI CNG</i> , $\lambda=1,3$, <i>medium swirl and tumble</i> ..	219
APÊNDICE C.14 Configuração: sistema <i>DI CNG</i> , $\lambda=1,3$, <i>high swirl</i>	220

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Forma aproximada da cavidade cilíndrica	32
Figura 2.2	Modos Acústicos	32
Figura 2.3	Vela dotada de sensor de pressão (Referência AVL).....	44
Figura 2.4	Sensor de pressão refrigerado (Referência AVL)	45
Figura 2.5	Sensor de pressão sem refrigeração (Referência AVL)	46
Figura 2.6	Tipos de montagens do sensor de pressão (A) (B) (C)	46
Figura 2.7	Sistemas Visioknock (Referência AVL).....	48
Figura 2.8	Sensor do sistema TCA (Referência AVL)	49
Figura 3.1	Etapas da caracterização da detonação	64
Figura 3.2	Gráfico de λ : principais modos acústicos (Referência Draper (1938)).....	67
Figura 3.3	Ciclos de funcionamento do motor	69
Figura 3.4	Geometrias reais do motor	70
Figura 3.5	Volumes utilizados no modelo da câmara de combustão	72
Figura 3.6	Posicionamento do sensor de pressão	74
Figura 3.7	Posicionamento da vela instrumentada	76
Figura 3.8	Posicionamento do acelerômetro no bloco do motor.....	78
Figura 4.1	Ciclos considerados na simulação computacional - sensor.....	82
Figura 4.2	Validação do modelo computacional utilizando GT-Power - sensor.....	83
Figura 4.3	Ciclos considerados na simulação computacional- vela	84
Figura 4.4	Validação do modelo computacional utilizando GT-Power - vela	85
Figura 4.5	Resultados dos cálculos analíticos – <i>PFI CNG</i> : 1º modo circunferencial ...	87
Figura 4.6	Valores de frequências determinados de forma analítica – <i>DI Etanol</i>	88
Figura 4.7	Modos acústicos para $\lambda = 1,0$ (vela instrumentada).....	92
Figura 4.8	Modos acústicos emparelhados (1º modo circunferencial) para $\lambda = 1,0$	93
Figura 4.9	Modos acústicos emparelhados (2º modo circunferencial) para $\lambda = 1,0$	93
Figura 4.10	Modos acústicos emparelhados (1º modo combinado) para $\lambda = 1,0$	93
Figura 4.11	Modos acústicos emparelhados (3º modo circunferencial) para $\lambda = 1,0$	94
Figura 4.12	1º modo radial para $\lambda = 1,0$	94
Figura 4.13	Modos acústicos para $\lambda = 1,0$ (sensor de pressão)	94
Figura 4.14	Comparativo de frequências da vela e do sensor	95
Figura 4.15	Modos acústicos (2 a 10).....	96
Figura 4.16	Modo 2: variação com o ângulo do eixo do motor	97
Figura 4.17	Comparativo de frequências em função de lambda (modos 2 e 4)	98
Figura 4.18	Comparativo de frequências: vela instrumentada x sensor de pressão	100
Figura 4.19	Comparativo de frequências em função de lambda (modos 2 e 4)	101

Figura 4.20	Influência do tipo de estrutura de fluxo: Modos Circunferencial/Radial.	102
Figura 4.21	Influência da pressão de injeção: Modos Circunferencial/Radial.....	103
Figura 4.22	Modos acústicos para $\lambda = 1,0$ (sensor de pressão)	104
Figura 4.23	Comparativo de frequências em função de lambda (modos 2 e 4)	106
Figura 4.24	Influência do tipo de estrutura de fluxo: Modos Circunferencial/Radial.	107
Figura 4.25	Valores de λ : cálculo x simulação - 1° modo circunferencial	108
Figura 4.26	Estruturas de fluxo: cálculo x simulação - 1° modo circunferencial.....	109
Figura 4.27	Comparativo entre <i>CNG PFI</i> e <i>DI</i> : 1° modo circunferencial	110
Figura 4.28	Comparativo entre <i>CNG PFI</i> e <i>DI</i> : 1° modo radial.....	111
Figura 4.29	Comparativo para <i>DI Etanol</i> : 1° modo circunferencial	112
Figura 4.30	Comparativo para <i>DI Etanol</i> : 1° modo radial.....	112
Figura 4.31	Comparativo total: 1° modo circunferencial	113
Figura 4.32	Comparativo total: 1° modo radial	113
Figura 4.33	Resolução do ângulo do eixo do motor – sensor de pressão.....	116
Figura 4.34	Resolução do ângulo do eixo do motor – vela instrumentada	116
Figura 4.35	Resolução do ângulo do eixo do motor – acelerômetro.....	117
Figura 4.36	Ciclos 46, 49, 61, 62 e 98 – sensor de pressão.....	118
Figura 4.37	<i>STFT</i> dos ciclos 46, 49, 61, 62 e 98 – sensor de pressão	119
Figura 4.38	Ciclos 46, 49, 61, 62 e 98 – vela instrumentada	120
Figura 4.39	<i>STFT</i> dos ciclos 46, 49, 61, 62 e 98 – vela instrumentada.....	121
Figura 4.40	Ciclos 46, 49, 61, 62 e 98 – acelerômetro.....	122
Figura 4.41	<i>STFT</i> dos ciclos 46, 49, 61, 62 e 98 – acelerômetro	123
Figura 4.42	Curva resposta do filtros passa alta e passa baixa.....	126
Figura 4.43	Análise <i>FFT</i> : $\lambda = 1,0$ – <i>PFI CNG</i> - sensor	128
Figura 4.44	Espectrograma: $\lambda = 1,0$ – <i>PFI CNG</i> - sensor	129
Figura 4.45	Análise <i>FFT</i> : $\lambda = 1,3$ – <i>PFI CNG</i> - sensor	130
Figura 4.46	Espectrograma: $\lambda = 1,3$ – <i>PFI CNG</i> - sensor	131
Figura 4.47	Análise <i>FFT</i> : $\lambda = 1,5$ – <i>PFI CNG</i> - sensor	131
Figura 4.48	Espectrograma: $\lambda = 1,5$ – <i>PFI CNG</i> - sensor	132
Figura 4.49	Análise <i>FFT</i> : $\lambda = 1,0$ – <i>DI Etanol</i> - sensor	133
Figura 4.50	Espectrograma: $\lambda = 1,0$ – <i>DI Etanol</i> - sensor	134
Figura 4.51	Análise <i>FFT</i> : $\lambda = 1,3$ – <i>DI Etanol</i> - sensor	134
Figura 4.52	Espectrograma: $\lambda = 1,3$ – <i>DI Etanol</i> - sensor	135
Figura 4.53	Análise <i>FFT</i> : $\lambda = 1,5$ – <i>DI Etanol</i> - sensor	136
Figura 4.54	Espectrograma: $\lambda = 1,5$ – <i>DI Etanol</i> - sensor	136
Figura 4.55	Análise <i>FFT</i> : <i>low swirl</i> – <i>DI Etanol</i> - sensor	137
Figura 4.56	Espectrograma: <i>low swirl</i> – <i>DI Etanol</i> - sensor.....	138
Figura 4.57	Análise <i>FFT</i> : <i>medium swirl and tumble</i> - <i>DI Etanol</i> - sensor	138
Figura 4.58	Espectrograma: <i>medium swirl and tumble</i> - <i>DI Etanol</i> - sensor	139
Figura 4.59	Análise <i>FFT</i> : <i>high swirl</i> – <i>DI Etanol</i> - sensor	139
Figura 4.60	Espectrograma: <i>high swirl</i> – <i>DI Etanol</i> - sensor	140

Figura 4.61	Análise FFT: pressão injeção 100 bar – <i>DI Etanol</i> – sensor	141
Figura 4.62	Espectrograma: pressão injeção 100 bar – <i>DI Etanol</i> – sensor	141
Figura 4.63	Análise FFT: pressão injeção 140 bar – <i>DI Etanol</i> – sensor	142
Figura 4.64	Espectrograma: pressão injeção 140 bar – <i>DI Etanol</i> – sensor	142
Figura 4.65	Análise FFT: $\lambda = 1,0$ – <i>DI CNG</i> - sensor	144
Figura 4.66	Espectrograma: $\lambda = 1,0$ – <i>DI CNG</i> - sensor	144
Figura 4.67	Análise FFT: $\lambda = 1,3$ – <i>DI CNG</i> - sensor	145
Figura 4.68	Espectrograma: $\lambda = 1,3$ – <i>DI CNG</i> - sensor	145
Figura 4.69	Análise FFT: $\lambda = 1,5$ – <i>DI CNG</i> - sensor	146
Figura 4.70	Espectrograma: $\lambda = 1,5$ – <i>DI CNG</i> - sensor	146
Figura 4.71	Análise FFT: <i>low swirl</i> – <i>DI CNG</i> - sensor.....	147
Figura 4.72	Espectrograma: <i>low swirl</i> – <i>DI CNG</i> - sensor.....	148
Figura 4.73	Análise FFT: <i>medium swirl and tumble</i> – <i>DI CNG</i> - sensor.....	148
Figura 4.74	Espectrograma: <i>medium swirl and tumble</i> – <i>DI CNG</i> - sensor.....	149
Figura 4.75	Análise FFT: <i>high swirl</i> – <i>DI CNG</i> - sensor	149
Figura 4.76	Espectrograma: <i>high swirl</i> – <i>DI CNG</i> - sensor	150
Figura 4.77	Comparativo de resultados: sensor x simulação	151
Figura 4.78	Análise FFT: $\lambda = 1,0$ – <i>PFI CNG</i> - vela.....	152
Figura 4.79	Espectrograma: $\lambda = 1,0$ – <i>PFI CNG</i> - vela.....	153
Figura 4.80	Análise FFT: $\lambda = 1,3$ – <i>PFI CNG</i> - vela.....	153
Figura 4.81	Espectrograma: $\lambda = 1,3$ – <i>PFI CNG</i> - vela.....	154
Figura 4.82	Análise FFT: $\lambda = 1,5$ – <i>PFI CNG</i> - vela.....	155
Figura 4.83	Espectrograma: $\lambda = 1,5$ – <i>PFI CNG</i> - vela.....	155
Figura 4.84	Análise FFT: $\lambda = 1,0$ – <i>DI Etanol</i> - vela.....	156
Figura 4.85	Espectrograma: $\lambda = 1,0$ – <i>DI Etanol</i> - vela.....	157
Figura 4.86	Análise FFT: $\lambda = 1,3$ – <i>DI Etanol</i> - vela.....	157
Figura 4.87	Espectrograma: $\lambda = 1,3$ – <i>DI Etanol</i> - vela.....	158
Figura 4.88	Análise FFT: $\lambda = 1,5$ – <i>DI Etanol</i> - vela.....	159
Figura 4.89	Espectrograma: $\lambda = 1,5$ – <i>DI Etanol</i> - vela.....	159
Figura 4.90	Análise FFT: <i>low swirl</i> – <i>DI Etanol</i> - vela.....	160
Figura 4.91	Espectrograma: <i>low swirl</i> – <i>DI Etanol</i> - vela	161
Figura 4.92	Análise FFT: <i>medium swirl and tumble</i> - <i>DI Etanol</i> - vela.....	161
Figura 4.93	Espectrograma: <i>medium swirl and tumble</i> - <i>DI Etanol</i> - vela.....	162
Figura 4.94	Análise FFT: <i>high swirl</i> – <i>DI Etanol</i> - vela.....	162
Figura 4.95	Espectrograma: <i>high swirl</i> – <i>DI Etanol</i> - vela.....	163
Figura 4.96	Análise FFT: pressão injeção 100 bar – <i>DI Etanol</i> - vela	164
Figura 4.97	Espectrograma: pressão injeção 100 bar – <i>DI Etanol</i> - vela	164
Figura 4.98	Análise FFT: pressão injeção 140 bar – <i>DI Etanol</i> - vela	165
Figura 4.99	Espectrograma: pressão injeção 140 bar – <i>DI Etanol</i> - vela	165
Figura 4.100	Comparativo de resultados: vela x simulação.....	166
Figura 4.101	Análise FFT: $\lambda = 1,0$ – <i>PFI CNG</i> - acelerômetro.....	167

Figura 4.102	Espectrograma: $\lambda = 1,0$ – <i>PFI CNG</i> - acelerômetro.....	168
Figura 4.103	Análise FFT: $\lambda = 1,3$ – <i>PFI CNG</i> - acelerômetro.....	168
Figura 4.104	Espectrograma: $\lambda = 1,3$ – <i>PFI CNG</i> - acelerômetro.....	169
Figura 4.105	Análise FFT: $\lambda = 1,5$ – <i>PFI CNG</i> - acelerômetro.....	169
Figura 4.106	Espectrograma: $\lambda = 1,5$ – <i>PFI CNG</i> - acelerômetro.....	170
Figura 4.107	Análise FFT: $\lambda = 1,0$ – <i>DI Etanol</i> - acelerômetro.....	171
Figura 4.108	Espectrograma: $\lambda = 1,0$ – <i>DI Etanol</i> - acelerômetro.....	171
Figura 4.109	Análise FFT: $\lambda = 1,3$ – <i>DI Etanol</i> - acelerômetro	172
Figura 4.110	Espectrograma: $\lambda = 1,3$ – <i>DI Etanol</i> - acelerômetro.....	172
Figura 4.111	Análise FFT: $\lambda = 1,5$ – <i>DI Etanol</i> - acelerômetro	173
Figura 4.112	Espectrograma: $\lambda = 1,5$ – <i>DI Etanol</i> - acelerômetro.....	173
Figura 4.113	Análise FFT: <i>low swirl</i> – <i>DI Etanol</i> - acelerômetro.....	174
Figura 4.114	Espectrograma: <i>low swirl</i> – <i>DI Etanol</i> - acelerômetro	175
Figura 4.115	Análise FFT: <i>medium swirl and tumble</i> - <i>DI Etanol</i> - acelerômetro.....	175
Figura 4.116	Espectrograma: <i>medium swirl and tumble</i> - <i>DI Etanol</i> - acelerômetro...	176
Figura 4.117	Análise FFT: <i>high swirl</i> – <i>DI Etanol</i> - acelerômetro.....	176
Figura 4.118	Espectrograma: <i>high swirl</i> – <i>DI Etanol</i> - acelerômetro.....	177
Figura 4.119	Detalhe FFT: pressão injeção 100 bar - <i>DI Etanol</i> - acelerômetro	178
Figura 4.120	Espectrograma: pressão injeção 100 bar - <i>DI Etanol</i> - acelerômetro....	178
Figura 4.121	Detalhe FFT: pressão injeção 140 bar - <i>DI Etanol</i> - acelerômetro	179
Figura 4.122	Espectrograma: pressão injeção 140 bar - <i>DI Etanol</i> - acelerômetro....	179
Figura 4.123	Detalhe FFT: $\lambda = 1,0$ – <i>DI CNG</i> - acelerômetro.....	180
Figura 4.124	Espectrograma: $\lambda = 1,0$ – <i>DI CNG</i> - acelerômetro.....	181
Figura 4.125	Detalhe FFT: $\lambda = 1,3$ – <i>DI CNG</i> - acelerômetro	181
Figura 4.126	Espectrograma: $\lambda = 1,3$ – <i>DI CNG</i> - acelerômetro.....	182
Figura 4.127	Detalhe FFT: $\lambda = 1,5$ – <i>DI CNG</i> - acelerômetro	182
Figura 4.128	Espectrograma: $\lambda = 1,5$ – <i>DI CNG</i> - acelerômetro.....	183
Figura 4.129	Detalhe FFT: <i>low swirl</i> – <i>DI CNG</i> - acelerômetro.....	184
Figura 4.130	Espectrograma: <i>low swirl</i> – <i>DI CNG</i> - acelerômetro	184
Figura 4.131	Detalhe FFT: <i>medium swirl and tumble</i> - <i>DI CNG</i> - acelerômetro.....	185
Figura 4.132	Espectrograma: <i>medium swirl and tumble</i> - <i>DI CNG</i> - acelerômetro	185
Figura 4.133	Detalhe FFT: <i>high swirl</i> – <i>DI CNG</i> - acelerômetro.....	186
Figura 4.134	Espectrograma: <i>high swirl</i> – <i>DI CNG</i> - acelerômetro.....	186

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Fatores que influenciam na escolha do sensor.....	51
Tabela 3.1	Provas realizadas: sistema <i>PFI CNG</i>	62
Tabela 3.2	Provas realizadas: sistema <i>DI Etanol</i>	62
Tabela 3.3	Provas realizadas: sistema <i>DI CNG</i>	63
Tabela 3.4	Valores de temperatura máxima e velocidade do som	65
Tabela 3.5	Características da malha de elementos finitos	71
Tabela 3.6	Deslocamento do pistão em função do ângulo do eixo do motor.....	72
Tabela 3.7	Características técnicas do sensor de pressão	75
Tabela 3.8	Características técnicas da vela instrumentada.....	76
Tabela 3.9	Características técnicas do acelerômetro	78
Tabela 3.10	Dados do desempenho do motor.....	80
Tabela 4.1	Resultados <i>PFI CNG</i> : sensor de pressão (1º modo circunferencial)	86
Tabela 4.2	Resultados <i>DI Etanol</i> : vela instrumentada (1º modo circunferencial).....	88
Tabela 4.3	Comparativo: frequências calculadas, simuladas e experimentais - sensor..	89
Tabela 4.4	Comparativo: frequências calculadas, simuladas e experimentais - vela....	90
Tabela 4.5	Características dos filtros.....	124
Tabela 4.6	Características dos filtros Butterworth	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AVL	Empresa fabricante de equipamentos e sensores
<i>BDC</i>	ponto morto inferior (<i>Botton Dead Center</i>)
<i>BPF</i>	<i>Bandpass Filtered</i>
<i>CAD</i>	<i>Computer Aided Design</i>
<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<i>CNG</i>	<i>Gas Naturally Compressed</i>
<i>CPU</i>	Unidade Central de Processamento (<i>Central Processing Unit</i>)
<i>CSD</i>	índice para detecção da detonação (<i>Cubic Spline Fit</i>)
<i>DFT</i>	Transformada de Fourier <i>Discreta</i> (<i>Discret Fourier Transform</i>)
<i>DI</i>	Injeção <i>Direta</i> (<i>Direct Injection</i>)
<i>DISI</i>	motor de ignição por centelha com injeção direta de combustível (<i>Direct Injection Spark Ignition</i>)
<i>EGR</i>	<i>Exhaust Gas Recirculation</i>
<i>f</i>	frequência (Hertz)
<i>FEA</i>	Análise de Elementos Finitos (<i>Finite Element Analysis</i>)
<i>FEM</i>	Método de Elementos Finitos (<i>Finite Element Method</i>)
<i>FFT</i>	<i>Fast Fourier Transform</i>
<i>FST</i>	1ª derivada do sinal da pressão
<i>h</i>	altura da câmara de combustão (mm)
<i>h(t)</i>	função janela em torno do tempo τ
<i>HPF</i>	filtro passa alta (<i>high-pass filter</i>)
<i>ICE</i>	<i>Internal Combustion Engine</i> (MCI - motor de combustão interna)
<i>IMEP</i>	pressão média efetiva indicada (<i>Indicated Mean Effective Pressure</i>)

<i>INT</i>	índice para detecção da detonação (integral)
<i>JTFA</i>	<i>Joint Time-Frequency Analysis</i>
<i>K</i>	Módulo de compressibilidade dos fluidos (Módulo de <i>Bulk</i>)
<i>KI20</i>	índice para detecção da detonação
<i>MAPO</i>	máxima amplitude de oscilação da pressão (<i>Maximum Amplitude Pressure Oscillation</i>)
<i>MATD</i>	máxima amplitude no domínio do tempo (<i>Maximum Amplitude Time Dominium</i>)
<i>MAX</i>	<i>band-pass filter method</i>
<i>MCI</i>	motor de combustão interna (<i>ICE - Internal Combustion Engine</i>)
<i>LPF</i>	filtro passa-baixa (<i>low-pass filter</i>)
<i>p</i>	pressão no interior da câmara de combustão (kg/ms^2)
<i>P</i>	pressão de equilíbrio no interior da câmara de combustão (kg/ms^2)
<i>PFI</i>	<i>portic fuel injection</i>
<i>PMI</i>	ponto morto inferior (<i>botton dead center</i>)
<i>PMS</i>	ponto morto superior (<i>top dead center</i>)
<i>PPD</i>	pico máximo de pressão (<i>peak pressure data</i>)
<i>PRÓALCOOL</i>	Programa Nacional do Álcool
<i>PSD</i>	Densidade Espectral de Potência (<i>Power Spectral Density</i>)
<i>r</i>	raio do cilindro (mm);
<i>R</i>	constante universal dos gases perfeitos ($8,314472 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$)
<i>SCRE</i>	<i>Single Cylinder Research Engine</i>
<i>SI</i>	ignição por centelha (<i>Spark Ignition</i>)
<i>SSM</i>	mistura estequiométrica estratificada (<i>Stratified Stoichiometric Mixture</i>)

STFT	<i>Short-Time Fourier Transform</i>
STP	índice para detecção da detonação (<i>STEP</i>)
T	temperatura máxima da massa queimada na câmara de combustão (K)
TCA	<i>Tomographic Combustion Analysis</i>
TDC	ponto morto superior (<i>top dead center</i>)
TFD	<i>Time-Frequency Distribution</i>
THD	3ª derivada do sinal da pressão
v	velocidade de deslocamento da chama (m/s)
V	velocidade do som (m/s)
VSE	empresa Vale Soluções em Energia
$x(t)$	sinal a ser analisado
W	frequência angular ($= 2\pi f$)
WT	<i>Wavelet Transform</i>
WVD	<i>Wigner-Ville Distribution</i>

NOMENCLATURA

Letras Gregas

β	ângulo em relação a uma determinada referência previamente estabelecida que a chama está se deslocando
γ	relação entre os calores específicos a pressão constante e a volume constante
ρ	densidade dos gases no interior da câmara de combustão (kg/m^3)
Λ	comprimento de onda (m)
λ	relação entre lambda real e estequiométrico
τ	tempo (s)
ω	velocidade de crescimento da chama (m/s)
η_θ	número de planos nodais contendo os eixos do cilindro e um diâmetro
η_r	número de cilindros nodais
η_z	número de planos nodais <i>perpendiculares</i> ao eixo do cilindro
θ	distância angular (azimutal)

RESUMO

O fenômeno da detonação observado em motores de combustão interna de ignição por centelha apresenta-se ainda hoje, mesmo depois de quase um século de intensivas pesquisas, como um dos principais desafios a serem superados. Tal fenômeno é uma indicação de severas condições de funcionamento do motor sendo prejudicial ao seu desempenho e podendo, também, resultar em extensivos danos. Detonação é, basicamente, o termo utilizado para descrever o ruído que é transmitido através da estrutura do motor quando ignição espontânea da porção não queimada da mistura acontece. O presente trabalho aborda a metodologia desenvolvida para a caracterização do referido fenômeno em um motor monocilindro de pesquisa. Esta, além da abordagem analítica através da solução gráfica a partir da equação da onda, utiliza parâmetros vibroacústicos para detectar as ondas de pressão geradas no interior da câmara de combustão e que se propagam através da estrutura do motor como ondas vibracionais. O Método de Elementos Finitos (*FEM*) é, também, empregado como suporte para uma melhor compreensão do fenômeno em questão. Os resultados obtidos além de indicarem o mais adequado tipo de sensor para a detecção da detonação indicam também que a metodologia desenvolvida permite que os engenheiros e técnicos obtenham melhores desempenhos do referido motor considerando-se as mais diversas configurações de sistemas de injeção de combustível e de estruturas de fluxo utilizadas nas pesquisas bem como os principais tipos de combustíveis alternativos.

Palavras chave: Detonação, Motor Monocilindro de Pesquisa, Método de Elementos Finitos, Modo Acústico, Motor de Combustão Interna

ABSTRACT

The so-called knock phenomenon in spark ignition reciprocating engines still presents major design challenges even after almost a century of intensive research. Knocking is an indication of severe operational conditions which are detrimental to performance and may also result in extensive damage to the engine. Knock, is basically the term used to describe the noise that is transmitted through the structure of the engine when spontaneous ignition of the unburned portion of the gas takes place. This work describes the methodology developed for the characterization of this phenomenon in a single cylinder research engine. This, besides the analytical approach by graphic solution from the wave equation, uses parameters vibroacustics for detecting pressure waves generated within the combustion chamber and which propagate through the structure of the engine as vibrational waves. The finite element method (*FEM*) is also used as support for a better understanding of this phenomenon. The results also indicate the most suitable type of sensor to detect knock also indicate this methodology allows engineers and technicians to find better performances of this engine, considering the different configurations of fuel injection systems, the diverse types of flow structures and the main types of alternative fuels used in the researches.

Key Words: Knock, Single Cylinder Research Engine, Finite Element Method, Acoustic Mode, Internal Combustion Engine

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a demanda pela utilização de combustíveis alternativos - notadamente, etanol e CNG (*Gas Naturally Compressed*) - tem crescido de forma significativa. Isto se deve, dentre outros fatores, ao crescente estabelecimento de limites normativos cada vez mais rígidos em relação à emissão de gases bem como à necessidade de se repensar a matriz energética com vistas no futuro.

Historicamente, na área automotiva, o Brasil foi pioneiro na utilização de álcool combustível – etanol – quando na década de 70 criou o PRÓALCOOL (Programa Nacional do Álcool). As soluções técnicas para esta tecnologia foram se aperfeiçoando ao longo dos anos até que na década seguinte, no ano de 1985, as vendas de carro a álcool atingiram níveis superiores a 95,8% das vendas totais de veículos de ciclo Otto para o mercado interno (PróAlcool, 2013).

Entretanto, após alguns anos, veio a crise do álcool e os veículos a gasolina retomaram a sua hegemonia no mercado nacional.

Com a retomada do crescimento, foi adotada em 2003 uma solução mais interessante do ponto de vista mercadológico: o lançamento comercial dos primeiros veículos FLEX. Esta solução permitia a utilização tanto de gasolina quanto de etanol bem como de quaisquer proporções de mistura e, praticamente, eliminava o problema do desabastecimento nas épocas de entressafra da cana-de-açúcar. Atualmente, o percentual de veículos Flex produzidos no Brasil chega à marca de 91,3% do total de veículos do ciclo Otto produzidos (Autoesporte, 2013).

Recentemente, a utilização de combustíveis alternativos vem ganhando importância também nas áreas de geração de energia elétrica e térmica. Notadamente na área de geração de energia elétrica, a busca por um substituto para o diesel vem se tornando um desafio para os técnicos e pesquisadores da área. A obtenção de rendimentos compatíveis com os motores diesel em motores utilizando combustíveis alternativos vem se constituindo numa das mais cobiçadas linhas de pesquisa.

À parte o ponto de vista técnico, a utilização do etanol como combustível alternativo – seja para aplicação automotiva seja para fins de geração de energia – traz uma série de vantagens, a saber:

- **sociais:** possibilita a geração de empregos tanto direta quanto indiretamente desde o plantio da cana-de-açúcar até o beneficiamento do etanol;

- **ambientais**: quando comparado a gasolina, previne a emissão na atmosfera de milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) tido como um dos grandes responsáveis pelo aquecimento global através do efeito estufa. Além disto, produz menores emissões de CO e SO₂. Em relação à utilização do diesel apresenta além disto reduzidos níveis de emissão de material particulado (Pérez *et al*, 2006).

Quando comparado aos combustíveis de origem fóssil, o etanol possui ainda a grande vantagem de ser renovável podendo ser uma alternativa economicamente viável ao longo dos anos. Além disto, pode ser produzido a partir de diversos tipos de produtos: cana-de-açúcar, milho, beterraba, mandioca, soja e outros podendo se adequar às mais diversas condições climáticas e de solo implicando em diferentes custos de produção os quais serão específicos e viáveis de acordo com cada mercado específico.

Juntamente com a crescente necessidade de se utilizar combustíveis alternativos, aumentam também a necessidade e a obrigatoriedade de se compreender mais e melhor os fenômenos associados à combustão destes combustíveis.

Em função desta crescente demanda pelo uso de combustíveis alternativos torna-se imperativo o desenvolvimento de conhecimento técnico aprofundado voltado para a sua aplicação em motores de combustão interna. Para viabilizar a sua utilização comercial, o motor movido a combustível alternativo (Etanol ou CNG) deve buscar a equiparação de desempenho com os motores a diesel atualmente utilizados em larga escala no setor de transporte e principalmente na geração de energia.

Uma vez que o poder calorífico do etanol é inferior ao da gasolina e mais inferior ainda com relação ao diesel, torna-se necessário compensar esta desvantagem com razões de compressão tão elevadas quando for possível. Tal busca é determinada principalmente, pela ocorrência do fenômeno da detonação que introduz limites máximos nas razões de compressão restringindo assim a eficiência mais alta que pode ser atingida (Yunlong *et al*, 2010).

Assim, a exata caracterização do fenômeno da detonação torna-se de grande importância nas pesquisas e no desenvolvimento dos referidos motores. Um dos aspectos mais importantes neste contexto é a correta detecção do citado fenômeno. Para tal é necessário conhecer as suas características técnicas tais como a sua intensidade, a localização da sua origem e, principalmente, o seu espectro de frequências. Estas informações são de fundamental importância na definição do mais adequado sistema de detecção da detonação a ser utilizado especificamente na definição dos parâmetros dos filtros a serem adotados (Brunt *et all*, 1998).

O princípio de funcionamento dos motores de combustão interna de ignição por centelha tem sido, desde a sua invenção, exaustivamente estudado e pesquisado pelos técnicos e pesquisadores da área. Considera-se assim suficiente que sejam aqui destacados apenas os aspectos diretamente ligados ao fenômeno da detonação.

É ainda importante lembrar que quando a detonação ocorre existe um grande risco de comprometimento definitivo da integridade estrutural do motor, resultando em grande prejuízo financeiro. Por este motivo qualquer tipo de experimentação deve ser conduzido de forma cuidadosa.

Objetivos e relevância do trabalho

O presente trabalho busca contribuir para uma melhor compreensão do fenômeno da detonação e mais especificamente apresenta os seguintes objetivos.

Objetivo geral:

- Desenvolver uma metodologia para caracterização de um motor de combustão interna de ignição por centelha quando submetido ao fenômeno da detonação.

Objetivos específicos:

- entender de maneira detalhada o fenômeno da detonação: conceito, características, fatores de influência, métodos de detecção, análise, controle e suas consequências;
- identificar/comparar o conteúdo de frequências presente na câmara de combustão provenientes das oscilações de pressão durante a ocorrência do fenômeno da detonação utilizando os seguintes métodos: cálculo analítico, cálculo através do Método de Elementos Finitos (FEM) e medição experimental por meio de sensor de pressão no interior da câmara de combustão, por meio de vela instrumentada e por meio de acelerômetro posicionado em um ponto específico, previamente determinado, do cabeçote do motor;
- identificar o tipo de sensor mais indicado, dentre as alternativas avaliadas experimentalmente, para se detectar de maneira confiável o fenômeno da detonação no motor monocilindro de pesquisa de forma a garantir a sua integridade física bem como dar suporte às pesquisas a serem realizadas;
- identificar as metodologias disponíveis para a detecção experimental do fenômeno da detonação aplicada aos motores de combustão interna;

- identificar as diversas metodologias para análise do fenômeno da detonação aplicada aos motores de combustão interna;
- identificar os diferentes critérios de decisão quanto à ocorrência do fenômeno da detonação aplicada aos motores de combustão interna;
- identificar experimentalmente o nível de desempenho, com ênfase em torque, que pode ser atingido com motores monocilíndricos estacionários.

A sua relevância pode ser melhor explicada levando-se em conta os aspectos anteriormente citados os quais foram considerados na definição de seus objetivos.

A relevância deste trabalho reside no fato de que a compreensão do fenômeno da detonação aplicada ao motor monocilindro de pesquisa é de grande importância para a manutenção da sua integridade física durante a realização das pesquisas bem como fundamental na obtenção de elevados rendimentos com reduzidos valores de consumo de combustível. Além disto, a metodologia inovativa aqui desenvolvida a qual busca o entendimento do processo evolutivo do fenômeno da detonação em função do ângulo do eixo do motor mostra uma boa concordância dos resultados obtidos para os diversos tipos de metodologias utilizadas garantindo, assim, a sua confiabilidade.

Outro aspecto a ser ressaltado é que este trabalho se insere dentro de um contexto maior onde deve necessariamente existir uma interação entre a área experimental, a área de projetos mecânicos e a área de simulação computacional.

Portanto, o mesmo pode ser definido como sendo uma das bases necessárias a um profundo entendimento, tanto técnico quanto científico, do desempenho do motor monocilindro atualmente disponível na empresa para a realização de pesquisas.

Deste modo, o presente texto apresenta as etapas necessárias à caracterização do fenômeno da detonação no referido motor monocilindro de pesquisa. Para facilitar a compreensão do leitor, o mesmo foi dividido em capítulos, sendo a revisão bibliográfica (Capítulo 2) uma abordagem dos principais tópicos relacionados ao fenômeno da detonação, a metodologia empregada (Capítulo 3), os resultados obtidos bem como as suas discussões (Capítulo 4) e as respectivas conclusões e sugestões para futuros trabalhos (Capítulo 5).

Finalmente é importante destacar-se que dada a interdisciplinaridade do presente projeto faz-se necessária uma integração entre os diversos setores de uma empresa ou instituição de pesquisa sem a qual torna-se bastante difícil a realização dos objetivos propostos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A literatura técnica a respeito do funcionamento dos motores de combustão interna é muito vasta e abrange de maneira satisfatória os conhecimentos consolidados até o presente momento. Já em relação ao fenômeno da detonação a mesma observação não se aplica visto que tal fenômeno ainda carece de um maior entendimento e compreensão por parte dos técnicos e pesquisadores sendo, ainda hoje, extensivamente pesquisado em todo o mundo e sendo considerado como um dos maiores desafios a serem superados. Neste trabalho, aborda-se somente os conceitos básicos relacionados à combustão sendo dada ênfase particular à abordagem do fenômeno da detonação.

2.1 Histórico da detonação

Conforme Heywood (1998), o processo de combustão é uma parte importante do ciclo de operação de um motor de combustão interna e deve acontecer numa pequena fração do ciclo completo de modo que o processo de conversão de energia seja eficiente. Especificamente em motores de combustão interna de ignição por centelha, o processo de combustão é uma combinação de fenômenos extremamente complicados. Ele envolve a descarga de um arco elétrico, a oxidação química do combustível, perdas de calor em uma geometria complexa e a influência da turbulência da estrutura de fluxo.

Conforme Bertola *et al* (2006), em se tratando de combustão com a ocorrência de detonação este panorama torna-se ainda mais complexo pois além de todos os fatores anteriormente citados estão envolvidos outros fenômenos de elevada complexidade, a saber:

- ocorrência de elevados níveis de pressão e temperatura no interior do cilindro;
- geração de ondas estacionárias de pressão no interior da câmara de combustão;
- reflexão, nas paredes do cilindro, das ondas de pressão geradas pela ocorrência da detonação criando um complexo perfil de ondas de pressão na câmara de combustão;
- transmissão das vibrações originadas na câmara de combustão para o bloco do motor.

Na literatura consultada, encontram-se disponíveis informações relatando o histórico do referido fenômeno o qual tem sido observado, ao longo dos anos, por técnicos e pesquisadores de todo o mundo.

Segundo Draper (1938), a detonação foi primeiramente estudada por Midgely e Boyd cujo trabalho foi descrito em 1922. Desde então, muitos técnicos e pesquisadores têm buscado o seu melhor entendimento utilizando os mais variados métodos e técnicas.

De acordo com Nates e Yates (1994), a combustão com detonação é um fenômeno bem conhecido e estudado ao longo dos anos mas somente recentemente tem sido explicado como um processo de autoignição.

Segundo Syrimis *et al* (1996), a detonação é um problema tão antigo quanto o próprio motor de combustão interna. Enquanto no passado, a necessidade de controlá-la era definida por fatores de confiabilidade e durabilidade, atualmente, as suas estratégias de controle são principalmente dirigidas para a obtenção de eficiências térmicas e valores de potência mais elevados.

Segundo Fitton e Nates (1996), de acordo com os conhecimentos tradicionais, a detonação é normalmente referenciada como um fenômeno prejudicial ao motor. Tal fato faz com que os motores operem dentro de elevadas margens de segurança comprometendo custos de produção e consumo de combustível. Entretanto, segundo Kaelblein *et al* (1990), a sua influência pode ser entendida como benéfica, prejudicial ou destrutiva (em função da sua intensidade e ocorrência).

Segundo Russ (1996), o fenômeno da detonação (*knock*) em motores de combustão interna (*ICE*) de ignição por centelha (*SI*) tem sido, ao longo dos anos, tão estudado quanto o motor propriamente dito.

Segundo Burgdorf e Denbratt (1997), durante os primeiros anos de desenvolvimento dos motores a combustão interna de ignição por centelha, a detonação era difícil de ser predita bem como difícil de ser detectada visto que o único meio para tal era o ouvido treinado de algum técnico experiente. Além disto, a detonação poderia ter sido reconhecida se a combustão considerada normal tivesse sido melhor entendida.

Conforme Grandim e Denbratt (2002), a detonação tem sido o foco de atenção por parte de muitos pesquisadores por mais de um século. Entretanto, somente recentemente é que o entendimento dos mecanismos complexos que levam à detonação está começando a ser desvendado. Ainda segundo os mesmos autores, a detonação é citada como um dos fatores que limitam a obtenção de eficiências mais elevadas em motores com ignição por centelha (*SI*).

Conforme Hettinger *et al* (2010), a combustão com a ocorrência de detonação acompanha o desenvolvimento do motor de combustão interna de ignição por centelha desde a sua invenção.

2.2 Definição de detonação

A combustão com detonação pode ser entendida sob diversos pontos de vista e, conseqüentemente, pode ser definida de várias maneiras diferentes, a saber:

- segundo Rothe *et al* (2006), a detonação ocorre, independentemente do processo de formação da mistura, tanto em motores naturalmente aspirados quanto em motores turboalimentados bem como em motores com injeção direta de combustível (*DI*) ou em motores com injeção de combustível nos pórticos (*PFI*). Por isto, tal fenômeno é uma questão fundamental nos modernos motores de ignição por centelha;
- segundo Mazoyer *et al* (2003), o fenômeno da detonação consiste numa ignição espontânea do gás não queimado, antes que a combustão normal seja completada, a qual gera picos de energia de curta duração de uma maneira descontrolada;
- segundo Heywood (1998), detonação é a denominação dada ao ruído que é transmitido por meio da estrutura do motor quando essencialmente a ignição espontânea da porção do gás não queimado – mistura de combustível, ar e gás residual à frente da chama em processo de propagação – acontece;
- conforme Syrimis *et al* (1996), detonação pode ser definida como a autoignição espontânea da mistura do gás não queimado a qual resulta em valores excessivos da pressão no cilindro e da temperatura na câmara de combustão;
- segundo Russ (1996), detonação é definida como a combustão anormal no gás não queimado antes da chegada da frente de chama turbulenta;
- conforme Puzinauskas (1992), detonação, definida de forma mais genérica, é o modo de combustão indesejável que se origina espontânea e esporadicamente no motor, produzindo pulsos agudos de pressão associados ao movimento vibratório da mistura e com som característico a partir do qual o fenômeno deriva o seu nome (*knock*).

2.3 Teoria da detonação

Segundo Puzinauskas (1992), existem basicamente três teorias referentes ao fenômeno da detonação que buscam determinar a sua origem, a saber:

- teoria da autoignição: a mistura não queimada posicionada à frente da chama oriunda da vela de ignição (chama principal) atinge uma temperatura elevada a tal ponto que sofre um processo de autoignição em um ou mais pontos;

- teoria da detonação: a frente de chama normal sofre uma transição de deflagração subsônica para uma detonação supersônica acoplada a uma onda de choque;
- teoria do rápido arraste: a frente de chama normal é acelerada para altas, mas ainda subsônicas velocidades causando rápidas taxas de elevação de pressão.

Ainda segundo o mesmo autor, as teorias da autoignição e da detonação possuem aceitação geral na literatura mas a teoria da autoignição é considerada a causa mais comum de detonação.

Segundo Pan e Sheppard (1994), é geralmente aceito que a autoignição é o precursor da detonação onde o termo autoignição descreve a ignição espontânea de alguma parte do gás não queimado na câmara de combustão (ignição outra que a proveniente da centelha da vela de ignição).

Também Grandin e Denbratt (2002), confirmam que, atualmente, é geralmente aceito que a detonação em motores de ignição por centelha é causada pela autoignição na mistura não queimada.

Segundo Mazoyer *et al* (2003), sendo o fenômeno da detonação uma reação termodinâmica local, a mesma induz a evolução de vários parâmetros físicos. Um deles é um aumento localizado e muito rápido da pressão a qual comporta-se como uma fonte monopolar acústica transiente. Uma onda acústica que se propaga é, desta forma, gerada tendo um padrão cilíndrico (entre o pistão e o cabeçote) antes de alcançar a parede do cilindro. Após isto, as reflexões tornam o campo acústico muito mais complexo.

Ainda com relação à reflexão das ondas de pressão, segundo Rothe *et al* (2006), as paredes do cilindro refletem as ondas de pressão geradas em função da ocorrência da detonação criando um complexo perfil de ondas de pressão na câmara de combustão. Em complemento a este raciocínio, segundo Hettinger e Kulzer (2009), apenas a primeira onda de pressão propagando-se é de interesse na análise da detonação.

2.4 Características da detonação

Para a completa caracterização da detonação é necessário abordar tal fenômeno de maneira abrangente considerando os principais aspectos envolvidos na sua ocorrência. Neste sentido, ênfase especial deve ser dada à determinação do conteúdo de frequências sendo que itens como os fatores de influência, as maneiras de se evitar e os seus efeitos necessitam ser considerados.

2.4.1 Conteúdo de frequências

Do ponto de vista acústico, a determinação do conteúdo de frequências presente na onda de pressão no interior da câmara de combustão durante a ocorrência da detonação é uma das mais importantes informações a ser obtida pois dela dependerá a eficiência dos métodos de detecção e análise da detonação. Segundo Brunt *et al* (1998), o bom entendimento dos modos acústicos é muito útil na medição e análise dos dados de detonação particularmente em relação aos efeitos de filtragem e, também, na definição da melhor localização para os transdutores de pressão.

Segundo Carstens-Behrens *et al* (2002), as ressonâncias das câmaras de combustão de motores de combustão de ignição por centelha são levemente excitadas durante a combustão normal mas fortemente excitadas durante a detonação.

Basicamente existem três diferentes maneiras para se determinar o conteúdo de frequências oriundo ou presente na câmara de um motor de combustão interna, a saber:

- matematicamente: utilizando-se o método analítico para a solução da equação da onda;
- computacionalmente: utilizando o Método de Elementos Finitos (*FEM*);
- experimentalmente: por meio da medição do sinal da pressão no interior da câmara de combustão ou do sinal de vibração no cabeçote ou no bloco do motor.

2.4.1.1 Método matemático

Tal método é viável somente para geometrias de câmaras de combustão simplificadas ou quando é possível considerar a câmara de combustão como uma geometria perfeitamente cilíndrica.

Historicamente, as ressonâncias de cavidade provenientes da detonação em motores a gasolina foram, ainda segundo Hickling *et al* (1983), primeiramente estudadas por Draper (1938) que realizou uma análise das mesmas bem como medições dos modos mais baixos em um motor monocilindro de pesquisa. Ele utilizou a solução analítica da equação da onda para um cilindro fechado com bases planas para o cálculo das frequências associadas aos vários modos de vibração induzidos pela detonação.

Conforme citado em Draper (1938), a predição dos tipos de ondas de pressão presentes na câmara de combustão quando da ocorrência da detonação implica na obtenção de uma solução da equação da onda sonora para determinadas condições de contorno. Tal procedimento envolve as seguintes suposições:

- a amplitude da onda de pressão decorrente da detonação é pequena comparada à pressão média no interior do cilindro;
- a velocidade, normal às paredes do cilindro, das partículas da mistura presente na câmara de combustão é nula.

Matematicamente, conforme citado em School *et al* (1998), a equação da onda é dada pela EQ. (2.1):

$$\nabla^2 p + \frac{W^2}{V^2} p = 0 \quad (2.1)$$

onde:

p : pressão no interior da câmara de combustão (kg/ms^2);

$W = 2\pi f$: frequência angular (rad/s);

V : velocidade do som (m/s), calculada a partir da EQ. (2.2):

$$V = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (2.2)$$

onde:

γ : relação entre os calores específicos a pressão constante e a volume constante;

ρ : densidade dos gases no interior da câmara de combustão (kg/m^3);

P : pressão de equilíbrio no interior da câmara de combustão (kg/ms^2).

Segundo Eng (2002), podem ser excitados, basicamente, três diferentes tipos de modos acústicos, a saber:

- circunferencial: onde os nós formam planos longitudinais passando por meio dos diâmetros do cilindro. É também denominado tangencial conforme Blunsdon e Dent (1994) ou azimutal conforme Puzinauskas (1992);
- radial: onde os nós formam planos estendendo-se a partir de círculos concêntricos com o eixo do cilindro;
- axial: onde os nós formam planos longitudinais perpendiculares ao eixo do cilindro.

Dentre estes três possíveis tipos de modos acústicos, os modos axiais são raramente excitados visto que, em torno do ponto morto superior (PMS) ou *Top Dead Center (TDC)*, a relação entre a altura (h) (a qual é dependente da posição do pistão e, conseqüentemente, do ângulo do eixo do motor) e o raio da cavidade cilíndrica (r) formada (geometria aproximada) é pequena. Ainda segundo Blunsdon e Dent (1994),

isto é verdadeiro quando $h/r < 1,6$. A mesma situação acontece, segundo Bengisu (2002), para um valor da referida relação $h/r < 1,7$. A FIG. 2.1 ilustra tal condição.

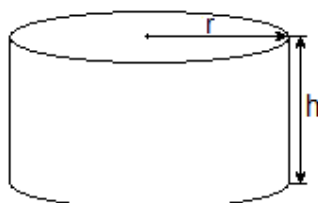


FIGURA 2.1 – Forma aproximada da cavidade cilíndrica

Segundo Scholl *et al* (1997), as frequências relativas aos modos axiais dependem do ângulo do eixo do motor enquanto aquelas relativas aos modos radiais e circunferenciais são independentes dele.

Os vários tipos de modos acústicos podem ocorrer de maneira isolada ou de maneira combinada. A FIG. 2.2 ilustra a forma de alguns modos acústicos radiais, modos circunferenciais e modos combinados.

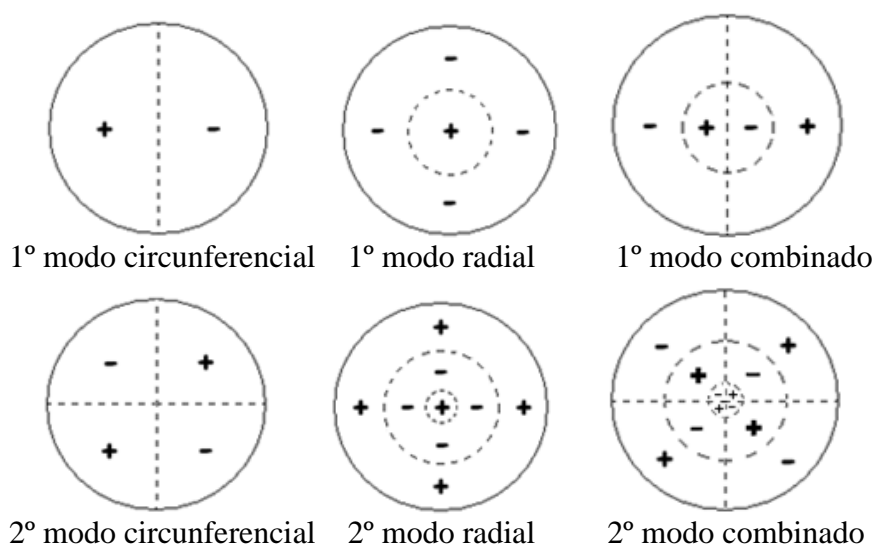


FIGURA 2.2 – Modos acústicos

Os sinais positivos e negativos identificam as fases relativas dos antinodos enquanto as linhas e círculos pontilhados representam os nodos.

Em relação aos modos circunferenciais, segundo Hickling *et al* (1983) os mesmos são degenerados - também chamados emparelhados segundo Eng (2002) - no sentido que não é possível saber onde o diâmetro modal estará posicionado (considerando-se a situação idealizada da câmara de combustão perfeitamente cilíndrica). Mas, para câmaras reais, a sua localização é determinada por assimetrias na

sua geometria as quais separarão cada modo degenerado em dois componentes, cada um com um diâmetro modal distinto. Além disto, segundo Blunsdon e Dent (1994), também os volumes das misturas queimada e não queimada, as temperaturas das superfícies e a cavidade da vela de ignição afetarão tal posicionamento.

Os modos nas câmaras de combustão consistirão na superposição destes dois componentes e as suas frequências vão diferir de um valor pequeno, usualmente menos de 10% para o primeiro modo circunferencial e, representarão os valores máximo e mínimo das frequências que podem existir para um determinado modo considerado.

Já os modos radiais não são degenerados e não se dividem em componentes nas câmaras de combustão reais.

Segundo Hickling *et al* (1983), as ressonâncias numa câmara de combustão são essencialmente acústicas, na sua natureza, porque as suas amplitudes são pequenas, comparadas à pressão média no cilindro quando da ocorrência da detonação.

Segundo Eng (2002), a mais baixa frequência de ressonância presente no cilindro é aquela correspondente ao primeiro modo circunferencial o qual contém a maioria da energia presente na onda de pressão. Como resultado, esta é a frequência na qual mais pesquisadores tem se concentrado ao quantificar a intensidade da detonação.

2.4.1.2 Método computacional

Na literatura consultada, vários autores ressaltam a necessidade e a obrigatoriedade de se utilizar o Método de Elementos Finitos (*FEM*) para se determinar as frequências de ressonâncias das câmaras de combustão de motores reais.

Scholl *et al* (1998) ressaltam que devido às dificuldades práticas de se medir, em diversos pontos, a pressão no interior de uma câmara de combustão de um motor de combustão interna, os modos acústicos devem ser modelados utilizando-se *FEM*.

Segundo Schmillen e Rechs (1991), a determinação das frequências de ressonância de câmaras de combustão com geometria complexa devem ser analisadas utilizando-se *FEM*.

Segundo Scholl *et al* (1997), tanto nos motores de combustão de ignição por centelha quanto nos motores de combustão por compressão, o perfil dos modos acústicos durante a detonação é decrescente e dependem, basicamente, de dois fatores:

- geometria da câmara de combustão: o pistão atua como um dos limites para a reflexão das ondas e define o volume dos respectivos modos acústicos (ondas estacionárias de

pressão) na câmara de combustão. O seu movimento aumenta o comprimento de onda (e consequentemente reduz o valor da respectiva frequência) de alguns dos modos da detonação (especificamente os modos axiais);

- velocidade do som nos gases de combustão: o movimento do pistão na fase de expansão leva ao resfriamento dos gases queimados e, assim, reduz a velocidade do som na câmara de combustão produzindo um espectro de frequências proporcionalmente decrescente para todos os modos acústicos.

Também em Zhang e Tomota (2000), utilizando os mesmos argumentos, é ressaltado o perfil decrescente dos valores das frequências de ressonâncias provenientes da detonação.

Quanto à energia envolvida no fenômeno da detonação, segundo Shi (2005), resultados de simulação computacional indicam que os dois primeiros modos acústicos possuem a maioria da energia acústica e, assim, a pressão referente à detonação tem seu valor máximo naquelas frequências.

2.4.1.3 Método experimental

A determinação experimental do conteúdo de frequências presente na câmara de combustão durante a ocorrência da detonação é, sem dúvida, o método mais complexo de ser implementado embora seja o mais vantajoso no sentido de ser o método mais realista possível. Ele envolve uma série de fatores como a definição de critérios para a escolha do sensor, a definição do seu posicionamento, a utilização ou não de refrigeração para o sensor, a definição do sensor de referência e a execução do *pegging* (procedimento experimental para referenciar a saída do sensor de pressão, no interior da câmara de combustão, para um nível de pressão absoluta conhecida), dentre outros. Todos estes fatores podem influenciar a qualidade dos sinais aquisitados e, consequentemente, as análises e as conclusões. Analogamente, a maioria das observações são válidas também para a utilização de acelerômetros no bloco ou no cabeçote do motor.

Patterson and Davis (2009) comentam sobre o atual estado da arte dos sistemas de medição de pressão no interior da câmara de combustão. Eles ressaltam que a garantia da qualidade dos dados adquiridos envolve uma atividade trabalhosa, fastidiosa e que abrange uma série de cuidados frequentes na limpeza dos acessórios de medição envolvidos.

Conforme Witze e Green (1993), o fato da pressão medida no interior da câmara de combustão depender fortemente do posicionamento do sensor é a principal razão para a persistente controvérsia relativa à definição dos vários índices de intensidade de detonação. Ainda segundo o mesmo autor, o modo acústico mais baixo que pode ocorrer é o 1º modo circunferencial o qual é, também, o mais frequentemente atribuído à detonação no motor.

Segundo Hickling *et al* (1983), a oscilação de alta frequência presente na curva de pressão é devida às ressonâncias excitadas na câmara de combustão pela prévia e rápida elevação de pressão.

2.4.2 Fatores de influência da detonação

Conforme citado em Schelling e Geisselbrecht (2000), o fenômeno da detonação deve ser avaliado do ponto de vista estatístico dada a natureza altamente irregular dos ciclos de operação de um motor de combustão interna.

Neste sentido, na literatura consultada, vários autores identificam os fatores que influenciam a ocorrência e a severidade da detonação.

Segundo Valtadoros *et al* (1991), o projeto do motor, a composição do combustível e as condições de operação afetam o princípio e a severidade da detonação de uma maneira complexa devido ao processo de propagação da chama, à transferência de calor para as paredes do cilindro, à não uniformidade da mistura não queimada e à cinética química da ignição.

Segundo Blunsdon e Dent (1994), a localização da vela de ignição e do movimento de *swirl* da mistura influenciam a localização circunferencial do gás não queimado da periferia da câmara de combustão e, assim, a posição na qual a autoignição (e possivelmente a detonação) ocorre.

Segundo Heywood (1998), a ocorrência da detonação e conseqüentemente a sua severidade, dependem das características do motor e da capacidade de resistência do combustível à ocorrência da mesma.

Conforme citado em Lee *et al* (1998), a intensidade da detonação depende fortemente das condições de operação do motor, da localização do sensor de detonação utilizado e das características do combustível.

Segundo Rothe *et al* (2006), o comportamento da detonação pode ser

fortemente afetado pelas características da combustão (duração, localização do gás não queimado e variabilidade cíclica), pela estrutura de fluxo da mistura na câmara de combustão (*swirl* ou *tumble*) e pelo processo de formação da mistura (*DI* ou *PFI*) em termos da não homogeneidade e da distribuição de temperatura. Os autores citam ainda que pelo fato dos centros de autoignição estarem muito próximos das paredes da câmara de combustão, os processos de autoignição não são influenciados pela frente de chama devido a sua separação espacial.

Conforme Mittal *et al* (2007), é bem conhecido que a pressão e a temperatura do gás não queimado, a razão de propagação da chama bem como a distância a percorrer (efetivamente, o tempo de propagação da chama a partir da localização da vela de ignição até a parede mais distante da câmara de combustão) são variáveis fundamentais do fenômeno da detonação. Certamente, a composição do combustível, a qual determina as condições nas quais o mesmo autoignita, é também importante.

2.4.3 Maneiras de se evitar a detonação

Conforme citado no Item 2.4.2, a ocorrência do fenômeno da detonação em motores de combustão interna de ignição por centelha pode ser influenciada por diversos fatores. Do mesmo modo, na literatura consultada, vários autores enumeram as principais alternativas para se evitar e/ou suprimir a ocorrência da mesma.

Yunlong *et al* (2010), propuseram o conceito de mistura estequiométrica estratificada (SSM) como uma alternativa para se evitar a ocorrência da detonação em motores de ignição por centelha com injeção direta de combustível (*DISI*) para condições de funcionamento em cargas elevadas. Tal alternativa consiste em se criar no momento da ignição, por meio de uma segunda injeção de combustível, uma região rica na mistura em torno da vela de ignição e uma mistura pobre nas outras áreas da câmara de combustão incluindo o gás residual. Porém, é mantida estequiométrica a razão ar/combustível da mistura total. A região rica tende a acelerar a velocidade de queima da chama enquanto o gás residual suprime a tendência à autoignição sendo que tais efeitos combinados diminuem a intensidade da detonação.

Em relação aos métodos tradicionais para se evitar e/ou suprimir a ocorrência da detonação em motores de combustão interna, os mesmos autores enumeram algumas de suas vantagens e desvantagens, a saber:

- melhoria da qualidade do combustível (aumento do número de octano), retardo do ângulo de avanço de ignição, enriquecimento da mistura e otimização da geometria da câmara de combustão: são considerados como métodos de supressão de detonação que já atingiram o seu limite além de poderem causar efeitos negativos na potência de saída do motor, nos níveis de emissões gasosas e no consumo de combustível;
- utilização de *EGR* resfriada: considerado um método promissor embora cause redução na densidade de potência e aumento da complexidade do sistema motor;
- utilização de motor com razão de compressão variável: considerado um método ideal porém a complexidade da estrutura necessária o torna economicamente inviável;
- utilização de combustíveis misturados a componentes de alto octano tais como etanol, metanol e outros: método aplicável somente para determinados tipos de mercado.

Em Yoshimatsu *et al* (2008) são mostradas as melhorias das propriedades anti-detonação em motores de injeção direta pelo aumento da velocidade da combustão a qual é obtida promovendo-se a homogeneização da mistura ar-combustível. Esta, foi realizada de dois modos diversos: por meio de elevado movimento de *tumble* e por meio da utilização de spray em forma de leque duplo (*dual fan-shaped spray*).

2.4.4 Efeitos da detonação

Conforme Kaelblein *et al* (1990), os efeitos da ocorrência da detonação em motores de combustão interna de ignição por centelha podem ser classificados, dependendo da sua ocorrência e intensidade, em três diferentes tipos:

- efeito benéfico;
- efeitos prejudiciais;
- efeitos destrutivos.

Entende-se por efeito benéfico, ainda segundo Kaelblein *et al* (1990), a elevação do valor da Pressão Média Efetiva Indicada (*IMEP*) a qual é devida ao aumento da eficiência de conversão de energia. Tal aumento é causado pela aceleração da propagação da frente de chama que, por sua vez, implica numa rápida troca de calor, particularmente fora do gás residual, nas proximidades do PMS. Isto normalmente acontece em condições de detonação leve ou incipiente sendo que, na ausência de detonação, a propagação da frente de chama é comparativamente mais lenta devido à baixa movimentação da mistura e, também, ao movimento descendente do pistão.

Em relação aos efeitos prejudiciais da detonação, cita-se a redução da potência

de saída do motor a qual é devida à troca descontrolada de calor, à elevação da transferência de calor e do atrito e, simultaneamente, ao aumento dos níveis de emissões gasosas.

Por fim, no tocante aos efeitos destrutivos causados pela presença de elevados níveis de detonação, Heywood (1998) e Kaelblein *et al* (1990) citam os seguintes danos à integridade física dos motores:

- fusão e/ou quebra dos anéis do pistão;
- falha da junta do cabeçote;
- erosão da parte superior do pistão;
- furos e/ou fusão do pistão;
- fusão da vela de ignição;
- deformação das válvulas.

Tais efeitos ocorrem quando o pico de pressão no interior da câmara de combustão (e conseqüentemente a temperatura da mistura) e a sua respectiva variação aliados à debilitada resistência mecânica dos componentes causada pela remoção do tratamento superficial sobre a parede da câmara de combustão são muito elevados.

Segundo Heywood (1998), níveis incipientes de detonação não tem nenhum efeito no desempenho do motor ou na sua durabilidade. Entretanto, níveis elevados de detonação podem levá-lo a danos irreparáveis.

2.5 Simulação Computacional

Segundo Teraji *et al* (2009), o desenvolvimento de um motor de combustão interna para aplicação automotiva tem se baseado na necessidade de se melhorar o seu desempenho em um curto período de tempo. Tal fato relaciona-se aos recentes aumentos dos preços dos combustíveis, ao rápido crescimento da consciência ambiental e aos ciclos de vida do produto cada vez mais curtos. Sendo assim, enormes esforços têm sido realizados na utilização de simulação numérica no desenvolvimento de novos motores. Tais esforços tendem a se estender para todas as outras áreas de aplicações dos motores de combustão interna.

Segundo Lafossas *et al* (2002), em função das dificuldades encontradas para se instrumentar um motor para determinar o início da autoignição, o modelamento da detonação por meio de simulação *CFD 3D* (*Computational Fluid Dynamics*

Tridimensional) pode ser uma poderosa ferramenta para se entender e tentar evitar o referido fenômeno.

Ainda segundo Lafossas *et al* (2002), uma das dificuldades para a validação dos modelos computacionais de um motor de combustão interna de ignição por centelha quanto à detonação é a influência da variabilidade cíclica típica de seu funcionamento. No intuito de se superar tal dificuldade, segundo os mesmos autores, normalmente os modelos computacionais se utilizam de uma abordagem em torno do ciclo médio.

Os mesmos autores mostram, em seu trabalho, que a utilização de um modelo baseado em um mecanismo químico relativamente simples, é capaz de fornecer boas estimativas globais e reproduzir todas as tendências experimentais. Além disto, com tal modelo, a localização da ocorrência da detonação pode ser determinada e utilizada para orientar as alterações no seu sistema de refrigeração e na sua geometria.

Ainda segundo tais autores, o desenvolvimento de um modelo de autoignição que seja suficientemente real para ser considerado válido, mas simples o suficiente para ser utilizado em um cálculo de um motor tridimensional, é um difícil desafio para o qual ainda não se tem uma resposta satisfatória.

Dentro deste contexto, os modelos computacionais atualmente desenvolvidos buscam simular e, conseqüentemente, compreender mais detalhadamente os vários parâmetros que influenciam a ocorrência da detonação. Exemplo disto pode ser visto em Teraji *et al* (2009), cujo estudo confirmou que os diversos tipos de estruturas de fluxo no cilindro alteram a forma de propagação da chama influenciando fortemente a ocorrência da detonação.

Deve ser ressaltado, por último, que a utilização da simulação computacional possui uma grande importância nas pesquisas envolvendo motores de combustão interna pois permite que se faça um maior número de testes e de maneira mais rápida, muitos dos quais seriam caros ou inviáveis por experimentação.

2.6 Métodos de detecção da detonação

Segundo Puzinauskas (1992), as características de um método ideal para a detecção de detonação deveria atender aos seguintes requisitos:

- ser rápido em termos computacionais;
- indicar a severidade da detonação por meio de grandezas físicas familiares;

- relacionar a severidade da detonação de forma lógica com o seu efeito na estrutura do motor;
- ser independente da localização do transdutor utilizado;
- ser resistente à interferência de sinais;
- fornecer uma correta distinção entre a condição de ocorrência ou não da detonação e identificar onde a mesma se inicia no ciclo.

Entretanto, em termos práticos, somente algumas das características acima elencadas são atendidas simultaneamente nos métodos de detecção de detonação atualmente disponíveis.

Lee *et al* (1998) ressaltam que para se detectar a detonação de maneira mais correta deve-se remover, do sinal em análise, o ruído de fundo tanto quanto seja possível. Um modo de se conseguir este objetivo é aplicar filtros passa-banda estreitos cujas frequências de centro sejam as frequências de ressonâncias das ondas de pressão da câmara de combustão devidas à ocorrência da detonação.

Pelo fato da detonação se constituir, ainda hoje, numa das principais restrições ao desempenho e à eficiência dos motores de combustão interna, a sua detecção e análise, segundo Millo e Ferraro (1998), é um tema crucial no desenvolvimento tanto de combustíveis quanto de motores. Alguns métodos têm sido propostos e utilizados para tal objetivo e podem ser agrupados, ainda segundo os mesmos autores, em diferentes categorias de acordo com a grandeza física utilizada na detecção da detonação, a saber:

- métodos baseados na medição da vibração no bloco do motor;
- métodos baseados na medição da pressão no interior da câmara de combustão;
- métodos baseados na medição da corrente de ionização;
- métodos baseados no cálculo da transferência de calor.

Alem destes métodos, existe uma outra categoria que se baseia na medição do ruído radiado pelo motor a qual é, ainda hoje, em alguns casos utilizada no desenvolvimento de motores.

Em complemento às metodologias anteriormente citadas, as técnicas óticas e os motores parcialmente transparentes tem se constituído, nos últimos anos, em ferramentas adequadas na investigação dos fenômenos fluidodinâmicos e térmicos que caracterizam a detonação.

Por último, alguns métodos menos aplicados na prática que podem ser ainda citados são aqueles baseados na temperatura da água de refrigeração e aqueles baseados na temperatura dos gases de escape.

Segundo Naber *et al* (2006), dentre os diversos métodos normalmente utilizados para a detecção da ocorrência da detonação, os mais comumente utilizados baseiam-se na medição da vibração no bloco do motor e na medição da pressão no interior na câmara de combustão. A maioria das aplicações comerciais utiliza o acelerômetro montado no bloco do motor para medir as vibrações transmitidas a partir das oscilações de pressão no interior da câmara de combustão resultantes da detonação.

Tal escolha, segundo Puzinauskas (1992), está associada às restrições econômicas impostas aos sistemas embarcados de detecção de detonação. Ainda segundo ele, em função do crescente aumento do custo computacional destes processadores somente a aplicação de transdutores economicamente favoráveis (acelerômetros) se justifica, em detrimento das vantagens associadas às informações mais completas obtidas a partir da medição da pressão no interior do cilindro.

Entretanto, o próprio autor comenta que os requisitos de emissões (limites legislativos) e de economia de combustível poderão, no futuro, sobrepor as barreiras econômicas e justificar a utilização, nos sistemas embarcados de controle de detonação, de sensores para a medição da pressão no interior da câmara de combustão.

Ainda segundo Puzinauskas (1992), em relação à utilização do sistema de detecção de detonação baseado na medição da pressão no interior da câmara de combustão, o mesmo é principalmente aplicado em pesquisas de desenvolvimento de motores onde são requeridos maiores detalhes da curva de pressão de combustão de cada cilindro individualmente (quando aplicado a motores multicilindros).

2.6.1 Métodos baseados na medição da vibração no bloco do motor

Segundo Borg *et al* (2006), métodos indiretos de detecção da detonação, como por exemplo por meio da medição da vibração no bloco do motor são, tipicamente, utilizados na detecção on-line de eventos de detonação presentes no interior da câmara de combustão.

Segundo Naber *et al* (2006), a maioria das aplicações comerciais utilizam acelerômetros montados no motor para medir as vibrações transmitidas a partir das oscilações de pressão no interior da câmara de combustão - resultantes da detonação - para a estrutura do mesmo.

Ainda segundo o mesmo autor, nos métodos de detecção da detonação

baseados na medição da vibração no bloco do motor pode-se utilizar somente um ou diversos acelerômetros. Em ambos os casos, um sistema de referência deve ser empregado e uma das métricas mais comumente utilizada é a intensidade do sinal da pressão na câmara de combustão medida em uma faixa de frequência adequada.

Deve ser ressaltado que pelo fato do acelerômetro detectar outras fontes de vibração além daquela associada à detonação (por exemplo, vibração produzida pelo fechamento das válvulas e pelo *piston slap*), a qualidade do sinal varia significativamente de motor para motor, de cilindro para cilindro e, também, em função das condições de operação do motor.

Outro aspecto que deve ser considerado neste método é o posicionamento do(s) acelerômetro(s) no motor. Segundo Forbes *et al* (1995), o sensor deve ser posicionado onde as vibrações provenientes da detonação sejam significativas em relação às vibrações presentes no motor oriundas de outras fontes. De modo geral, um motor não é projetado considerando-se um sistema para detecção de detonação. Ao contrário, o acelerômetro é posicionado em função apenas dos custos e do *lay-out* disponível no motor. Ressalta-se, ainda, a experiência dos engenheiros experimentais e de projeto.

Entretanto, ainda segundo o mesmo autor, alguns métodos tem sido empregados na determinação da localização ótima para o sensor de vibração. Um deles é a Holografia a Laser a qual pode ser definida como um método fotográfico de se medir as vibrações e deformações tridimensionais de um objeto em análise. Outro, segundo Bengisu (2002) e Shi (2005), é a utilização do Método de Elementos Finitos.

Segundo Schmillen e Rechs (1991), as amplitudes do sinal de vibração detectadas pelo acelerômetro, causadas pelas ressonâncias no interior da câmara de combustão, dependem da função de transferência do bloco do motor. Deste modo, algumas frequências de excitação dos modos naturais da câmara de combustão não serão capazes de excitar a estrutura do motor não sendo, conseqüentemente, captadas pelo acelerômetro.

2.6.2 Métodos baseados na medição da pressão no interior da câmara de combustão

Conforme Heywood (1998), o comportamento da pressão no interior da câmara de combustão de um ciclo individual do motor é uma fonte útil de informações quanto à ocorrência da detonação (principal fonte experimental de informações).

Segundo Kulzer *et al* (2009), tal comportamento é a base para qualquer

desenvolvimento conceitual de combustão e, também, para a análise das suas características.

Segundo Lee *et al* (1998), de modo geral, a análise da pressão no interior da câmara de combustão fornece a informação mais correta em relação à detonação. Em função disto, os métodos de detecção da detonação baseados na medição da pressão no interior do cilindro tem sido largamente aplicados na pesquisa e desenvolvimento de motores. Entretanto, ainda hoje, existem discordâncias sobre os métodos de caracterização e processamento dos sinais de pressão tais como filtragem, escolha dos tipos de janelas, definição dos limites e da intensidade da detonação.

Conforme Randolph (1994), a partir das medições da pressão no cilindro, pode-se obter informações referentes ao equilíbrio entre cilindros (em motores multicilindros), variabilidade cíclica do torque, a ocorrência da detonação, o carregamento estrutural, a sintonia da aspiração e a exaustão, a eficiência térmica e a variabilidade cíclica de enchimento. Deste modo, os especialistas podem compreender detalhadamente o processo de combustão e obter melhorias quantitativas no desempenho de um motor evitando, assim, o lento, cansativo e caro processo de tentativa e erro.

Entretanto, as informações obtidas a partir da sua medição são dependentes, dentre outros, dos seguintes fatores: o posicionamento do sensor na câmara de combustão, o seu princípio de funcionamento, o tipo de sensor utilizado e o tipo de montagem empregado. Muitos trabalhos abordam este assunto na literatura consultada.

Segundo Bertola *et al* (2006), o posicionamento do sensor de pressão na câmara de combustão é de fundamental importância para a correta medição do fenômeno da detonação (determinação do momento da sua ocorrência e amplitude da onda de pressão). Já o tipo de sensor é considerado de importância secundária. Neste sentido, a amplitude da onda de pressão é mais alta na área da parede da câmara de combustão no lado oposto ao centro da detonação. Isto porque, neste caso, a reflexão da onda de pressão é que será principalmente medida. Portanto, tal posição deve ser evitada. Ao contrário, o posicionamento do sensor no centro da câmara de combustão é recomendado para a determinação precisa do momento da ocorrência da detonação.

Segundo Heywood (1998), pelo fato das flutuações de pressão serem consequência do fenômeno da propagação de onda, a localização do transdutor de pressão em relação à localização da detonação e à geometria da câmara de combustão afeta a amplitude máxima da flutuação de pressão a ser registrada em um experimento.

Em relação ao princípio de funcionamento do tipo de sensor de pressão a ser empregado existem disponíveis comercialmente várias opções sendo o piezoelétrico. Segundo Randolph (1994) o mais largamente utilizado dada a sua elevada precisão, estabilidade de resposta em função da frequência e durabilidade.

Segundo Bertola *et al* (2006), a ampla faixa de medição, a influência térmica mínima e a elevada frequência natural fazem do sensor de pressão piezoelétrico a tecnologia padrão para a medição da pressão em motores de combustão interna.

Em relação ao tipo de sensor a ser empregado na medição da pressão no interior do cilindro, basicamente, existem três diferentes tipos, a saber:

- vela instrumentada (vela de ignição dotada de sensor de pressão ou *spark plug sensor*)
- sensor de pressão dotado de um sistema de refrigeração
- sensor de pressão sem refrigeração.

2.6.2.1 Vela instrumentada

Este tipo de sensor, como o próprio nome indica, caracteriza-se pela presença de um sensor de pressão diretamente acoplado ao corpo da vela de ignição.

Tal sensor de pressão possui a grande vantagem de não necessitar de adaptações no cabeçote do motor visto que a sua montagem pode ser prevista com antecedência ainda na fase de projeto do motor. A FIG. 2.3 ilustra um exemplo da referida vela disponível no mercado onde pode ser visto a localização do sensor.



FIGURA 2.3 – Vela dotada de sensor de pressão (Referência AVL 2008)

A utilização da vela instrumentada (*spark plug sensor*), segundo Randolph (1990), se por um lado sacrifica a exatidão da curva de pressão a ser medida por outro tem a grande vantagem de não necessitar de nenhuma adaptação para a sua montagem particularmente quando aplicada em motores já existentes.

Segundo Bertola *et al* (2006), em relação à utilização da vela instrumentada, é desejável que haja um desenvolvimento específico para cada aplicação. Deste modo, é possível compatibilizar o grau térmico, o tipo e a posição do eletrodo com a vela normalmente utilizada no motor. Obviamente, o custo de tal desenvolvimento deve ser considerado na escolha final do sensor.

Outra vantagem deste tipo de sensor, segundo Bertola *et al* (2006), é a sua boa capacidade em dissipar a carga térmica graças as suas favoráveis propriedades de transferência de calor.

2.6.2.2 Sensor de pressão dotado de um sistema de refrigeração

Utilizando este tipo de sensor, segundo Bertola *et al* (2006), o sobreaquecimento pela carga térmica mais elevada durante a ocorrência do fenômeno da detonação é evitado. Isto evita a ocorrência de choque térmico o qual pode alterar o sinal de pressão captado pelo sensor. Entretanto, deve-se prever um sistema de alimentação de água para a refrigeração. A FIG. 2.4 ilustra um sensor deste tipo disponível no mercado.



FIGURA 2.4 – Sensor de pressão refrigerado (Referência AVL 2008)

2.6.2.3 Sensor de pressão sem sistema de refrigeração

O sensor de pressão sem refrigeração é comumente utilizado para a medição da pressão no interior da câmara de combustão. Possui a vantagem de ser mais fácil de ser montado comparado ao sensor com refrigeração. Deve ser ressaltado que tanto neste tipo de sensor quanto no sensor refrigerado alguns cuidados quanto à montagem precisam ser considerados. Deve-se procurar montá-los o mais rente possível à parede da câmara de combustão (*flush-mounted*) de modo a evitar ressonância de tubo. Neste caso, o sinal de pressão torna-se distorcido pela presença das frequências elevadas presentes no referido tubo. A FIG. 2.5 ilustra este tipo de sensor.



FIGURA 2.5 – Sensor de pressão sem refrigeração (Referência AVL 2008)

No tocante à montagem do sensor de pressão no interior da câmara de combustão, segundo Randolph (1990), a mesma pode ser realizada, basicamente, de três maneiras diversas, a saber:

- a) montagem do sensor faceando a parede da câmara de combustão (*flush-mounted*);
- b) montagem remota do sensor por meio de uma única ranhura;
- c) montagem remota do sensor por meio de múltiplas ranhuras.

Ainda segundo Randolph (1990), uma quarta alternativa utilizando uma interface de metal poroso sinterizado mostrou-se inviável em função da excessiva queda de pressão por meio do referido metal.

Segundo Bertola *et al* (2006), a montagem ideal do sensor de pressão na câmara de combustão é a do tipo *flush-mounted*.

A FIG. 2.6 ilustra esquematicamente os três tipos de montagem normalmente utilizadas nas medições de pressão no interior do cilindro.

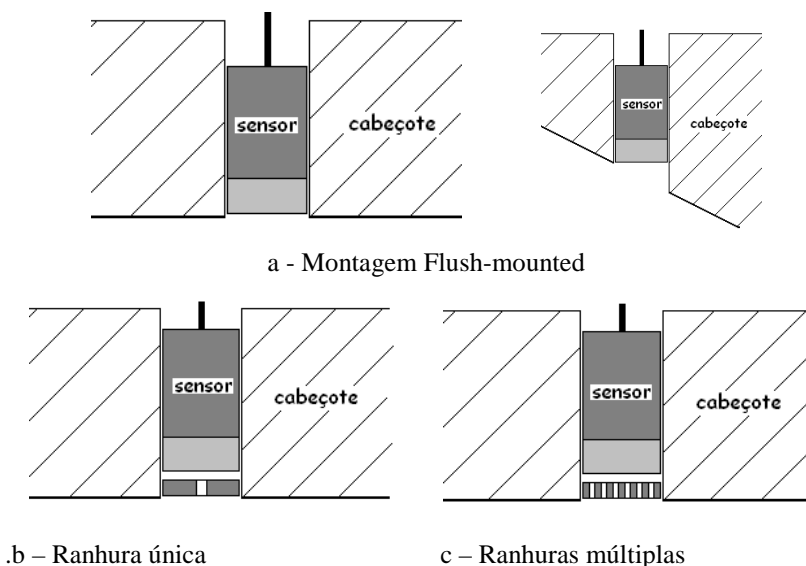


FIGURA 2.6 – Tipos de montagens do sensor de pressão

Em seu trabalho de pesquisa sobre técnicas de montagem de transdutores de pressão, Randolph (1990) concluiu que a montagem remota do sensor por meio de múltiplas ranhuras foi a que apresentou os melhores resultados.

Deve ser ressaltado que a escolha do melhor tipo de montagem do sensor de

pressão deve ser preferencialmente considerado ainda na fase de projeto. Segundo o mesmo autor, a presença de ranhuras acarreta as seguintes consequências:

- aumento do volume de compressão da câmara de combustão;
- aumento do volume de perda da câmara de combustão;
- adição de uma componente de pressão ressonante na curva de pressão da câmara de combustão (devido à formação de onda estacionária no gás na ranhura).

De modo geral e considerando-se as dimensões do sensor, a(s) ranhura(s) deve(m) ser de pequeno comprimento e de seção transversal grande consideradas em função da ocorrência de ressonância de Helmholtz e de ondas estacionárias.

Em relação à utilização dos sensores de pressão posicionados no interior da câmara de combustão, segundo Borg *et al* (2006), o seu custo e a sua durabilidade inibem o seu emprego em aplicações em série.

2.6.3 Métodos óticos

Segundo Mazoyer *et al* (2003), os métodos óticos são principalmente indicados para a localização da detonação a qual, até o presente momento, não é capaz de ser conseguida com métodos baseados na medição da pressão.

Entretanto, para se reduzir a tendência à detonação em um motor de combustão interna, a área onde a mesma ocorre bem como as suas condições locais devem ser determinadas e analisadas. Para se alcançar tal objetivo, algumas técnicas óticas de medição disponíveis comercialmente podem ser utilizadas, a saber: o sistema *Visioknock* (AVL) e o sistema *TCA* (*Tomographic Combustion Analysis*).

Ainda segundo Altenschmidt *et al* (2008), o sistema de detecção de detonação baseado no conceito ótico – *Visioknock* – foi desenvolvido para identificar o local de ocorrência da detonação na câmara de combustão simplesmente posicionando-se no seu interior uma vela especial dotada de sensores óticos.

Atualmente, encontram-se disponíveis no mercado três modelos, a saber: *Visioknock* 8 canais, *Visioknock* 40 canais e *Visioknock* 80 canais.

A diferença entre eles, em termos de visualização no interior da câmara de combustão, pode ser vista na FIG. 2.7 sendo que as suas aplicações dependem de uma prévia análise da geometria da câmara de combustão. A escolha dentre as opções disponíveis baseia-se no custo de aquisição dos referidos sistemas, na complexidade de

utilização e análise dos dados adquiridos por parte dos técnicos envolvidos e dos objetivos pretendidos durante a pesquisa ou análise de combustão.

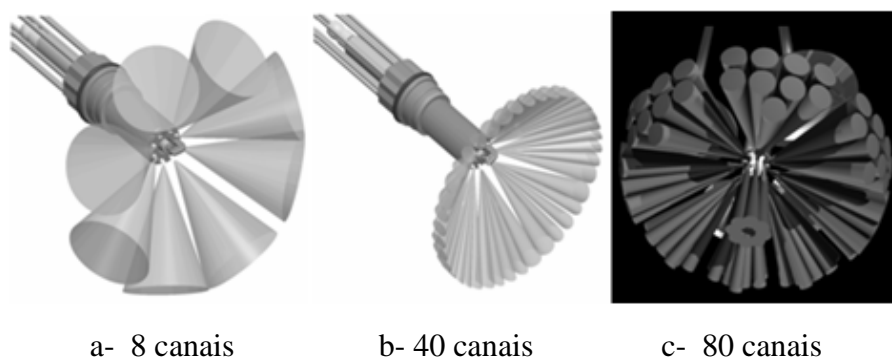


FIGURA 2.7 - Sistemas *Visioknock* (Referência AVL 2008)

O princípio de funcionamento do referido sistema, independentemente do seu número de canais, pode ser resumido do seguinte modo. O sinal de radiação da luz captado pelos sensores óticos posicionados na vela são transmitidos por cabos de fibra ótica até o amplificador ótico o qual converte tais sinais para tensões analógicas. Estas são digitalizadas de modo a poderem ser analisadas pelo software específico (AVL). Outros sinais como pressão no cilindro e o ângulo do eixo do motor são também medidos simultaneamente. Além disto, o ângulo de ignição deve ser informado de modo que os sinais relativos à intensidade da luz registrada durante a ocorrência da detonação possam ser avaliados.

Normalmente, segundo Altenschmidt *et al* (2008), em torno de 50 eventos (ou ciclos) de detonação devem ser utilizados para análise de modo a garantir um resultado estatístico válido.

Deve ser ressaltado, ainda, que embora tal sistema seja fácil de ser utilizado, o mesmo apresenta a desvantagem de ser incapaz de identificar os pontos iniciais de detonação quando o motor funciona na condição limite de ocorrência da mesma.

Quanto ao sistema *Tomographic Combustion Analysis (TCA)*, o mesmo pode ser definido como uma técnica que permite o acesso ótico à câmara de combustão por meio de uma junta de cabeçote dotada de sensores óticos. Segundo Phillip *et al* (2001), tal sistema tem sido empregado de forma satisfatória na visualização da propagação de chama em motores a gasolina de mistura homogênea sendo mais indicado para identificar áreas de auto-ignição sob condições de detonação. A FIG. 2.8

ilustra o sensor relativo a este sistema. Deve ser ressaltado que a sua aplicação para inspeção de motores multicilindros é frequentemente considerada antieconômica.

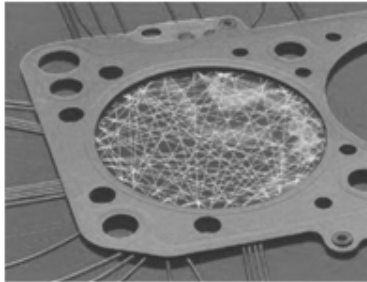


FIGURA 2.8 – Sensor do sistema TCA (Referência AVL 2008)

2.6.4 Métodos baseados na medição da corrente de ionização

A detecção da detonação por meio da medição da corrente de ionização, segundo Yoshimura *et al* (2007), é efetiva para motores a gasolina operando na condição estequiométrica e encontra-se disponível para aplicações automotivas.

Entretanto, para motores utilizando gás e operando com elevados valores de lambda (muito pobre), alguns ajustes visando futuras aplicações práticas tornam-se ainda necessários, a saber:

- compensação da intensidade do valor de detecção da detonação em função da temperatura de combustão visto que a corrente de ionização torna-se muito fraca à medida que aumenta o valor de lambda (ou alternativamente, o ajuste da tensão aplicada no circuito de detecção);
- melhoria da sensibilidade e exatidão do sinal de detecção (em motores multicilindros) de modo a evitar a interferência dos ruídos de ignição entre os vários cilindros.

2.6.5 Métodos baseados na medição do ruído radiado pelo motor

A metodologia de detecção de detonação baseada na medição do ruído proveniente da mesma utilizando um microfone posicionado próximo ao motor foi utilizada por Mittal *et al* (2007) em seu trabalho de determinação da origem da detonação em um motor monocilindro de pesquisas. Os autores examinaram como o processo de autoignição da mistura não queimada se altera quando o avanço de ignição do motor é aumentado a partir do limiar da detonação até a condição de plena

detonação. Ressalta-se que para a utilização deste tipo de medição, o ambiente onde o motor se encontra deve ser acusticamente adequado.

2.6.6 Vantagens e desvantagens entre os métodos de detecção

Ressalta-se que, em relação aos vários métodos de medição da detonação atualmente existentes, deve-se lembrar que sempre haverá diferenças entre os resultados obtidos. Se uma comparação é realizada entre medições utilizando a vela instrumentada localizada no ponto central da câmara de combustão e um sensor de pressão localizado numa posição qualquer diferente daquela, os resultados serão diferentes já que, segundo Brunt (1998), o ponto central da câmara de combustão normalmente passa por uma linha modal referente aos modos circunferenciais e radiais. Tal fato faz com que a resposta para estes modos seja nula, ou nitidamente menor em relação à posição do sensor localizado em outro ponto qualquer.

Também Scholl *et al* (1998) ressaltam que a localização do transdutor de pressão no centro da câmara de combustão coincide (ou está muito próximo) com o maior número possível de linhas nodais (modos radiais e circunferenciais) e, assim, é esperado que tal posição seja menos sensível para a detecção da detonação.

Já numa comparação entre os resultados obtidos a partir de um acelerômetro posicionado no cabeçote ou no próprio bloco do motor em relação aos resultados obtidos a partir da vela instrumentada ou de um sensor de pressão, a diferença é devida ao fato de que, segundo Schmillen e Rechs (1991), as amplitudes do sinal de vibração detectadas pelo acelerômetro, causadas pelas ressonâncias no interior da câmara de combustão, dependem da função de transferência do bloco do motor. Assim, o sinal captado pelo acelerômetro conterà basicamente as frequências de ressonância dos pontos onde o mesmo encontra-se instalado e algumas frequências de ressonância que ocorrem no interior da câmara de combustão não serão capazes de excitar a estrutura do motor não sendo, conseqüentemente, captadas pelo acelerômetro.

Ressalta-se que a escolha entre as diversas possibilidades deve considerar o balanço entre as suas vantagens e suas desvantagens bem como o objetivo de sua utilização, o custo e a facilidade de montagem. A TAB. 2.1, a título de orientação, fornece uma comparação entre os sensores mais comumente utilizados para a detecção da detonação elencando os mais importantes fatores para tal escolha.

TABELA 2.1
Fatores que influenciam na escolha do sensor

Item	Tipo de Sensor		
	Sensor de Pressão	Vela Instrumentada	Acelerômetro
Definição do posicionamento no motor	Requer estudo baseado em <i>CAD</i>	Usualmente não requer estudo em <i>CAD</i>	Normalmente requer avaliação visual
Facilidade de instalação	Normalmente parafusado no cabeçote	Parafusada diretamente na posição da vela	Normalmente parafusado no bloco do motor
Posição de montagem	Normalmente deslocado do ponto central da câmara de combustão	Normalmente posicionada no ponto central da câmara de combustão	Normalmente posicionado em função do lay-out disponível
Modos detectados	Quase todos os tipos de modos	Somente os modos radiais	Somente os modos transmitidos para a estrutura do motor
Vida útil	~ 200 horas	~ 200 horas	>> 200 horas
Custo do sensor	~ 10x a 15x mais caro	~ 18x a 22x mais caro	Valor de Referência*
Aplicação	Motores de Pesquisa	Motores de Pesquisa	Motores comerciais
Provável correlação com danos físicos ao motor	Elevada	Média	Baixa

* Considerado o valor médio a partir dos valores dos principais transdutores comercialmente disponíveis

2.7 Métodos para análise dos dados experimentais

Os métodos de análise do fenômeno da detonação podem ser resumidos, basicamente, em dois tipos, a saber:

- métodos baseados na Transformada de Fourier;
- métodos pertencentes à família *JTFA* (*Joint Time-Frequency Analysis*).

As características destes métodos são comentadas em detalhes na literatura e os conceitos mais importantes são aqui relacionados de forma resumida.

2.7.1 Método baseado na Transformada de Fourier

Tal método baseia-se na análise, a partir de um determinado sinal no domínio do tempo, do seu conteúdo de frequências. Tal análise pode ser realizada de forma analógica (por meio da utilização de filtros analógicos) ou digital (por meio da aplicação da Transformada de Fourier). Preferencialmente, a escolha entre as duas alternativas recai sobre a forma digital dado principalmente à redução do custo dos componentes digitais e à maior flexibilidade de manuseio dos resultados.

Historicamente, a grande maioria dos estudos realizados envolvendo detonação em motores de combustão interna utilizou a Transformada de Fourier como método de análise. Exemplos de sua aplicação são apresentados por Hettinger e Kulzer (2009), Bengisu (2002), Lee *et al* (1998), Chun e Kim (1994), Schmillen e Rechs (1991), Konig e Sheppard (1990) e Leppard (1982).

Braga (2004) também utilizou um método baseado na Transformada de Fourier em seu trabalho de desenvolvimento e implementação de um sistema de identificação de detonação em motores de combustão interna de ignição por centelha. O autor condicionou o sinal de vibração proveniente de um acelerômetro posicionado na estrutura do motor por meio da implementação do algoritmo *DFT (Discrete Fourier Transform)*. Tal algoritmo possui a vantagem de aproveitar melhor os recursos da *CPU* quando somente algumas frequências devem ser calculadas.

2.7.2 Métodos pertencentes à família JTFA

Segundo Sulaiman e Abed (2007), a Transformada de Fourier nem sempre é a melhor ferramenta matemática para se analisar sinais reais, os quais são usualmente de duração finita ou relativamente curta. Apesar do fato de que o conteúdo de frequências de grande parte dos sinais varia em função do tempo, a teoria clássica de Fourier permite somente analisar um sinal no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Para solucionar este problema várias técnicas têm sido desenvolvidas e largamente estudadas. Tais técnicas são agrupadas na assim denominada família *Joint Time-Frequency Analysis (JTFA)* a qual inclui: *Short-Time Fourier Transform (STFT)*, *Wavelet Transform (WT)* e *Wigner-Ville Distribution (WVD)*. Todas estas técnicas possuem vantagens e desvantagens e a sua aplicação depende de cada caso.

2.7.2.1 Short Time Fourier Transform (STFT)

Tal técnica, de acordo com Scholl *et al* (1998), é utilizada para examinar o conteúdo de frequências de um determinado sinal em função do tempo. Ela é capaz, por exemplo, de revelar as características acústicas e vibracionais oriundas da câmara de combustão. Resumidamente, o sinal é parcialmente dividido em seções em função do tempo por uma janela que varre todo o sinal original. Para cada uma destas seções, a densidade espectral de potência é calculada e um percentual de sobreposição é previamente escolhido. Além disto, para o cálculo da *FFT* as seções são preenchidas com zeros nas suas extremidades. Os resultados são apresentados em um mapa, denominado espectrograma, cujas coordenadas são o tempo (eixo x), a frequência (eixo y) e a intensidade da energia do sinal apresentada numa escala de cores.

A definição matemática da *STFT*, segundo Sulaiman e Abed (2007), é dada pela EQ. (2.3), a saber:

$$STFT(t, w) = \int x(\tau).h^*(t - \tau).e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2.3)$$

Ainda segundo Sulaiman e Abed (2007), o Espectrograma obtido a partir da *STFT* fornece a distribuição frequência tempo da energia no sinal a ser analisado e, matematicamente, é dado pela EQ. (2.4):

$$FS(t, w) = \left| \int x(\tau).h^*(t - \tau).e^{-j\omega\tau} d\tau \right|^2 \quad (2.4)$$

onde:

x(t): sinal a ser analisado;

h(t): função janela em torno do tempo τ .

Embora todas as técnicas de análise no domínio tempo-frequência sejam capazes de mostrar as características do comportamento da detonação, segundo Scholl *et al* (1997), existem algumas razões para se preferir utilizar a *STFT*, a saber:

- computacionalmente, o espectrograma é algumas ordens de grandeza mais rápido que a distribuição de *Wigner-Ville* e *Choi-Willians*;

- possui maior facilidade na interpretação dos resultados em relação às distribuições de *Wigner-Ville* e *Choi-Willians* porque seus resultados são sempre valores positivos. Além disto, os assim denominados termos de interferência são menos perceptíveis.

2.7.2.2 Transformada de *Wavelet* (WT)

Segundo Zhang e Tomita (2001), a Transformada de *Wavelet* é um método de análise no domínio frequência-tempo, adequado para aplicações em sinais não estacionários. Neste sentido, ela pode ser útil para aplicações em motores de combustão interna de ignição por centelha como um método de análise do fenômeno da detonação no sentido de que, com a sua aplicação, pode-se obter uma melhor compreensão do fenômeno da detonação tais como o instante em que a mesma se inicia e como suas frequências ressonantes variam com o tempo. Os mesmos autores a utilizaram em seus trabalhos, a saber:

- estudo de detecção da detonação utilizando sinais de vibração no motor onde foi desenvolvido um novo método denominado *Instantaneous Correlation Method*, Zhang e Tomita (2001);
- estudo de detecção da detonação utilizando sinais de pressão e vibração no bloco do motor onde foi desenvolvido um novo método denominado *Wavelet Pattern Matching*, Zhang e Tomota (2000).

Também Samimy e Rizzoni (1996) utilizaram a Transformada de *Wavelet* em seu estudo sobre a ocorrência da detonação e sua variação cíclica em motores de combustão interna. Baseado em seus experimentos, os autores acreditam que a detecção da detonação apresenta melhoria significativa quando se utiliza a Transformada de *Wavelet*.

2.7.2.3 Distribuição de *Wigner-Ville* (WVD)

Segundo Sulaiman e Abed (2007), a distribuição de *Wigner-Ville* (WVD) é a mais popular representação das distribuições frequência-tempo (TFD) porque ela é simples e poderosa. Para um sinal no tempo $x(t)$ a distribuição de *Wigner-Ville* é dada conforme a EQ (2.5), a saber:

$$WVD_{(t,\omega)} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \tau / 2) \cdot x^*(t - \tau / 2) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2.5)$$

Segundo Cartens-Behrens et al (2002), o espectro de *Wigner-Ville* fornece uma representação tempo-frequência de elevada resolução de sinais composto de vários componentes.

Entretanto, segundo Sulaiman e Abed (2007), existe um problema com a *WVD* que é a chamada interferência de termos cruzados a qual reflete a correlação de dois componentes do sinal sob análise. Uma das alternativas para solucionar este inconveniente é a utilização da distribuição de *Choi-Willians* a qual, conforme citado em Samimy e Rizzoni (1996), foi desenvolvida especificamente com o objetivo de reduzir os termos cruzados presentes na distribuição de *Wigner-Ville*.

2.8 Critérios de decisão

Os critérios de decisão quanto à ocorrência da detonação estão diretamente relacionados ao tipo de método de detecção utilizado. Alguns deles podem ser utilizados para vários métodos enquanto outros são específicos.

Segundo Puzinauskas (1992), os critérios de decisão baseados na medição da pressão no interior da câmara de combustão disponíveis na literatura podem ser divididos em três categorias, a saber:

- baseado na avaliação da curva de pressão no cilindro;
- baseado na manipulação da curva de pressão no domínio da frequência;
- baseado na derivada da curva de pressão no cilindro.

Podem ser encontrados ainda na literatura os chamados métodos combinados nos quais utiliza-se um método para quantificar o grau de intensidade da detonação e outro para determinar o local, na câmara de combustão, em que a mesma se inicia. Exemplos de aplicação de métodos combinados são encontrados em Chun e Kim (1994) e em Haghgooie (1990).

Segundo Burgdorf e Denbratt (1997), uma limitação dos métodos de detecção

da detonação baseados na medição da pressão no interior da câmara de combustão e, conseqüentemente, dos seus critérios de decisão, é que eles são sensíveis à razão de aquisição de dados, à posição do transdutor de pressão e à geometria do motor.

Em relação à primeira categoria, segundo Puzinauskas (1992), os métodos que se enquadram podem variar de extremamente simples a relativamente complexos. O mais simples deles considera o valor de pico de pressão como indicador da detonação. Embora seja, por um lado, um método vantajoso por sua simplicidade, por outro lado possui a desvantagem da dificuldade de interpretação do valor obtido pois o mesmo varia com os diferentes parâmetros do motor bem como com as suas condições de operação.

Segundo Rothe *et al* (2006), um grande problema na definição da faixa de controle da detonação é a ausência de definições universais para o limite de detonação e o limite de danos. Tais quantidades estão sujeitas ao fabricante, ao motor e as definições específicas dos pontos de operação.

No tocante ao desenvolvimento de um critério de decisão quanto à ocorrência da detonação e a sua relação com o efeito na integridade física do motor, ressalta-se que, conforme Corti e Moro (2007), a correlação entre um determinado critério de decisão e o correspondente dano ao motor (ou o risco de dano permanente ao motor associado a uma condição de detonação determinada) dependerá do tipo de motor, da posição e do tipo do sensor e, também, das condições de operação do mesmo.

2.8.1 Índices mais comumente utilizados

A partir da literatura consultada, os índices ou critérios mais comumente utilizados para a detecção da detonação são os seguintes:

- Amplitude máxima da pressão filtrada numa faixa de frequências (BPF): segundo Burgdorf e Denbratt (1997), este é um dos critérios mais comumente utilizados para identificar a intensidade da detonação. É também referenciada como *MATD* (máxima amplitude no domínio do tempo) segundo Xiaofeng *et al* (1993) ou *MAX* (band-pass filter method) segundo Chun e Kim (1994). É obtido a partir do sinal de pressão filtrado utilizando um filtro passa-banda adequado.

Lee *et al* (1998) citam que o método (*BPF*) é um dos métodos mais comumente utilizados para medir a intensidade da detonação. Especificamente em seu trabalho foram utilizadas frequências de corte de 5 e 20 kHz.

Cavina *et al* (2006), em seu trabalho de pesquisa sobre detonação, utilizaram os índices *BPF* – denominado como *MAPO* (Máxima Amplitude da Oscilação de Pressão) – e *INT* para medir a intensidade da detonação.

- Integral da pressão filtrada numa faixa de frequências (*int BPF*): segundo Burgdorf e Denbratt (1997), tal critério é calculado a partir da integral no domínio do tempo do sinal da pressão no interior da câmara de combustão filtrado numa faixa de frequências durante a ocorrência da detonação.

Tal critério, que segundo Chun e Kim (1994) é denominado Integral (*INT*), pode ser definido matematicamente através da EQ. (2.6):

$$INT = \int_{\theta_1}^{\theta_2} P_{filtrado} \cdot d\theta \quad (2.6)$$

Leppard (1982) sugeriu, a partir de seus estudos, que este critério de decisão quanto à ocorrência da detonação fosse utilizado devido a sua simplicidade.

- *KI20*: segundo Burgdorf e Denbratt (1997), este critério é uma variação do critério *BPF* no qual somente a energia contida nos primeiros 20° do ângulo do eixo do motor após a origem da detonação é calculada. Matematicamente, é definido pela da EQ. (2.7):

$$KI20 = \sum_{i=1}^{N_{amostras}} (P(i) - P_{média})^2 \cdot \frac{1}{N_{amostras}} \quad (2.7)$$

Tal critério foi utilizado por Konig e Sheppard (1990) em seu trabalho de pesquisa sobre detonação.

- 1ª derivada do sinal da pressão (*FST*): este critério, segundo Chun e Kim (1994), baseia-se no cálculo da primeira derivada do sinal da pressão na câmara de combustão. Matematicamente, pode ser expresso pela EQ. (2.8):

$$FST = Max \left| \frac{dP}{d\theta} \right| \quad (2.8)$$

- 3ª derivada do sinal da pressão (*THD*): tal critério, conforme Burgdorf e Denbratt (1997) e Chun e Kim (1994), baseia-se no cálculo do valor máximo da terceira derivada

no domínio do tempo do sinal da pressão e requer pouco cálculo comparado ao método da densidade espectral de potência (*PSD*) além de baixa resolução do sinal de pressão. Matematicamente, pode ser definido por meio da EQ. (2.9):

$$THD = \text{Max} \left| \frac{d^3 P}{d\theta^3} \right| \quad (2.9)$$

- Densidade espectral de potência (PSD): conforme Burgdorf e Denbratt (1997), o seu cálculo baseia-se na Transformada de Fourier Discreta (*DFT*) para se estimar a energia contida numa determinada faixa de frequências;

- Step (STP): tal critério, segundo Chun e Kim (1994), classifica os pontos do sinal de pressão filtrados numa faixa de frequências e em função do ângulo do *eixo do motor*: se o ponto considerado supera um certo valor previamente estabelecido é dada uma determinada pontuação para o mesmo (função da sua intensidade). Assim, a intensidade da detonação é calculada somando-se os valores previamente encontrados.

Matematicamente, pode ser expresso pela EQ. (2.10):

$$STP = \sum_{\theta_1}^{\theta_2} (P_{filtrada+step})_{\theta} \quad (2.10)$$

- Cubic Spline fit (CSD): tal critério, segundo Chun e Kim (1994), baseia-se na determinação do máximo valor da diferença entre o sinal da pressão bruto e o mesmo sinal filtrado utilizando-se um filtro passa-baixa, em função do ângulo do *eixo do motor*. Matematicamente, tem-se pela EQ. (2.11):

$$CSD = \text{Max} \left| P_{bruta} - P_{filtradaCSD} \right| \quad (2.11)$$

- Filtro passa-baixa (LPF): este critério, segundo Chun e Kim (1994), baseia-se na determinação do máximo valor da diferença entre o sinal bruto da pressão e o mesmo sinal filtrado utilizando-se um filtro passa-baixa. Matematicamente, tem-se pela EQ. (2.12):

$$LPF = \text{Max} \left| P_{bruta} - P_{filtradaLPF} \right| \quad (2.12)$$

O mesmo autor utilizou um filtro com frequência de corte próximo a 5 kHz.

- Pico máximo da pressão (PPD): este critério, segundo Chun e Kim (1994), baseia-se na determinação do valor máximo do pico do sinal de pressão no interior da câmara de combustão. Matematicamente, pode ser expresso pela EQ. (2.13):

$$PPD = Max \left| Pico_{\text{pressão}} \right| \quad (2.13)$$

Outro critério, citado em AVL INDICOM V2.0 (2008), relativamente mais complexo que os anteriores consiste, para cada ciclo de funcionamento do motor considerado, inicialmente na filtragem do sinal de pressão utilizando um filtro passa-alta, em seguida na sua retificação e, após isto, o sinal obtido é submetido a dois tratamentos diferentes, a saber:

- o referido sinal é integrado numa determinada faixa de frequências e comparado a um valor de referência pré-estabelecido em função das condições de funcionamento do motor. Caso o valor encontrado seja maior que o valor de referência, tal ciclo é considerado potencialmente detonante.

- a partir do referido sinal é determinado o seu valor de pico e comparado a um valor de referência. Caso o valor encontrado seja maior que o valor de referência, tal ciclo é considerado potencialmente detonante. Além disto, o valor de pico é também comparado a um valor absoluto dependente da rotação do motor: caso ele supere este limiar é considerado potencialmente detonante. Ambos os sinais devem ser considerados detonantes para confirmar a existência de detonação.

A decisão final, quanto à ocorrência da detonação, é tomada quando os dois resultados das avaliações acima descritas são considerados, simultaneamente, detonantes.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho reflete a análise da estratégia mais adequada para se obter os resultados pretendidos para se avaliar o fenômeno da detonação. Observam-se ainda restrições como aquelas decorrentes da disponibilidade da instalação disponível.

3.1 Definição do planejamento de provas

A definição do escopo das provas a serem realizadas foi um compromisso estabelecido entre os objetivos pretendidos neste trabalho e as necessidades da empresa as quais se resumem na pesquisa das mais diversas configurações de sistema de injeção, de diferentes estruturas de fluxo e de tipos diversos de combustível.

Dentro deste contexto, cabe ressaltar que o principal foco das pesquisas realizadas na empresa foi a utilização de combustíveis alternativos tais como etanol e gás natural buscando a obtenção de elevadas eficiências (comparáveis às dos melhores motores diesel) e de reduzido consumo de combustível. Para se atingir tal objetivo, uma das alternativas consideradas como tecnicamente viável era o funcionamento do motor com sistema de injeção direta de combustível. Sendo assim, este trabalho além de caracterizar o funcionamento do motor com o tradicional sistema de injeção de combustível nos pórticos (*PFI*) utilizando gás natural (*CNG*) focou também o funcionamento do motor com o sistema de injeção direta (*DI*) utilizando tanto o gás natural quanto o etanol cujas características podem ser resumidas conforme apresentado no Anexo A.2.

Além disto, as condições de funcionamento do motor foram baseadas em diversos valores de lambda ou, em outras palavras, utilizando variados índices de diluição por ar. Ressalta-se também que, quando possível, os experimentos foram realizados com valores de cargas médias (em torno de 15 bar de *IMEP*) e níveis de detonação considerados moderadamente severos de modo a não comprometer a integridade física do motor.

Em resumo, a caracterização do motor de pesquisa funcionando com diversos combustíveis, com diferentes sistemas de injeção e variadas condições de lambda objetivou ser a mais completa possível buscando cobrir as possíveis alternativas de

utilização do referido motor de modo a compreender as diferenças existentes entre elas no tocante à ocorrência da detonação.

Uma visualização do motor aqui utilizado bem como uma descrição das suas principais características técnicas podem ser visualizadas no Anexo A.3.

3.2 Tipos de provas realizadas

Para os diversos tipos de sistema de injeção de combustível bem como de condições de funcionamento do motor considerados neste trabalho (valores de lambda, tipo de combustível e pressão de injeção), a sequência de provas planejada e executada pode ser resumida conforme descrito abaixo:

- realização de testes com o sistema tradicional de injeção de combustível (*PFI*) utilizando *CNG*. Nestes testes, foram avaliados diferentes valores de lambda ($\lambda=1,0$, $\lambda=1,3$ e $\lambda=1,5$) com o intuito de verificar a sua influência no espectro de frequências visto que os valores de temperaturas no interior da câmara de combustão podem variar bastante com a diluição e, portanto, passível de influenciar nas características do fenômeno da detonação no tocante ao conteúdo espectral;
- realização de testes com o sistema de injeção direta de combustível (*DI*) utilizando Etanol como combustível. Em tais testes, buscou-se verificar, no conteúdo espectral oriundo da detonação, a influência de diversos valores de lambda ($\lambda=1,0$, $\lambda=1,3$ e $\lambda=1,5$), a influência de algumas estruturas de fluxo (*low swirl*, *high swirl* e *medium swirl and tumble*) e, por último, a influência da pressão de injeção de combustível. A variação das estruturas de fluxo foi obtida pela introdução de variações de geometria introduzidas pelos dispositivos apresentados no Anexo A.4.
- realização de testes com o sistema de injeção direta de combustível (*DI*) utilizando *CNG*. Em tais testes, o objetivo foi o de verificar a influência de diferentes valores de lambda ($\lambda = 1,0$, $\lambda = 1,3$ e $\lambda = 1,5$) e a influência de algumas estruturas de fluxo (*low swirl*, *medium swirl and tumble* e *high swirl*).

As TABELAS 3.1, 3.2 e 3.3 resumem as provas realizadas.

TABELA 3.1

Provas realizadas: sistema *PFI CNG*

Prova	Estrutura de Fluxo	P_{inj} (bar)	λ	Sistema Injeção	Com-bus-tível	Condi-ção	Tipo de Sensor		
							Sensor Pressão	Vela Instrum.	Acelerô-metro
1	low swirl	4,5	1,0	PFI	CNG	s/ knock	sim	sim	sim
2						c/ knock			
3			1,3			s/ knock			
4						c/ knock			
5			1,5			s/ knock			
6						c/ knock			

TABELA 3.2

Provas realizadas: sistema *DI Etanol*

Prova	Estrutura de Fluxo	P_{inj} (bar)	λ	Sistema Injeção	Com-bus-tível	Condição	Sensor Pressão	Vela Instr.	Acelerô-metro
1	high swirl	100	1,3	DI Líquida	Etanol	s/ knock	sim	sim	sim
2						c/ knock			
3			1,5			s/ knock			
4						c/ knock			
5		140	1,3			s/ knock			
6						c/ knock			
7			1,5			s/ knock			
8						c/ knock			
9		160	1,3			s/ knock			
10						c/ knock			
11			1,5			s/ knock			
12						c/ knock			
13	medium swirl and tumble	100	1,0	Injetor Magneti Marelli 19 g/s	Etanol	s/ knock	sim	sim	sim
14			c/ knock						
15			1,3			s/ knock			
16		c/ knock							
17		1,5				c/ knock			
18		140	1,3			s/ knock			
19						c/ knock			
20			1,5			s/ knock			
21						c/ knock			
22	low swirl	100	1,0	DI Líquida	Etanol	c/ knock	sim	sim	sim
23			1,3						
24			1,5						
25		140	1,3						
26			1,5						

TABELA 3.3

Provas realizadas: sistema *DI CNG*

<i>Teste</i>	<i>Estrutura de Fluxo</i>	<i>P_{inj}</i> <i>(bar)</i>	λ	<i>Sistema Injeção</i>	<i>Combustível</i>	<i>Condição</i>	<i>Sensor Pressão</i>	<i>Vela Instrum.</i>	<i>Acelerometro</i>
1	<i>low swirl</i>	25	1,0	<i>DI Injetor AA 57N</i>	<i>CNG</i>	s/ knock	sim	não	sim
2						c/ knock			
3			1,3			s/ knock			
4						c/ knock			
5			1,5			s/ knock			
6			c/ knock						
7	<i>medium swirl and tumble</i>	1,3	s/ knock						
8			c/ knock						
9	<i>high swirl</i>	1,3	s/ knock						
10			c/ knock						

3.3 Caracterização do fenômeno da detonação

Será descrito, neste item, o procedimento adotado para a caracterização do fenômeno da detonação no motor monocilindro de pesquisa utilizado neste trabalho. Entende-se, no âmbito deste trabalho, por caracterização deste fenômeno a identificação das frequências naturais da câmara de combustão as quais são excitadas quando ocorre a detonação considerando-se as diversas configurações avaliadas.

Para se obter uma solução mais rápida para o problema, decidiu-se por analisar tal processo a partir da forma mais simplificada possível e, gradativamente, evoluir até uma análise mais detalhada e realista do motor. Procedimentos mais simples e de mais fácil verificação permitem que se aproxime mais rapidamente dos valores dentro da faixa almejada além de se minimizar a ocorrência de erros.

Deste modo, a caracterização do fenômeno da detonação foi realizada obedecendo-se às seguintes etapas:

Etapa 1: cálculo utilizando método analítico a partir de solução gráfica da equação de onda

Etapa 2: simulação computacional utilizando o Método de Elementos Finitos (*FEM*)

Etapa 3: determinação experimental: utilização de sensor de pressão

Etapa 4: determinação experimental: utilização de vela de ignição instrumentada

Etapa 5: determinação experimental: utilização de acelerômetro.

A FIGURA 3.1 resume as etapas da caracterização da detonação.

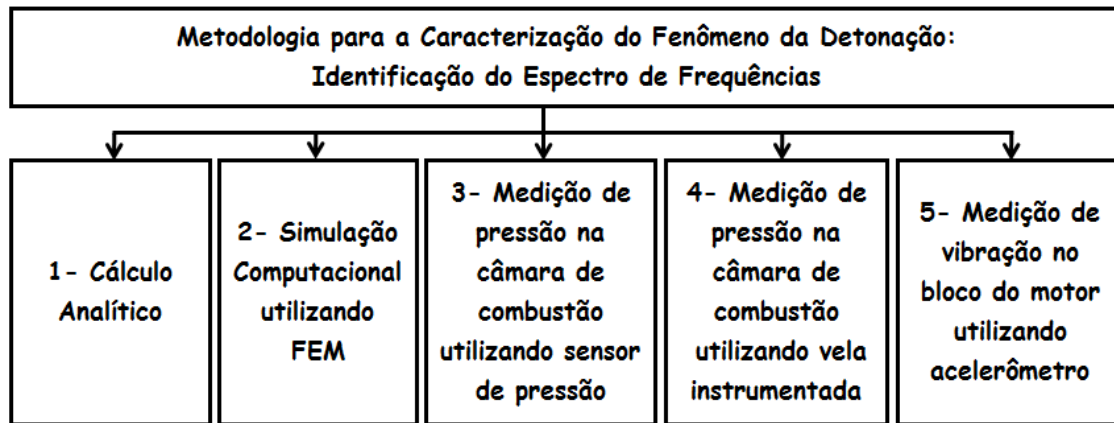


FIGURA 3.1 – Etapas da caracterização da detonação

3.3.1 Cálculo utilizando método analítico através da solução da equação de onda

Nesta etapa partiu-se, conforme desenvolvido por Draper (1938), da hipótese simplificadora a qual consiste em se considerar o interior da câmara de combustão como uma cavidade cilíndrica de bases planas. Conforme citado por Scholl *et al* (1997), normalmente, as câmaras de combustão de motores comerciais típicos podem ser consideradas aproximadamente cilíndricas quando o pistão se encontra no PMI (*BDC*). Entretanto, quando o mesmo se encontra no PMS (*TDC*) as mesmas não guardam semelhanças com a forma de um cilindro. Por esta razão, seria incorreto assumir que os seus resultados poderiam ser aplicados sem modificações para as câmaras de combustão reais. Ainda assim, espera-se que eles possam fornecer um ponto de partida e servir de base para comparações com métodos mais detalhados.

Deste modo, o objetivo desta fase foi o de estabelecer de maneira rápida, porém sem grande preocupação com a exatidão dos resultados, os limites das frequências dos componentes da onda de pressão presentes no interior da câmara de combustão durante a ocorrência da detonação. Tal cálculo é dependente essencialmente da velocidade do som no interior da câmara de combustão que, por sua vez, depende diretamente da temperatura presente no cilindro e da relação entre os calores específicos a pressão constante e a volume constante. Na literatura consultada, normalmente considera-se uma abordagem bastante simplificada na qual é adotado um único valor - valor máximo de temperatura - e a TAB. 3.4 ilustra tais valores utilizados os quais

variam de 2000 a 2500 K para a temperatura máxima na câmara de combustão e de 895 a 1000 m/s para os valores da velocidade do som.

TABELA 3.4
Valores de temperatura máxima e velocidade do som

Referência	Velocidade do Som (m/s)	Temperatura (K)	Observação
Bengisu (2002)	935	---	---
Borg <i>et al</i> (2006)	950	---	---
Brunt <i>et al</i> (1998)	950	---	---
Carstens-Behrens <i>et al</i> (2002)	1000	---	---
Draper (1938)	914,4	---	---
Eng (2002)	1000	2500	---
Haghgoie (1990)	992	2450	---
Mazoyer <i>et al</i> (2003)	1000	---	Utilizado valor típico
Millo e Ferraro (1998)	1000	---	---
Puzinauskas (1992)	900	2000	---
Sun <i>et al</i> (1996)	895	---	---
Xiaofeng <i>et al</i> (1993)	930	---	---
Witze e Green (1993)	940	---	---

Conforme citado em School *et al* (1998), na prática, não se espera que a velocidade do som seja a mesma em qualquer ponto dentro da câmara de combustão. Sendo assim, a determinação da velocidade do som no interior da câmara de combustão é um procedimento bastante complexo e não seria tecnicamente viável ainda que fosse considerada a utilização de simulação computacional.

Entretanto, ao contrário do procedimento normalmente adotado na literatura consultada, foi utilizado neste trabalho um procedimento computacionalmente viável que consistiu na determinação da temperatura máxima no interior da câmara de combustão, em função do ângulo do eixo do motor, através da utilização do software GT-Power. Tal procedimento consistiu na interação da simulação computacional com resultados provenientes da área experimental e pode ser resumido nos seguintes passos:

- primeiramente foram realizados diversos experimentos fazendo-se a aquisição, em função do ângulo do eixo do motor, dos valores de pressão no duto de aspiração, no duto de exaustão e no interior da câmara de combustão. Tais experimentos foram realizados de acordo com a disponibilidade do motor de pesquisa e da sua respectiva configuração em termos de sistema de injeção (citado no Item 3.2), considerando-se

uma ampla gama de condições de funcionamento relacionadas à mistura ar/combustível e, também, considerando-se alguns tipos de combustíveis (Etanol e CNG);

- a partir destas medições, fez-se a validação do modelo computacional do motor utilizado as curvas de pressão anteriormente citadas. Cabe ressaltar que para a validação do modelo computacional do motor foi utilizado o ciclo médio de funcionamento do mesmo calculado a partir de uma amostragem de 100 ciclos consecutivos. Este procedimento reduz o tempo gasto com as iterações visto que elimina possíveis ciclos com grandes variações de pressão no interior da câmara de combustão (variabilidade cíclica) bem como evita possíveis problemas de convergência;

- uma vez validado o modelo do motor, para os ciclos referentes às configurações e condições de funcionamento do mesmo, foram calculadas as temperaturas máximas presentes no interior da câmara de combustão e os valores da relação entre os calores específicos a pressão constante e a volume constante em função do ângulo do eixo do motor utilizando-se o software GT-Power;

- a partir dos valores acima citados, foram obtidos os valores de velocidade diretamente da equação da velocidade do som em gases perfeitos conforme apresentado na EQ. (4.1);

$$V = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T} \quad (3.1)$$

onde:

V : velocidade do som (m/s);

γ : relação entre os calores específicos a pressão constante e a volume constante;

R : constante universal dos gases perfeitos ($8,314472 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$)

T : temperatura máxima da massa queimada no interior da câmara de combustão (K).

- finalmente, os valores de frequência foram determinados para os principais modos acústicos baseado nos gráficos citados em Draper (1938) e por meio da EQ (4.2).

$$V = \Lambda \cdot f \quad (3.2)$$

onde:

V : velocidade do som (m/s);

f : frequência (Hz);

Λ : comprimento de onda (m).

Os valores de comprimento de onda (Λ) para os principais tipos de modos acústicos foram obtidos a partir do valor do raio do cilindro do motor monocilindro de pesquisa e dos gráficos citados em Draper (1938) conforme pode ser visualizado na FIG. 3.2.

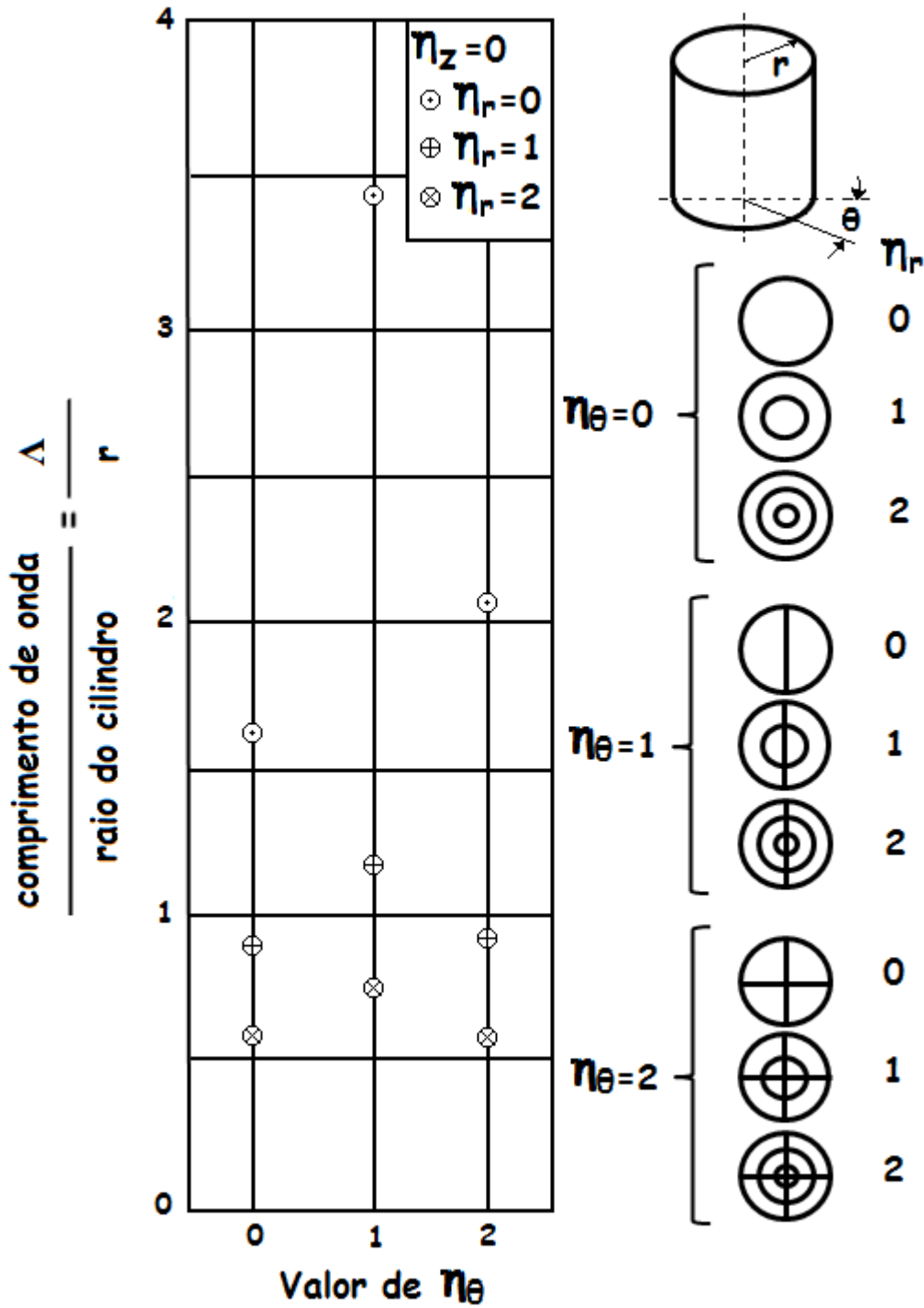


FIGURA 3.2 – Gráfico de Λ : principais modos acústicos (Referência Draper 1938)

Onde:

r : raio do cilindro (m);

Λ : comprimento de onda (m);

η_θ : número de planos nodais contendo os eixos do cilindro e um diâmetro;

η_r : número de cilindros nodais;

η_z : número de planos nodais perpendiculares ao eixo do cilindro;

θ : distância angular (azimutal).

Em resumo, ao contrário da abordagem normalmente adotada na literatura, onde é fixado um valor para a temperatura máxima dos gases no interior da câmara de combustão para todos os ângulos do eixo do motor, a solução teórica aqui desenvolvida considerou, para cada valor de ângulo do eixo do motor, o valor máximo para a temperatura presente naquela posição obtida por meio de experimentos e de simulação computacional o que permite uma melhor qualidade dos resultados. Assim, para cada ângulo do eixo do motor específico, foi considerada uma distribuição uniforme da temperatura no interior da câmara de combustão de modo que a velocidade do som fosse independente da sua localização dentro da mesma.

Anteriormente à realização do procedimento acima, foi realizada uma avaliação comparativa preliminar para se verificar a influência da consideração de diferentes tipos de ciclos presentes no funcionamento do motor nos valores de temperatura máxima presentes no interior da câmara de combustão, a saber:

- ciclo médio. Tal ciclo foi determinado considerando uma amostragem de 100 ciclos a partir dos quais foi obtida a média aritmética de cada um de seus respectivos valores de pressão tomados a cada $0,1^\circ$ do ângulo do eixo do motor;
- ciclo com a ocorrência de detonação (ocorrência inequívoca);
- ciclo sem a ocorrência de detonação.

Além disto, foram utilizados ciclos de funcionamento do motor oriundos de dois diferentes tipos de sensores no interior da câmara de combustão: sensor de pressão e vela instrumentada. Exemplos ilustrativos de tais ciclos são apresentados na FIG. 3.3, onde pode-se visualizar claramente a presença da detonação em ambos, porém com características e intensidades diferentes.

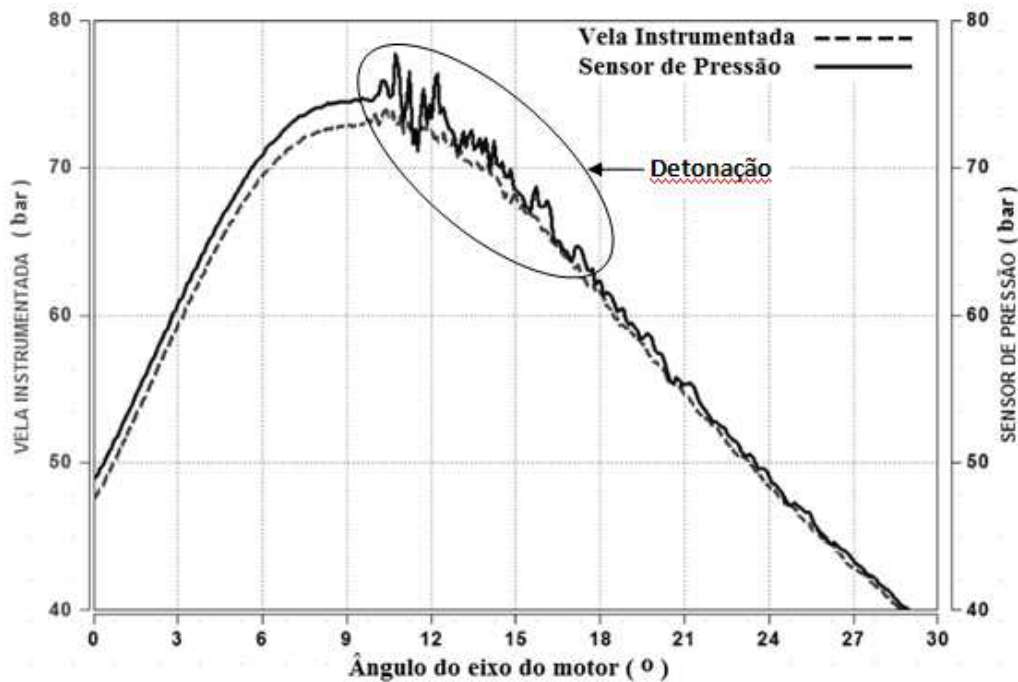


FIGURA 3.3 - Ciclos de funcionamento do motor

As condições de funcionamento do motor para esta avaliação comparativa preliminar foram as seguintes:

- IMEP de 15 (bar);
- lambda de 1,3;
- avanço de ignição da centelha de -20° do ângulo do eixo do motor;
- rotação de 1800 (rpm);
- sistema de injeção direta de combustível;
- pressão de injeção de etanol: 100 (bar).

Conforme já citado no Item 2.4.1, a maior parte da energia acústica concentra-se nos modos acústicos mais baixos e, portanto, uma análise mais detalhada será realizada com foco em tais modos.

Considerando-se que a frequência depende da velocidade do som no interior da câmara de combustão e que esta depende diretamente da temperatura, buscou-se uma melhor correlação com a situação real de funcionamento do motor. Para tal, foram identificadas algumas condições considerando-se determinados valores de lambda baseado no fato de que os valores de temperatura no interior da câmara de combustão são diferentes à medida que a mistura se torna mais pobre. Deste modo, a partir da simulação utilizando o software GT-Power, foram determinadas as temperaturas em função do ângulo do eixo do motor para três valores diferentes de lambda.

3.3.2 Simulação computacional utilizando o Método de Elementos Finitos (FEM)

O objetivo desta etapa foi o de simular, utilizando o Método de Elementos Finitos, as frequências naturais da câmara de combustão ao considerar sua geometria real e comparar os resultados com aqueles obtidos na etapa 1 (câmara de combustão simplificada considerada como um cilindro de bases paralelas). Além disto, objetivou-se também a identificação e a visualização dos respectivos modos acústicos de maneira a facilitar a análise e a interpretação dos resultados experimentais.

Deste modo, tal simulação utilizou a geometria real do pistão e do cabeçote do motor para a determinação dos modos acústicos presentes na câmara de combustão, em função do ângulo do eixo do motor. Os valores de ângulo do eixo do motor utilizados foram escolhidos com o objetivo de se abranger o período onde a detonação mais comumente ocorre e, também, permitir uma análise do andamento dos modos acústicos em função do referido ângulo. A FIG. 3.4 ilustra tais geometrias.

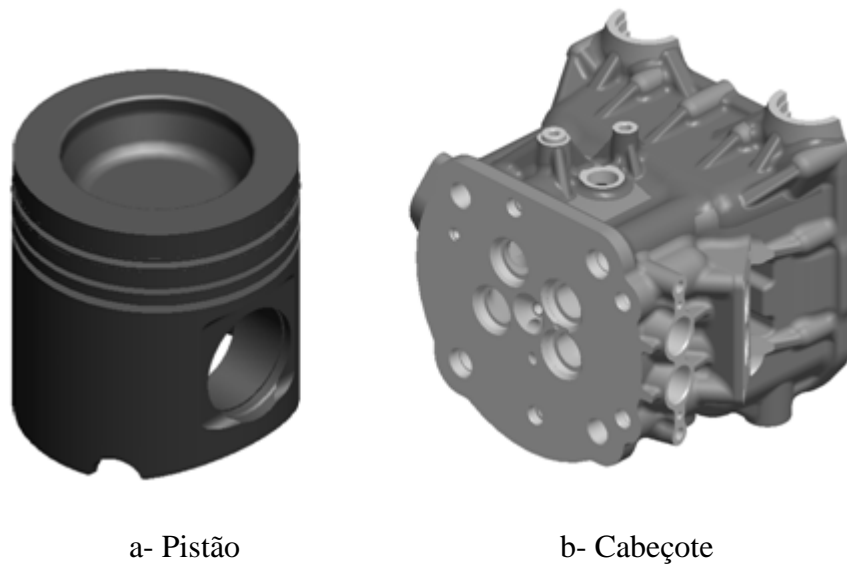


FIGURA 3.4 – Geometrias reais do motor

Observa-se que o pistão possui geometria em *bowl* e que o cabeçote possui geometria plana tendo ao centro o cone para o posicionamento do injetor para injeção direta de combustível e da vela de ignição.

3.3.2.1 Modelo de elementos finitos da câmara de combustão

A malha de elementos finitos utilizada para modelar a câmara de combustão na simulação dos modos acústicos foi criada utilizando-se o software Hypermesh v10.0 e as suas características podem ser visualizadas na TAB. 3.5. Foi considerado o número mínimo de 7 elementos para o comprimento de onda referente às frequências mais elevadas de modo a garantir resultados confiáveis. Este número excede o valor sugerido em Scholl *et al* (1998) que é de 5 elementos por comprimento de onda. Por motivos de simplificação da malha e visando também a redução do tempo de execução dos cálculos, não foi considerado o volume periférico constituído a partir do topo do pistão até o primeiro anel. Tal simplificação não afeta as frequências de interesse para a caracterização do fenômeno da detonação visto que o referido volume é muito pequeno comparado ao da câmara de combustão.

TABELA 3.5
Características da malha de elementos finitos

<i>Item</i>	<i>Característica</i>
<i>Tipo de elemento</i>	Tetraédrico (1 ^a ordem)
<i>Número de elementos</i>	58.235 (0° CA) 200.772 (90° CA)
<i>Tamanho máximo dos elementos (mm)</i>	3,0
<i>Frequência máxima (Hz)</i>	27,3 (0° CA) 37,2 (90° CA)

O modelo anteriormente citado foi elaborado visando maior praticidade na simulação dos modos acústicos em função dos diversos ângulos do eixo do motor. Deste modo, tal modelo foi dividido em dois volumes distintos, a saber:

- volume fixo: composto do volume criado entre o cabeçote e o pistão com o mesmo posicionado no ponto morto superior (PMS). Este volume foi mantido fixo para todos os ângulos do eixo do motor simulados e incluiu o volume referente ao *bowl*;
- volume variável: composto pelo volume criado em função do deslocamento do pistão de acordo com o posicionamento do pistão.

A FIG. 3.5 ilustra os volumes fixo (pistão posicionado no PMS) e variável (pistão posicionado com o ângulo do eixo do motor igual a 90°).

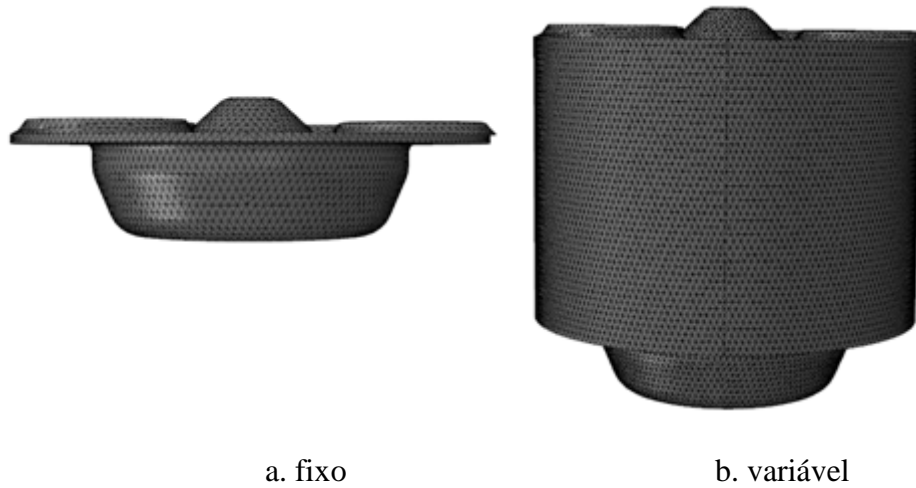


FIGURA 3.5 – Volumes utilizados no modelo da câmara de combustão

Este mesmo procedimento foi utilizado em Carstens-Behrens *et al* (2002) em seu trabalho de investigação de detonação.

A TAB. 3.6 apresenta os valores do deslocamento do pistão em função do seu posicionamento para cada ângulo do eixo do motor simulado os quais criam o volume variável.

TABELA 3.6

Deslocamento do pistão em função do ângulo do eixo do motor

<i>Ângulo do Eixo do Motor (grau)</i>	<i>Deslocamento (mm)</i>
0	0,000
5	0,380
10	1,517
15	3,396
20	5,996
25	9,285
30	13,226
35	17,772
40	22,872
50	34,495
60	47,583
70	61,586
80	75,950
90	90,152

As condições necessárias para a simulação foram obtidas a partir da simulação computacional utilizando o software GT-Power o qual, por sua vez, utilizou os experimentos realizados no motor monocilindro. Tal procedimento foi utilizado com o objetivo de se obter valores que pudessem ser comparados àqueles obtidos experimentalmente utilizando os transdutores de pressão e vibração. Basicamente, para a determinação dos modos acústicos foram necessários os seguintes dados:

- geometria do cabeçote do motor;
- geometria do pistão do motor;
- módulo de compressibilidade dos fluidos (em função do ângulo do eixo do motor) obtido a partir da simulação com o GT-Power;
- densidade da massa queimada (em função do ângulo do eixo do motor) obtido a partir da simulação com o GT-Power.

Foram simulados os modos acústicos para os seguintes ângulos do eixo do motor: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 graus de modo a permitir observar o seu comportamento em função do referido ângulo. Além disto, na maioria das provas foram utilizados simultaneamente, quando disponíveis, os seguintes transdutores: sensor de pressão e vela instrumentada posicionados no interior da câmara de combustão.

Similarmente ao cálculo analítico, a mesma consideração em relação aos valores de temperatura máxima presente na câmara de combustão, considerados em função do ângulo do eixo do motor, foi adotada também para a simulação computacional. O objetivo deste procedimento foi o de tornar as simulações computacionais mais realistas.

Os dados de entrada para a simulação computacional utilizando o software Abaqus estão listados no Apêndice C nas Tabelas C1 a C14.

3.3.3 Determinação experimental: utilização de sensor de pressão

Segundo Mittal *et al* (2007), no desenvolvimento de um novo motor em que, nenhum ou poucos valores empíricos são disponíveis é recomendada uma avaliação básica do mesmo utilizando-se várias posições de sensores. O método preferido é comparar as medições obtidas a partir da utilização de um sensor montado faceando a câmara de combustão (*flush-mounted*) e a vela de ignição dotada de sensor de pressão

montada centralmente na câmara de combustão. Deste modo, torna-se possível avaliar a sensibilidade do método de detecção da detonação em função da posição de medição.

Neste trabalho, será utilizado o mesmo conceito citado. Entretanto, pelo fato de se considerar a possibilidade de se utilizar sistemas de injeção direta (*DI*), a vela instrumentada não pode ser montada centralmente estando, deste modo, ligeiramente deslocada do centro da câmara de combustão. Assim, comparar-se-á os resultados da referida vela instrumentada e do sensor de pressão não refrigerado, montado faceando a parede do cabeçote do motor, estando este também posicionado deslocado do centro.

O sensor de pressão, localizado a 42,8 mm do centro da câmara de combustão, foi escolhido pelo fato de, conforme informação do fabricante, indicar de maneira satisfatória a pressão no interior da câmara fornecendo informações confiáveis relativas à qualidade da combustão e à ocorrência da detonação. O seu conteúdo de frequências tende a ser diferente daquele proveniente da vela instrumentada visto que aquela, teoricamente, seria menos sensível aos modos cujas linhas nodais coincidam (ou estejam muito próximas) com o seu posicionamento. Ressalta-se que tal posicionamento também foi um compromisso com a acessibilidade de montagem e desmontagem do sensor no cabeçote do motor e foi definido durante a fase de projeto do referido motor. A FIG. 3.6 ilustra tal posicionamento enquanto a TAB. 3.7 apresenta as características técnicas do referido sensor.

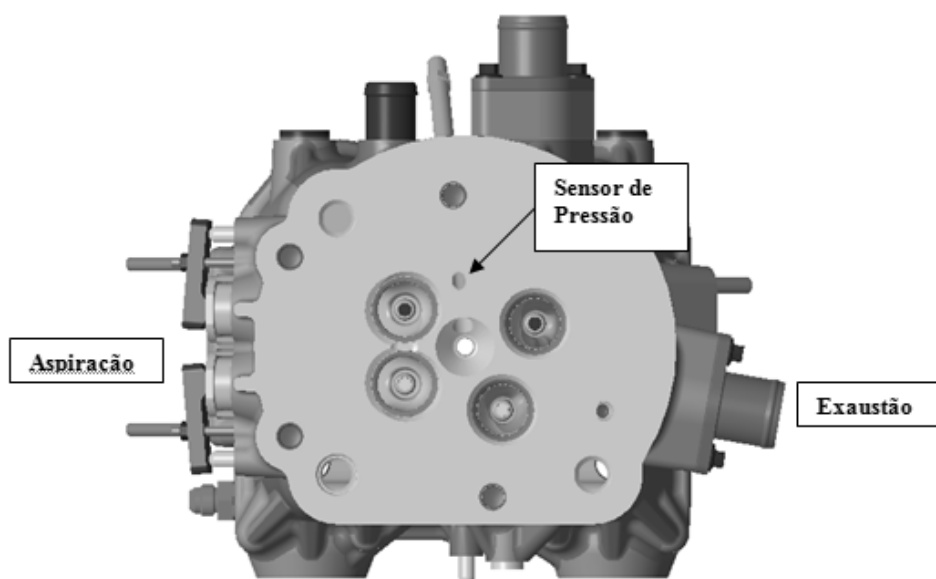


FIGURA 3.6 – Posicionamento do sensor de pressão

TABELA 3.7
Características técnicas do sensor de pressão

<i>Característica Técnica</i>	<i>Descrição</i>
<i>Tipo</i>	GU 13Z-24
<i>Fabricante</i>	AVL
<i>Sensibilidade</i>	15,71 pC/bar
<i>Frequência natural</i>	115 kHz
<i>Faixa de medição</i>	0 ... 250 bar
<i>Faixa de temperatura</i>	$\leq 400^{\circ}$ C
<i>Carta de Calibração</i>	Ver Anexo D1

Do mesmo modo como foi realizado para as aquisições utilizando a vela Instrumentada e o acelerômetro, foi adotado também para o sensor de pressão a escolha do ciclo representativo das diversas configurações avaliadas. A partir destas escolhas, foram realizadas as comparações com os resultados entre os diversos sensores e com a simulação computacional utilizando *FEM*.

Conforme citado em Bertola *et al* (2006), em um motor de combustão interna de ignição por centelha, para se detectar corretamente os ciclos de funcionamento do motor durante a ocorrência da detonação é necessária a utilização da maior resolução possível em termos do ângulo do eixo do motor. No trabalho dos referidos autores, é apresentado um estudo comparativo para várias resoluções do ângulo do eixo do motor sendo utilizada, ao final, a resolução de $0,1^{\circ}$.

Neste trabalho, foi também pesquisada a influência de diferentes valores de resolução para o ângulo do eixo do motor, a saber: $0,1^{\circ}$, $0,2^{\circ}$, $0,3^{\circ}$, $0,5^{\circ}$ e $0,9^{\circ}$. O objetivo desta pesquisa foi o de determinar qual a resolução mínima do ângulo do eixo do motor necessária para a correta detecção das frequências presentes na onda de pressão no interior da câmara de combustão. Os resultados obtidos, considerando-se a configuração *PFI CNG*, bem como o valor final adotado são comentados no Capítulo 4.

3.3.4 Determinação experimental: utilização de vela de ignição instrumentada

A FIG. 3.7 ilustra o posicionamento da vela instrumentada (ligeiramente deslocada da posição central: 7 mm) enquanto a TAB. 3.8 ilustra as suas características técnicas.

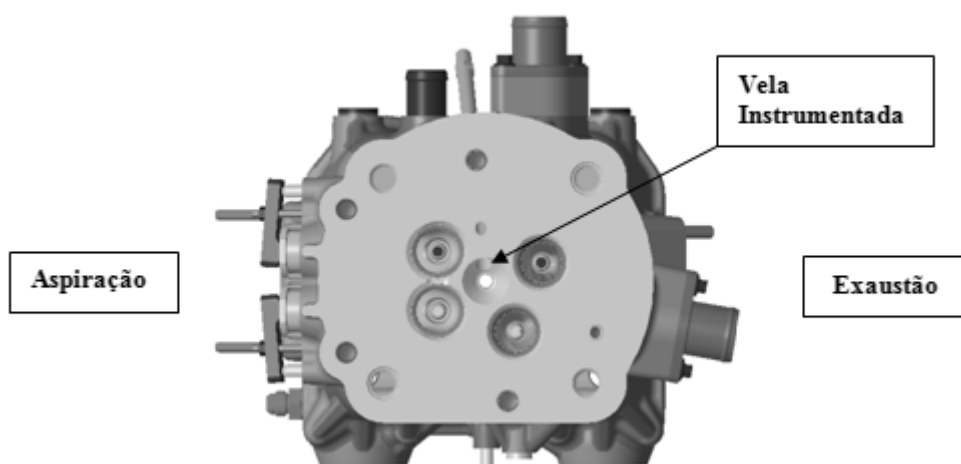


FIGURA 3.7 – Posicionamento da vela instrumentada

TABELA 3.8

Características técnicas da vela instrumentada

<i>Característica Técnica</i>	<i>Descrição</i>
<i>Tipo</i>	ZI31_Y5S
<i>Fabricante</i>	AVL
<i>Sensibilidade</i>	16,13 pC/bar
<i>Frequência natural</i>	130 kHz
<i>Faixa de medição</i>	0 ... 200 bar
<i>Faixa de temperatura</i>	$\leq 350^{\circ} \text{C}$
<i>Carta de Calibração</i>	Ver Anexo D2

Conforme citado em Bertola *et al* (2006), considerando-se o fato de que a detonação é um fenômeno de natureza estocástica sujeita a uma forte variabilidade cíclica, foi realizada uma seleção prévia dos ciclos de funcionamento do motor os quais apresentavam características inequívocas da presença da detonação com o intuito de se criar uma base representativa de comparação. Dentre estes ciclos selecionados foi identificado um que pudesse ser considerado o ciclo representativo da combustão para

cada uma das configurações e condições testadas. Este procedimento, ainda segundo os mesmos autores, é preferível a uma avaliação estatística na qual qualquer tipo de processamento de sinais tais como a utilização do ciclo médio ou a suavização *smoothing* tornariam os resultados menos significativos. Assim, dentre os ciclos experimentais disponíveis para análise (num total de 100 para cada tipo de aquisição) foram selecionados os cinco principais ciclos com a presença inequívoca da detonação e analisados de modo a identificar aquele que fosse o ciclo representativo da referida configuração. A referida escolha considerou o número de modos acústicos detectados bem como as suas respectivas amplitudes. Tal procedimento foi repetido para cada tipo de configuração e os ciclos escolhidos foram utilizados para as comparações entre os diversos tipos de sensores bem como com os resultados obtidos a partir da simulação computacional utilizando *FEM*.

Conforme citado no item 3.3.3, para se detectar corretamente os ciclos de funcionamento do motor durante a ocorrência da detonação em um motor de combustão interna de ignição por centelha é necessária a utilização da maior resolução possível em termos do ângulo do eixo do motor. Neste sentido, também para os testes utilizando a vela instrumentada no interior da câmara de combustão, foi pesquisada a influência de vários valores de resolução do ângulo do eixo do motor, a saber: 0,1°, 0,2°, 0,3°, 0,5° e 0,9°. Os resultados obtidos, considerando-se a configuração *PFI CNG*, bem como o valor final adotado são comentados no Capítulo 4.

3.3.5 Determinação experimental: utilização de acelerômetro

Uma das maneiras mais utilizadas para se medir, de forma indireta, a ocorrência da detonação em motor de combustão interna é a utilização de um acelerômetro fixado ao seu bloco. Neste sentido, foi posicionado um acelerômetro piezoelétrico no bloco do motor sendo o seu posicionamento visualizado por meio da FIG. 3.8 e as suas principais características técnicas citadas na TAB. 3.9.



FIGURA 3.8 – Posicionamento do acelerômetro no bloco do motor

TABELA 3.9

Características técnicas do acelerômetro

<i>Característica Técnica</i>	<i>Descrição</i>
<i>Tipo</i>	0 261 231 144
<i>Fabricante</i>	Bosch
<i>Sensibilidade</i>	26 mV/g
<i>Faixa de frequência</i>	1 ... 20 kHz
<i>Faixa de medição</i>	0,1 ... 400 g
<i>Frequência ressonante dominante</i>	> 25 kHz
<i>Faixa de temperatura</i>	- 40 ... +150° C
<i>Carta de Calibração</i>	Ver Anexo D3

A medição dos níveis de vibração provenientes da ocorrência do fenômeno da detonação foi realizada por meio da instalação de um acelerômetro no próprio bloco do motor cujo posicionamento foi escolhido buscando-se um compromisso entre a acessibilidade para a montagem e desmontagem do sensor e a localização para a melhor detecção do seu referido sinal. Considerando-se tal posicionamento do sensor de vibração no bloco do motor, o seu conteúdo de frequências tende a ser ligeiramente diferente tanto daquele referente à vela instrumentada quanto daquele referente ao sensor de pressão visto que somente serão captados os sinais de vibração relacionados aos modos de ressonância da estrutura do motor ou, em outras palavras, os resultados obtidos dependerão da função de transferência do bloco do motor.

Conforme já citado nos Itens 3.3.3 e 3.3.4, para se detectar corretamente os ciclos de funcionamento do motor durante a ocorrência da detonação, em um motor de combustão interna de ignição por centelha, é necessária a utilização da maior resolução possível em termos do ângulo do eixo do motor. Neste sentido, também para os testes

utilizando o acelerômetro posicionado no bloco do motor, foi pesquisada a influência de vários valores de resolução do ângulo do eixo do motor, a saber: 0,1°, 0,2°, 0,3°, 0,5° e 0,9°. Os resultados obtidos, considerando-se a configuração *PFI CNG*, bem como o valor final adotado são comentados no Capítulo 4.

Do mesmo modo como foi realizado para as aquisições utilizando a vela instrumentada e o sensor de pressão, foi adotado também para o acelerômetro a escolha do ciclo representativo das diversas configurações avaliadas. A partir destas escolhas, foram realizadas as comparações com os resultados dos outros sensores e da simulação computacional utilizando *FEM*.

3.3.6 Determinação experimental: medição do torque

Durante a realização dos experimentos o motor foi acoplado a um dinamômetro, conforme os detalhes apresentados no Anexo B. Uma vez que o objetivo principal era o desenvolvimento do método de determinação do comportamento próximo da condição de detonação, foi realizado um procedimento simplificado de leitura direta das principais grandezas relacionadas ao funcionamento e desempenho do motor com o objetivo de se dispor de uma base de dados para comparação com motores existentes que utilizam outros combustíveis. A TAB. 3.10 apresenta tais valores.

TABELA 3.10

Dados do desempenho do motor

Estrutura de Fluxo	Pressão Injeção (bar)	λ	Torque (N.m)	IMEP (bar)	Potência (kW)	Ignição (°)	Con sumo (g/kWh)	Vazão		Temperatura		Pressão		Umidade de	Duração Combustão			Ai50 (°)	
								CNG (kg/h)	Ar (kg/h)	Escape (°C)	Ar (°C)	Barom. (kPa)	Escape (kPa)		10-ign (°)	50-10 (°)	90-10 (°)		
<i>low swirl</i>	24,4	1,01	165,3	11,3	31,1	-17,0	212,2	6,6	127,4	715,4	30,0	95,9	25,9	0,2	18,8	7,2	16,2	23,4	7,0
	24,4	1,30	190,6	13,1	36,0	-19,0	195,2	7,0	172,3	612,2	31,5	96,1	46,1	0,2	19,8	8,1	13,1	21,2	6,9
	24,2	1,50	231,1	15,5	43,4	-22,0	189,9	8,2	234,2	561,5	31,3	96,2	77,5	0,2	21,8	9,8	14,8	24,7	7,7
<i>high swirl</i>	24,5	1,30	161,2	11,0	30,3	-20,8	201,0	6,1	150,1	612,6	30,7	96,2	35,1	0,2	21,1	9,6	15,1	24,7	7,9
<i>medium swirl and tumble</i>	24,7	1,31	109,5	8,1	20,7	-19,0	226,6	4,7	132,2	593,8	29,9	96,1	20,3	0,2	20,5	8,0	11,8	19,8	7,5

Poder Calorífico Inferior (kJ/kg): 46700

Estrutura de Fluxo	Pressão Injeção (bar)	λ	Torque (N.m)	IMEP (bar)	Potência (kW)	Ignição (°)	Con sumo (g/kWh)	Vazão		Temperatura		Pressão		Umidade de	Duração Combustão			Ai50 (°)	
								CNG (kg/h)	Ar (kg/h)	Escape (°C)	Ar (°C)	Barom. (kPa)	Escape (kPa)		10-ign (°)	50-10 (°)	90-10 (°)		
<i>low swirl</i>	4,5	1,00	131,3	9,1	24,5	-15,0	223,8	5,5	101,1	719,4	29,1	96,2	18,8	0,2	17,3	7,7	15,2	23,0	8,1
	4,5	1,31	150,0	10,3	28,2	-19,0	206,1	5,8	144,8	608,7	30,5	96,3	31,8	0,2	20,3	8,7	13,9	22,1	8,6
	4,5	1,51	199,8	13,5	37,3	-24,0	194,1	7,3	201,0	559,9	30,1	96,4	62,7	0,2	23,9	10,4	15,0	25,4	8,2

Poder Calorífico Inferior (kJ/kg): 46700

Estrutura de Fluxo	Pressão Injeção (bar)	λ	Torque (N.m)	IMEP (bar)	Potência (kW)	Ignição (°)	Con sumo (g/kWh)	Vazão		Temperatura		Pressão		Umidade de	Duração Combustão			Ai50 (°)	
								Etanol (kg/h)	Ar (kg/h)	Escape (°C)	Ar (°C)	Barom. (kPa)	Escape (kPa)		10-ign (°)	50-10 (°)	90-10 (°)		
<i>low swirl</i>	100	1,00	241,4	15,0	45,2	-11,0	392,8	17,8	164,2	727,1	33,9	95,9	54,6	0,2	14,3	7,0	9,4	16,4	8,3
		1,31	233,3	15,0	44,1	-18,0	377,4	16,6	196,1	625,4	33,7	95,7	69,7	0,5	18,6	9,5	13,0	22,4	8,1
		1,50	228,8	15,1	43,6	-26,0	378,4	16,4	226,5	569,3	33,6	96,0	76,4	1,4	24,9	11,8	19,4	31,1	8,8
<i>medium swirl and tumble</i>	100	1,31	242,1	15,3	45,4	-17,0	366,6	16,7	197,1	623,3	33,8	95,8	70,1	0,3	18,3	9,1	12,7	21,7	8,4
		1,30	233,7	15,1	43,8	-20,0	368,9	16,1	192,0	605,3	31,3	95,9	61,5	0,2	19,1	9,8	10,7	20,4	7,3
		1,30	231,9	15,1	43,6	-20,0	364,8	16,0	191,3	601,9	31,4	96,0	60,8	0,2	19,8	9,4	10,5	19,9	7,2
<i>high swirl</i>	140	1,30	234,9	15,0	44,6	-21,0	366,8	16,4	192,5	610,7	33,1	95,8	61,7	0,2	21,1	9,1	10,2	19,3	7,2

Poder Calorífico Inferior (kJ/kg): 25100

4. RESULTADOS

A metodologia utilizada neste trabalho, apresentada no Capítulo 3, descreveu as etapas implementadas para a caracterização do fenômeno da detonação em um motor monocilindro de pesquisa (*SCRE*), a saber:

Etapa 1: cálculo utilizando método analítico a partir de solução gráfica da equação da onda

Etapa 2: simulação computacional utilizando o Método de Elementos Finitos (*FEM*)

Etapa 3: determinação experimental: utilização de sensor de pressão

Etapa 4: determinação experimental: utilização de vela de ignição instrumentada

Etapa 5: determinação experimental: utilização de acelerômetro.

Para um melhor entendimento do trabalho aqui desenvolvido, os resultados serão apresentados obedecendo a sequência lógica de cada uma destas etapas.

4.1 Cálculo utilizando método analítico (Etapa 1)

Este cálculo, conforme descrito no Capítulo 3, teve como objetivo determinar de forma preliminar a faixa de frequências de interesse para a identificação da detonação. No intuito de tornar os cálculos mais realistas e passíveis de comparação com os resultados obtidos experimentalmente foram utilizados, como dados de entrada, a temperatura máxima da massa queimada no interior da câmara de combustão e a relação entre os calores específicos a pressão constante e a volume constante (obtidos por meio de simulação utilizando o software GT-Power) em função do ângulo do eixo do motor. O modelo do motor em referência desenvolvido com o software acima citado foi criado a partir dos dados geométricos provenientes do manual do motor, como diâmetro de cilindro e curso de pistão, comprimento de biela, diâmetros e comprimentos dos pórticos de admissão e exaustão. Além disso, foram extraídos do modelo CAD do motor os detalhes geométricos da câmara de combustão e do circuito de arrefecimento para determinação dos modelos de troca de calor, bem como as áreas superficiais do cabeçote e do pistão, as espessuras de parede entre a câmara de combustão e o fluido refrigerante e as dimensões do pistão e do *bowl* (cavidade do pistão). Por fim, foram inseridas no modelo as propriedades dos materiais constituintes do cabeçote, do pistão,

do cilindro, das válvulas e da junta do cabeçote. O Apêndice A apresenta o referido modelo GT-Power do motor monocilindro de pesquisa.

Ressalta-se que estes dados de entrada foram simulados a partir de medições experimentais. A partir dos referidos dados de entrada foram determinados os valores da velocidade do som utilizando-se a EQ. 3.1. Os valores das frequências dos modos acústicos foram obtidos a partir da EQ. 3.2 a qual tomou por base as relações específicas para cada tipo de modo acústico mostrado nas figuras apresentadas em Draper (1938) as quais, por sua vez, foram obtidas a partir da solução da equação da onda onde a câmara de combustão foi considerada como um cilindro de bases paralelas.

4.1.1 Validação do modelo computacional utilizando o software GT-Power

Antes de se proceder aos cálculos analíticos foi realizado o procedimento de validação do modelo computacional utilizando o software GT-Power a partir do qual foram determinados os dados de entrada para se calcular as frequências dos modos acústicos. Para tal foram considerados três diferentes tipos de dados experimentais: dados oriundos de um ciclo sem a ocorrência de detonação, dados oriundos de um ciclo com a ocorrência de detonação e dados provenientes do ciclo médio considerando independentemente ciclos sem e com detonação, de um total de 100 ciclos.

A FIGURA 4.1 apresenta para a configuração do sistema de injeção *PFI* utilizando *CNG* e lambda igual a 1,0 exemplos dos três tipos de ciclos anteriormente citados obtidos a partir do sensor de pressão.

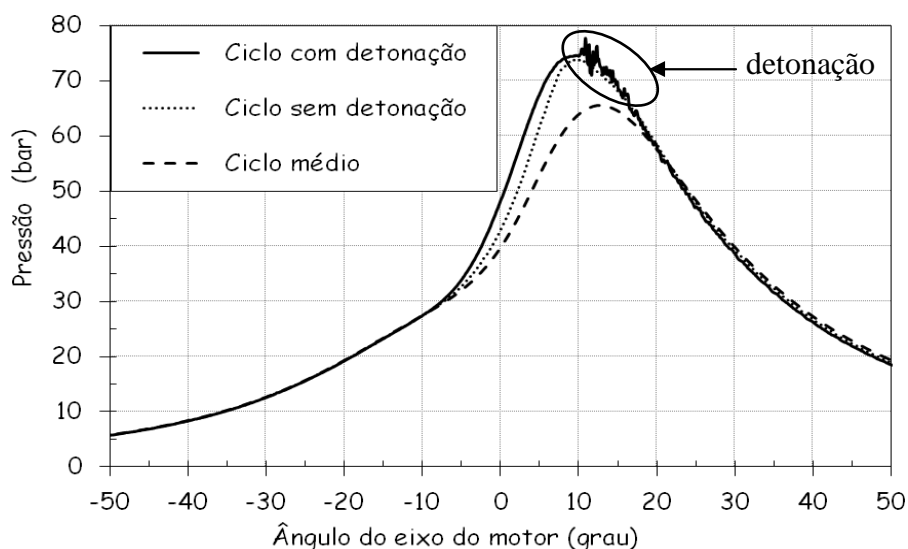


FIGURA 4.1 – Ciclos considerados na simulação computacional - sensor

Verifica-se a ocorrência de detonação a partir do valor de 10° do ângulo do eixo do motor. As diferenças nos níveis máximos de pressão revelam a presença de significativa variabilidade cíclica, típica de motores a combustão interna de ignição por centelha.

A partir desta consideração foi utilizado o ciclo médio para a validação do respectivo modelo computacional. Tal escolha procurou utilizar um ciclo que fosse representativo da condição de funcionamento do motor. Outro motivo para tal escolha é o fato do ciclo médio já ser utilizado para a validação de modelos computacionais para fins de cálculos termodinâmicos gerando resultados plenamente satisfatórios. Deste modo, tal escolha permitiu, tendo por base o mesmo modelo computacional, a realização de análises, comparações e a integração entre as diversas áreas da empresa: área experimental e área de simulação computacional.

A FIGURA 4.2 apresenta o comparativo entre o resultado experimental e o resultado da simulação computacional utilizando o software GT-Power para a configuração de injeção *PFI* utilizando *CNG* para lambda igual a 1,0.

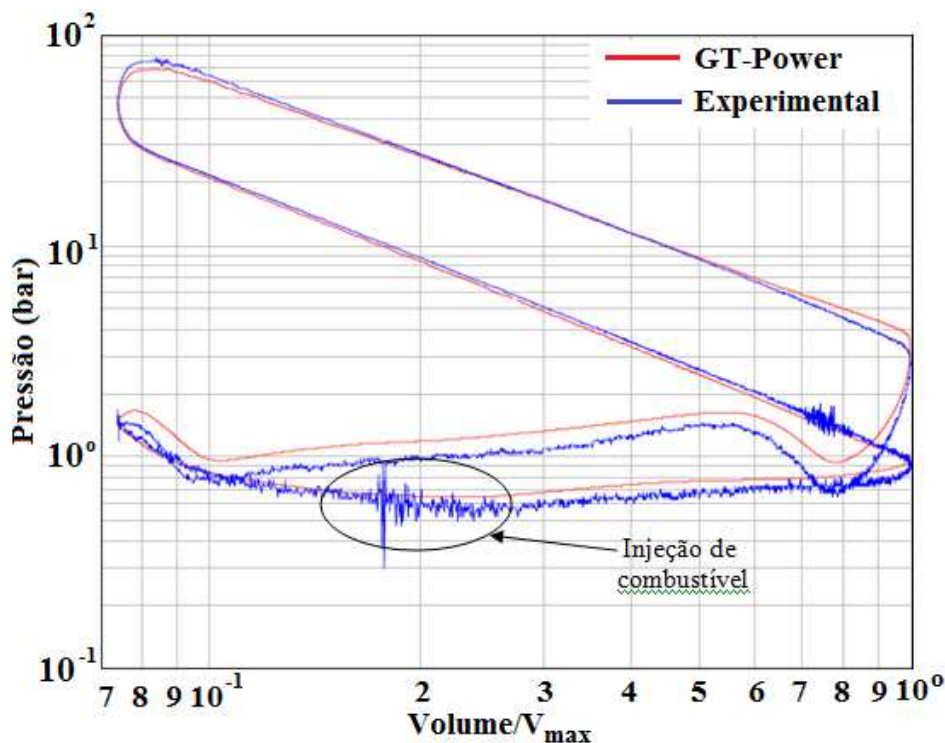


FIGURA 4.2 – Validação do modelo computacional utilizando GT-Power – sensor

Pode ser visto a partir da FIG. 4.2 que nos ciclos de interesse de funcionamento do motor (compressão e expansão) as curvas simulada e experimental

mostram-se bastante similares. Deste modo, para a caracterização de detonação utilizando o sensor de pressão, tal modelo mostrou-se satisfatório. A oscilação destacada na figura se refere ao instante em que ocorre a injeção de combustível.

O mesmo procedimento foi também realizado para ciclos obtidos a partir da vela instrumentada conforme pode ser visto na FIG. 4.3.

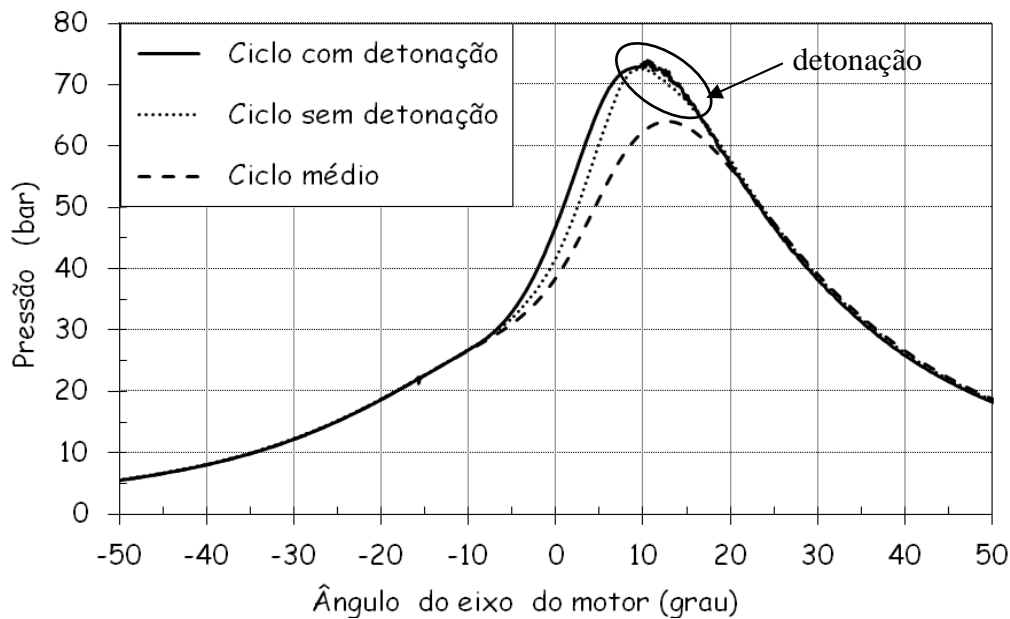


FIGURA 4.3 – Ciclos considerados na simulação computacional - vela

A partir da visualização das curvas da Figura 4.3 verifica-se a influência do posicionamento do sensor na câmara de combustão. Em relação aos mesmos ciclos considerados para o sensor de pressão e mostrados na Figura 4.1 nota-se diferenças tanto nos níveis de pressão quanto no comportamento da curva de pressão. Isto se deve ao posicionamento centralizado da vela instrumentada a qual detecta modos acústicos diferentes do sensor de pressão, conforme será discutido nos itens 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5. Para um mesmo ciclo, o sinal proveniente do sensor localizado mais ao centro (vela instrumentada) não é capaz de captar, com a mesma intensidade, os sinais de alta frequência provenientes da ocorrência do fenômeno da detonação.

A FIGURA 4.4 apresenta a validação do modelo para a mesma configuração de sistema de injeção e combustível referente à vela instrumentada.

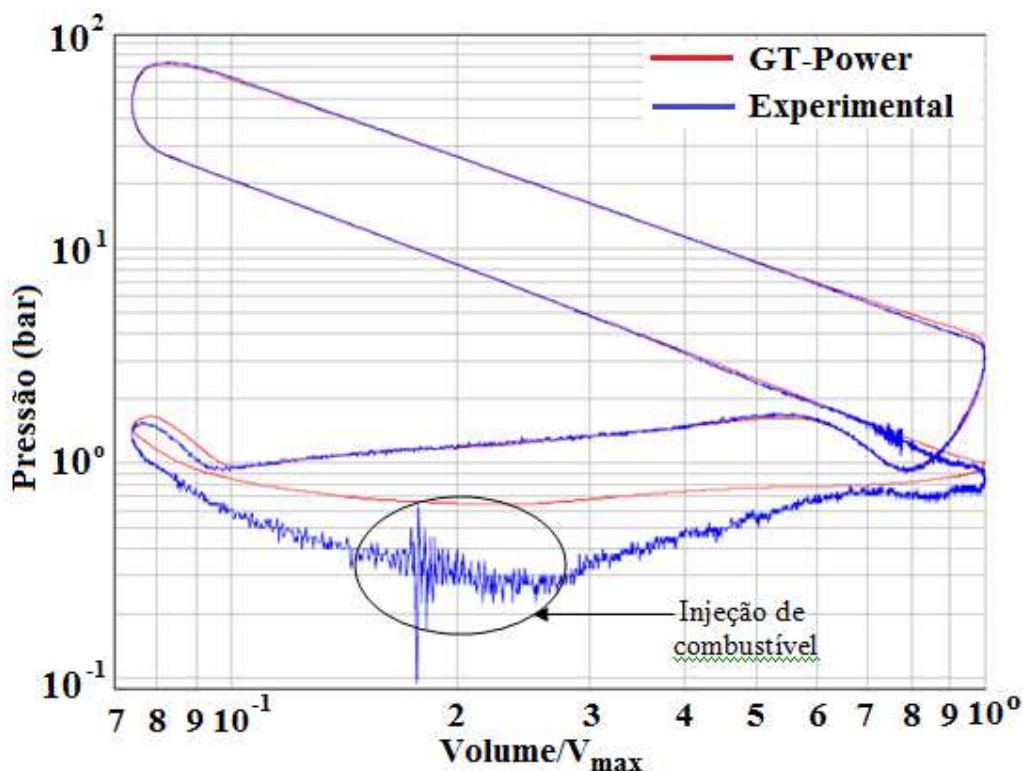


FIGURA 4.4 – Validação do modelo computacional utilizando GT-Power – vela

Analogamente à situação referente ao sensor de pressão, pode ser visto a partir da FIG. 4.4 que nos ciclos de interesse de funcionamento do motor (compressão e expansão) as curvas simulada e experimental mostram-se bastante similares. A oscilação destacada na figura se refere ao instante em que ocorre a injeção de combustível. Deste modo, para a caracterização da detonação utilizando a vela instrumentada tal modelo mostrou-se satisfatório.

O mesmo procedimento foi utilizado para todos os outros testes realizados com as outras configurações do sistema de injeção e com os diversos combustíveis.

Após a validação do modelo computacional para cada tipo de configuração avaliada o passo seguinte foi a utilização do software GT-Power para gerar, a partir de testes experimentais, dados para o cálculo analítico e para a simulação computacional. Para tal foram utilizados os ciclos representativos de funcionamento do motor os quais foram escolhidos considerando-se a presença inequívoca da detonação. O processo de escolha do ciclo representativo está descrito nos itens 4.3.2.1, 4.3.2.2 e 4.3.3.3 os quais referem-se ao sensor de pressão, à vela instrumentada e ao acelerômetro, respectivamente.

4.1.2 Estudo da influência dos valores de lambda

A primeira configuração do sistema de injeção utilizada para os cálculos analíticos das frequências foi a do tipo *PFI* utilizando *CNG* conforme descrito na TAB. 3.1. Foram utilizados como dados de entrada, para o cálculo das velocidades do som, os valores de temperatura máxima da massa queimada na câmara de combustão e as relações entre os calores específicos a pressão constante e a volume constante simulados a partir dos resultados experimentais (provas 2, 4 e 6 da TAB. 3.1 para diferentes valores de lambda: $\lambda=1,0$, $\lambda=1,3$ e $\lambda=1,5$). Os valores dos comprimentos de onda referentes ao 1º modo circunferencial foram obtidos a partir dos valores da FIG. 3.2. Os resultados de frequência podem ser visualizados na TAB. 4.1 e referem-se à utilização do sensor de pressão.

TABELA 4.1
Resultados *PFI CNG*: sensor de pressão (1º modo circunferencial)

Ângulo do eixo do motor	Lambda = 1,0				Lambda = 1,3				Lambda = 1,5				
	T _{Max} (K)	γ	V _{Som} (m/s)	Freq (kHz)	T _{Max} (K)	γ	V _{Som} (m/s)	Freq (kHz)	T _{Max} (K)	γ	V _{Som} (m/s)	Freq (kHz)	
0	2668	1,27	987	4,54	2391	1,28	939	4,31	2245	1,29	912	4,19	
5	2733	1,26	993	4,56	2425	1,27	941	4,33	2274	1,28	914	4,20	
10	2728	1,25	990	4,55	2412		937	4,31	2257		909	4,18	
15	2670		979	4,50	2379	1,26	929	4,27	2212	1,27	899	4,13	
20	2587		963	4,43	2294		912	4,19	2134		883	4,06	
25	2495		946	4,35	2198		893	4,11	2049		865	3,98	
30	2405		929	4,27	2106	1,27	875	4,02	1962	1,28	847	3,89	
35	2317		913	4,19	2017		857	3,94	1880		830	3,81	
40	2236		897	4,12	1937		840	3,86	1806		814	3,74	
50	2090		868	3,99	1802		811	3,73	1676		785	3,61	
60	1966		1,26	842	3,87	1700	1,28	789	3,62	1571	1,29	761	3,50
70	1868			822	3,78	1618		770	3,54	1490		741	3,41
80	1786	804		3,70	1552	1,28	755	3,47	1420	1,29	725	3,33	
90	1722	790		3,63	1494		741	3,40	1366		711	3,27	

A FIGURA 4.5 apresenta os resultados obtidos onde pode-se visualizar as diferenças encontradas em função dos diversos valores de lambda.

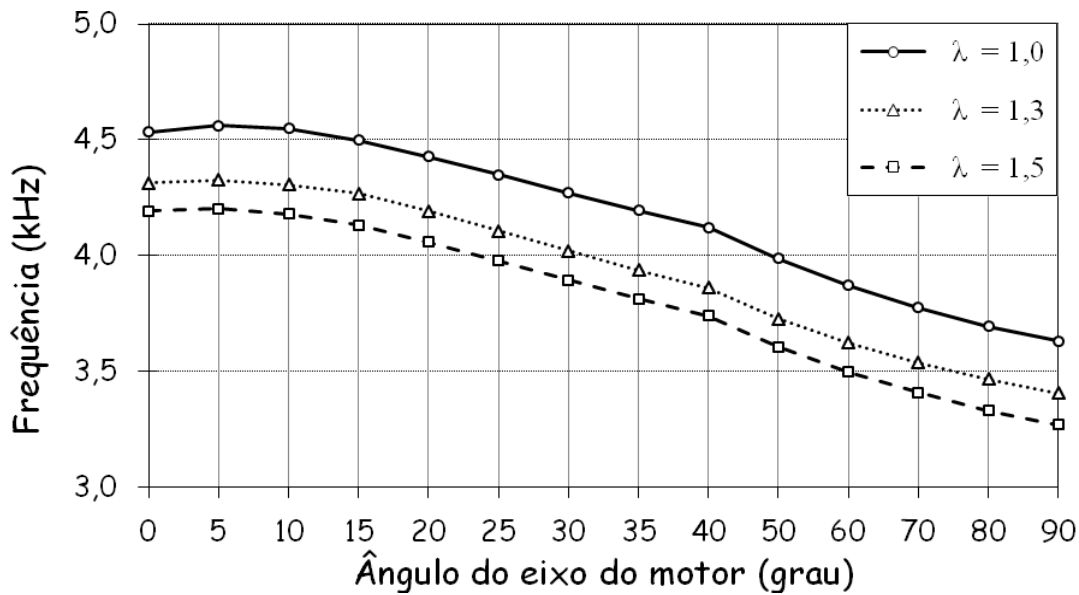


FIGURA 4.5 - Resultados dos cálculos analíticos - PFI CNG: 1º modo circunferencial

Da análise dos resultados, verifica-se a diminuição dos valores de frequência em função do aumento do ângulo do eixo do motor. Isto pode ser explicado pela respectiva redução dos valores da temperatura máxima da massa queimada no interior da câmara de combustão à medida que o pistão se desloca em direção ao ponto morto inferior. Além disto, observa-se também uma diferença praticamente constante, ao longo dos valores do ângulo do eixo do motor, entre as curvas referentes aos valores de lambda: quanto mais elevado o valor de lambda, menores são os valores de frequência. Também neste caso, a explicação se baseia nos menores valores das temperaturas máximas da massa queimada presentes na câmara de combustão à medida que aumenta o valor de lambda.

4.1.3 Estudo da influência da estrutura de fluxo

Outro estudo realizado foi a avaliação da influência da estrutura de fluxo no conteúdo de frequências no interior da câmara de combustão. A configuração escolhida para tal foi a injeção líquida utilizando Etanol para diferentes estruturas de fluxo (*low swirl, medium swirl and tumble e high swirl*) e os cálculos referem-se às provas 6, 19 e 25 elencadas na TAB. 3.2. Nestes experimentos o valor de lambda foi mantido em 1,3 e a pressão de injeção de combustível em 140 bar. O procedimento adotado foi o mesmo utilizado na configuração PFI CNG para o estudo da influência dos valores de lambda.

Neste caso, foi utilizada a vela instrumentada e os resultados apresentados na TAB. 4.2 referem-se ao 1º modo circunferencial

TABELA 4.2

Resultados *DI* Etanol: vela instrumentada (1º modo circunferencial)

Ângulo do eixo do motor	<i>low swirl</i>				<i>medium swirl and tumble</i>				<i>high swirl</i>			
	T _{Max} (K)	γ	V _{Som} (m/s)	Freq (kHz)	T _{Max} (K)	γ	V _{Som} (m/s)	Freq (kHz)	T _{Max} (K)	γ	V _{Som} (m/s)	Freq (kHz)
0	2408	1,15	892	4,10	2432	1,15	897	4,12	2445	1,14	895	4,12
5	2463	1,13	894	4,11	2487	1,13	897	4,12	2485	1,13	897	4,12
10	2440	1,14	892	4,10	2475		896	4,12	2468	1,14	898	4,13
15	2374	1,15	887	4,08	2421	1,15	893	4,11	2366	1,15	883	4,06
20	2275	1,17	874	4,02	2322	1,17	882	4,06	2260	1,16	867	3,98
25	2172	1,18	860	3,95	2205	1,18	864	3,97	2156	1,17	850	3,91
30	2074	1,20	844	3,88	2097	1,19	846	3,89	2063	1,18	836	3,84
35	1980	1,21	828	3,81	1998	1,20	829	3,81	1975	1,19	821	3,77
40	1893		812	3,73	1909	1,21	813	3,74	1894	1,20	806	3,71
50	1749	1,23	785	3,61	1761	1,22	785	3,61	1755	1,21	781	3,59
60	1631	1,24	762	3,50	1648	1,23	764	3,51	1640	1,22	758	3,49
70	1539	1,25	742	3,41	1557	1,24	745	3,43	1561	1,23	743	3,42
80	1465	1,26	727	3,34	1482	1,25	729	3,35	1496	1,24	730	3,36
90	1403		713	3,28	1419	1,26	716	3,29	1444	1,25	720	3,31

A FIGURA 4.6 apresenta os resultados acima obtidos onde visualiza-se as pequenas diferenças encontradas em função das diversas estruturas de fluxo.

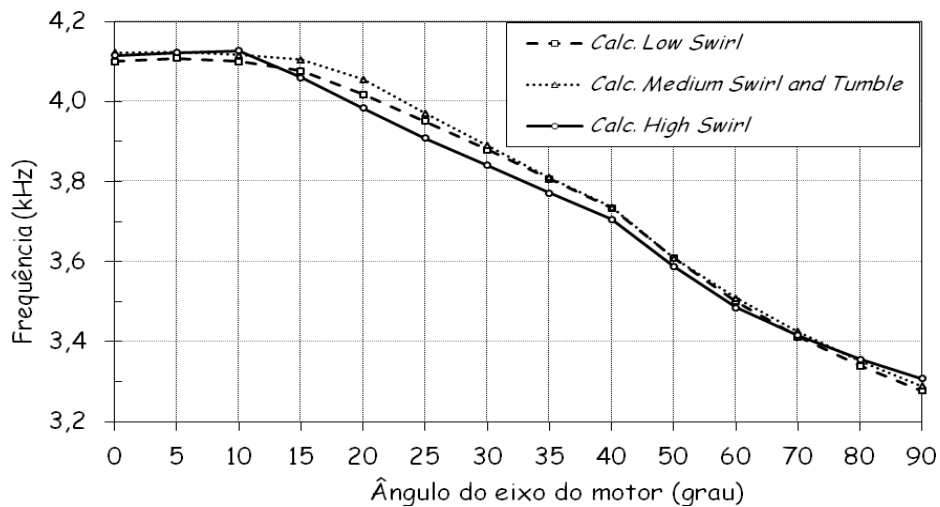


FIGURA 4. 6 – Valores de frequências determinados de forma analítica – *DI* Etanol

Da análise dos resultados verifica-se a diminuição dos valores de frequência em função do aumento do ângulo do eixo do motor. Isto pode ser explicado pela respectiva redução dos valores da temperatura máxima da massa queimada no interior da câmara de combustão à medida que o pistão se desloca em direção ao ponto morto inferior.

Entretanto, não foi verificada diferença significativa, ao longo dos valores do ângulo do eixo do motor, entre as curvas referentes aos diversos tipos de estruturas de fluxo. Neste caso, a explicação se baseia no fato de que as temperaturas máximas da massa queimada presentes na câmara de combustão, para valores fixos do ângulo do eixo do motor, são praticamente idênticas para as três configurações já que o valor de lambda é constante ($\lambda=1,3$).

4.1.4 Avaliação global

O procedimento relacionado à Etapa 1 foi finalizado com o cálculo da configuração referente ao sistema *PFI CNG* e $\lambda=1,0$. Isto se deveu ao fato dos resultados obtidos diferirem bastante em relação aos resultados experimentais e simulados por meio do *FEM* cujos comparativos podem ser visualizados por meio da Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Comparativo: frequências calculadas, simuladas e experimentais - sensor

Ângulo do Eixo do motor (°)	Frequência (kHz)			Erro Relativo (%)	
	Calculada	Simulada FEM	Experimental	Exp. x Calc.	FEM x Calc.
0	4,54	6,52	Não observado	-	-
5	4,56	6,48			
10	4,55	6,24	6,14	25,9	27,1
15	4,50	5,91	5,93	24,1	23,9
20	4,43	5,57	5,72	22,6	20,5
25	4,35	5,27	5,45	20,2	17,4
30	4,27	5,01	5,19	17,7	14,8
35	4,19	4,80	4,92	14,8	12,5
40	4,12	4,62	4,71	12,5	10,8
50	3,99	4,34	Não observado	-	-
60	3,87	4,14			
70	3,78	3,98			
80	3,70	3,87			
90	3,63	3,76			

Verifica-se que as diferenças encontradas foram significativas e, assim sendo, decidiu-se pela não realização de nenhum outro cálculo analítico para as configurações de sistemas de injeção ou para as estruturas de fluxos restantes. Conforme será detalhado no item 4.2.4, a comparação entre os resultados obtidos desta forma e aqueles obtidos a partir da utilização do método de elementos finitos (o qual utiliza a geometria real da câmara de combustão) demonstrou que a Etapa 1 permite apenas que se avalie a ordem de grandeza das frequências associadas aos modos acústicos. De modo geral, ele é apenas recomendado como uma primeira aproximação grosseira para se determinar a faixa de frequência a ser investigada já que o erro obtido pode chegar a 27,1% em relação aos resultados simulados e a 25,9% em relação aos resultados experimentais, na região de interesse (a partir de 10°, ponto de início da detonação). Isto decorre da dificuldade de se incluir em um procedimento simplificado a geometria detalhada (real) da câmara de combustão. Os resultados calculados (baseados na geometria simplificada), quando comparados aos resultados experimentais e simulados, foram fortemente influenciados pela não consideração do *bow* no pistão a qual modifica de maneira significativa a geometria da câmara de combustão do motor ensaiado.

A TABELA 4.4 apresenta, para a vela instrumentada, os resultados comparativos para a configuração *DI* Etanol e valor de lambda igual a 1,3.

Tabela 4.4 – Comparativo: frequências calculadas, simuladas e experimentais - vela

Ângulo do eixo do motor (°)	Frequência (kHz)			Erro Relativo (%)	
	Calculada	Simulada FEM	Experimental (Vela)	Exp. x Calc.	FEM x Calc.
0	4,10	5,89	Não observado	--	--
5	4,11	5,83			
10	4,10	5,62	5,24	21,7	27,1
15	4,08	5,33	4,92	17,2	23,6
20	4,02	5,03	4,76	15,6	20,1
25	3,95	4,75	4,60	14,1	16,8
30	3,88	4,51	4,55	14,7	14,0
35	3,81	4,32	Não observado	--	--
40	3,73	4,15			
50	3,61	3,90			
60	3,50	3,72			
70	3,41	3,60			
80	3,34	3,50			
90	3,28	3,41			

Analogamente à configuração anterior, verifica-se que as diferenças encontradas foram significativas corroborando a decisão de não realizar outros cálculos analíticos para as configurações de sistemas de injeção ou para as estruturas de fluxos restantes. O erro obtido atingiu o percentual de 27,1% em relação aos resultados simulados e a 21,7% em relação aos resultados experimentais, na região de maior importância. Em função do aumento do ângulo do eixo do motor, a tendência do erro foi de diminuição o que sugere que a presença do *bowl* influencia cada vez menos os resultados à medida que o pistão se desloca em direção ao ponto morto inferior.

4.2 Cálculo utilizando o Método de Elementos Finitos - *FEM* (Etapa 2)

De forma análoga ao item 4.1, nesta fase foram obtidos os resultados abaixo elencados divididos de acordo com a configuração do sistema de injeção utilizado.

4.2.1 Sistema de injeção *PFI* utilizando *CNG*

Ao utilizar este sistema de injeção de combustível foi analisada a influência do posicionamento dos sensores instalados na câmara de combustão (sensor de pressão e a vela instrumentada), dos valores de lambda (níveis de diluição por ar) e das diversas estruturas de fluxo no conteúdo de frequências gerado quando da ocorrência da detonação. Os dados oriundos da simulação computacional, para esta configuração de sistema de injeção, ao utilizar o GT-Power encontram-se no Apêndice C, nas TAB. C.1, C.2 e C.3.

4.2.1.1 Considerações gerais sobre a vela instrumentada

A FIGURA 4.7 apresenta os valores de frequências obtidos para os dez primeiros modos acústicos em função do ângulo do eixo do motor (o primeiro modo foi desprezado pois trata-se do modo de corpo rígido e, portanto, sem interesse para este trabalho) referentes à vela instrumentada.

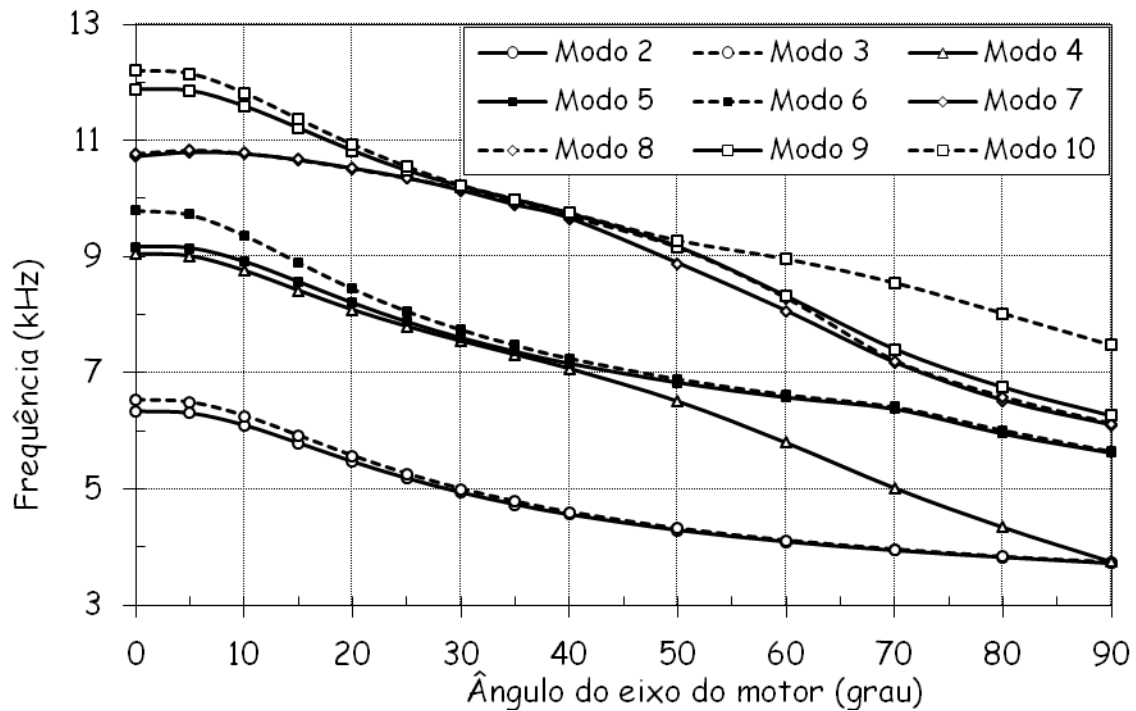


FIGURA 4.7 – Modos acústicos para $\lambda = 1,0$ (vela instrumentada)

Da FIGURA 4.7, pode-se concluir os seguintes pontos:

- todos os modos acústicos, em maior ou menor grau, apresentam o comportamento típico de redução da frequência à medida que o ângulo do eixo do motor aumenta. Tal alteração está relacionada à redução dos valores de temperatura no interior da câmara de combustão à medida que o pistão se desloca em direção ao ponto morto inferior os quais afetam diretamente os valores da velocidade do som e, conseqüentemente, reduz os valores das frequências,
- os modos 2 e 3 são os modos emparelhados referentes ao 1º modo circunferencial (modos acústicos com o mesmo comportamento mas que apresentam diferenças entre os seus valores de frequências em função da presença de alguma assimetria na câmara de combustão). Neste caso, a diferença máxima nos valores de frequência obtida foi de 3,1% para o valor do ângulo do eixo do motor de 0°. Tal resultado está de acordo com Hickling *et al* (1983) o qual fornece uma indicação da diferença máxima de frequências entre modos emparelhados de 10%. Para o motor em questão, os modos emparelhados são gerados pela diferença dos diâmetros nodais os quais são determinados pelas assimetrias presentes na câmara de combustão oriundas do posicionamento das válvulas de aspiração e de escape. Na FIG. 4.8 visualiza-se tais modos emparelhados onde observa-se ainda que os mesmos estão defasados por um ângulo de 90°, no sentido horário.

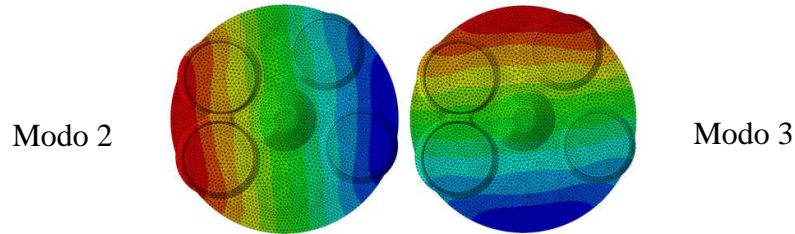


FIGURA 4.8 – Modos acústicos emparelhados (1° modo circunferencial) para $\lambda = 1,0$

A mesma observação anterior, quanto aos modos emparelhados, é válida para os seguintes modos:

- 5 e 6: modos circunferenciais emparelhados (2° modo) cuja diferença máxima de frequência é de 6,8 %, para um valor de ângulo de eixo do motor de 0° . O defasamento angular é de 45° no sentido anti-horário. A FIG. 4.9 apresenta tais modos.

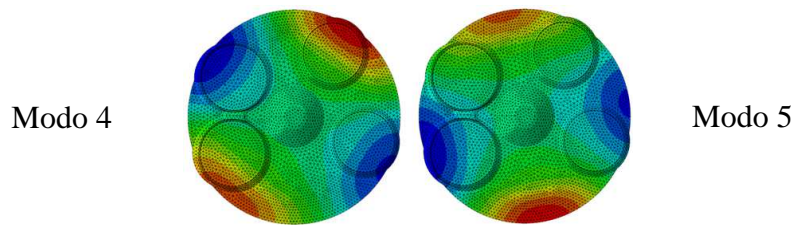


FIG. 4. 9 – Modos acústicos emparelhados (2° modo circunferencial) para $\lambda = 1,0$

- 7 e 8: modos combinados emparelhados (1° modo combinado) cuja diferença máxima de frequência é de 3,1%, para um valor de ângulo de eixo do motor de 50° . O defasamento angular é de 90° no sentido horário. A FIG. 4.10 apresenta tais modos.

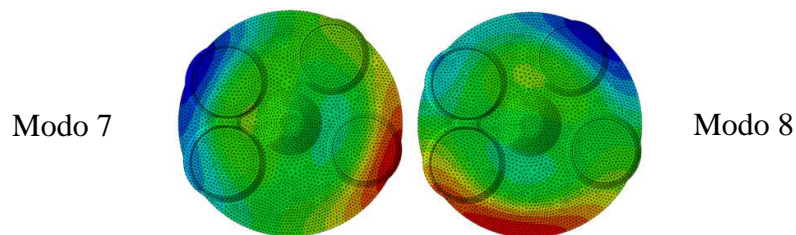


Figura 4.10 – Modos acústicos emparelhados (1° modo combinado) para $\lambda = 1,0$

- 9 e 10: modos circunferenciais emparelhados (3° modo) cuja diferença máxima de frequência é de 2,8 %, para um valor de ângulo de eixo do motor de 0° . O defasamento angular é de 30° no sentido horário. A FIG. 4.11 apresenta tais modos.

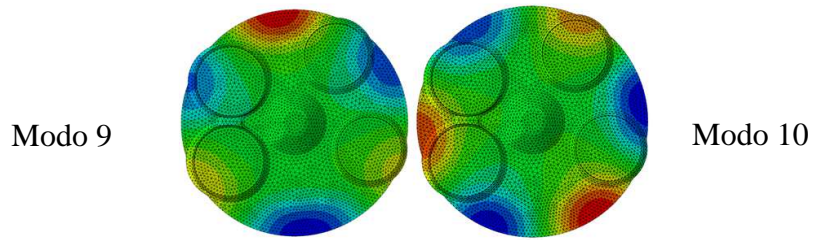


FIGURA 4.11 – Modos acústicos emparelhados (3º modo circunferencial) para $\lambda = 1,0$

O último dos modos acústicos visualizados é o modo 4 (1º modo radial) o qual pode ser visto na FIG. 4.12.

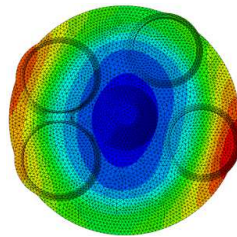


FIGURA 4.12 – 1º modo radial para $\lambda = 1,0$

4.2.1.2 Considerações gerais sobre o sensor de pressão

Analogamente à vela instrumentada, os dez primeiros modos acústicos referentes ao sensor de pressão podem ser visualizados na FIG. 4.13.

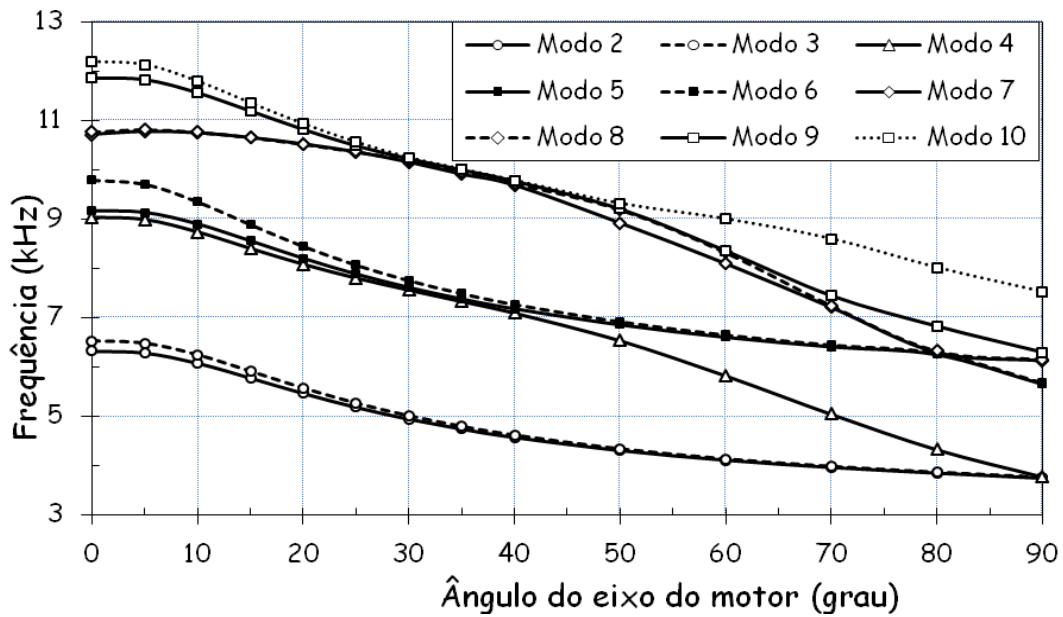


FIGURA 4.13 – Modos acústicos para $\lambda = 1,0$ (sensor de pressão)

De modo geral, verifica-se o mesmo comportamento dos modos ao longo do ângulo do eixo do motor. Pequenas diferenças podem ser verificadas para ângulos próximos de 90° mas tais valores já não são importantes para a análise da detonação e não serão objeto de análise neste trabalho.

4.2.1.3 Estudo da influência do posicionamento do sensor

De modo a se verificar as diferenças entre os resultados encontrados a partir dos dois tipos de sensores (vela instrumentada e sensor de pressão) a FIG. 4.14 apresenta os resultados obtidos na simulação computacional para alguns dos principais modos acústicos.

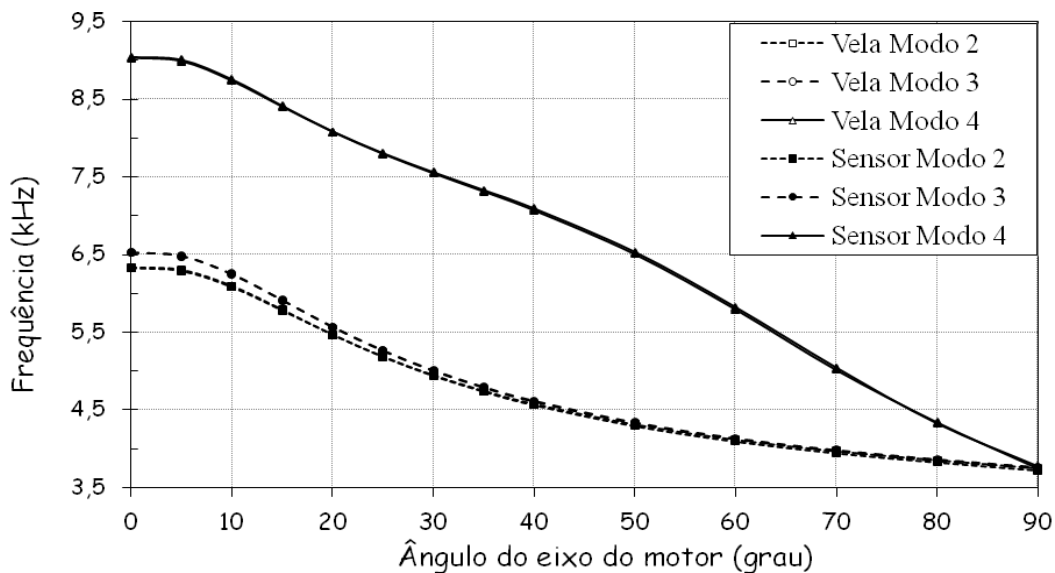


FIGURA 4.14 – Comparativo de frequências da vela e do sensor

Observa-se que os resultados são muito próximos e as diferenças encontradas - erro percentual máximo de 0,6% para todos os modos - podem ser consideradas insignificantes para o objetivo deste trabalho. Tal resultado pode ser atribuído, em grande parte, ao fato de ter sido considerado o ciclo médio para ambos os sensores no procedimento de validação do modelo computacional, o que tende a aproximar as temperaturas máximas e, conseqüentemente, diminuir as suas diferenças. Deste modo, para a determinação das frequências dos modos acústicos utilizando a simulação computacional por meio do método de elementos finitos, conclui-se que ambos os sensores podem ser indistintamente utilizados para se gerar os dados de entrada.

Para se ter uma visualização global dos tipos de modos encontrados na câmara de combustão, a FIG. 4.15 apresenta os nove primeiros modos acústicos (excetuando-se o 1º modo: corpo rígido) para um ângulo de eixo do motor de 10º considerando-se a condição de lambda igual a 1,0.

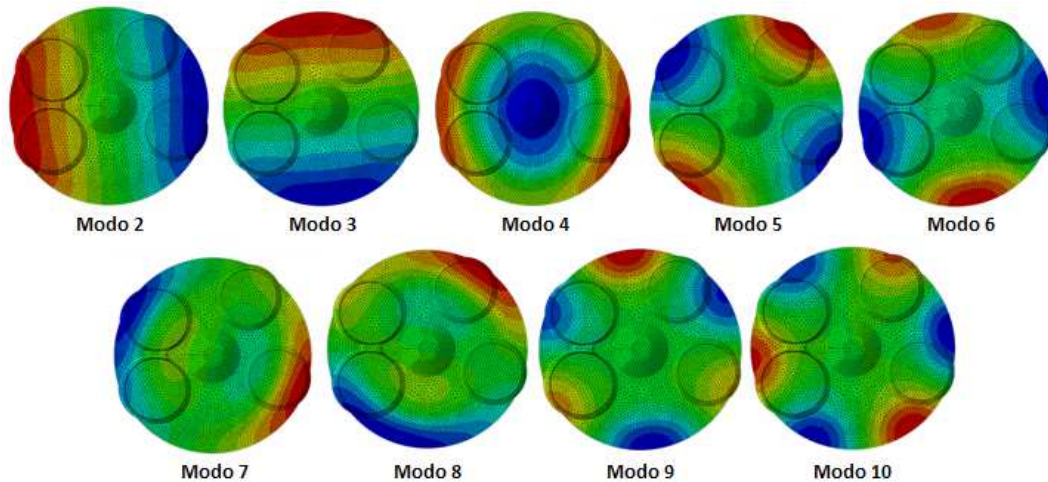


FIGURA 4.15 – Modos acústicos (2 a 10)

A visualização dos modos acima pode também ser verificada para as outras configurações avaliadas. Dependendo dos valores de lambda, os valores de temperatura, da velocidade do som e, conseqüentemente, das frequências serão diferentes mas os tipos de modos acústicos serão os mesmos acima mostrados, conforme será explicado nos próximos itens. Já em relação às diversas estruturas de fluxo avaliadas pouca diferença será verificada nos valores de frequências sendo, entretanto, mantidas a configuração dos modos acústicos.

A FIG. 4.16 apresenta o andamento do modo 2 em função do ângulo do eixo do motor para a condição de funcionamento do motor para lambda igual a 1,0.

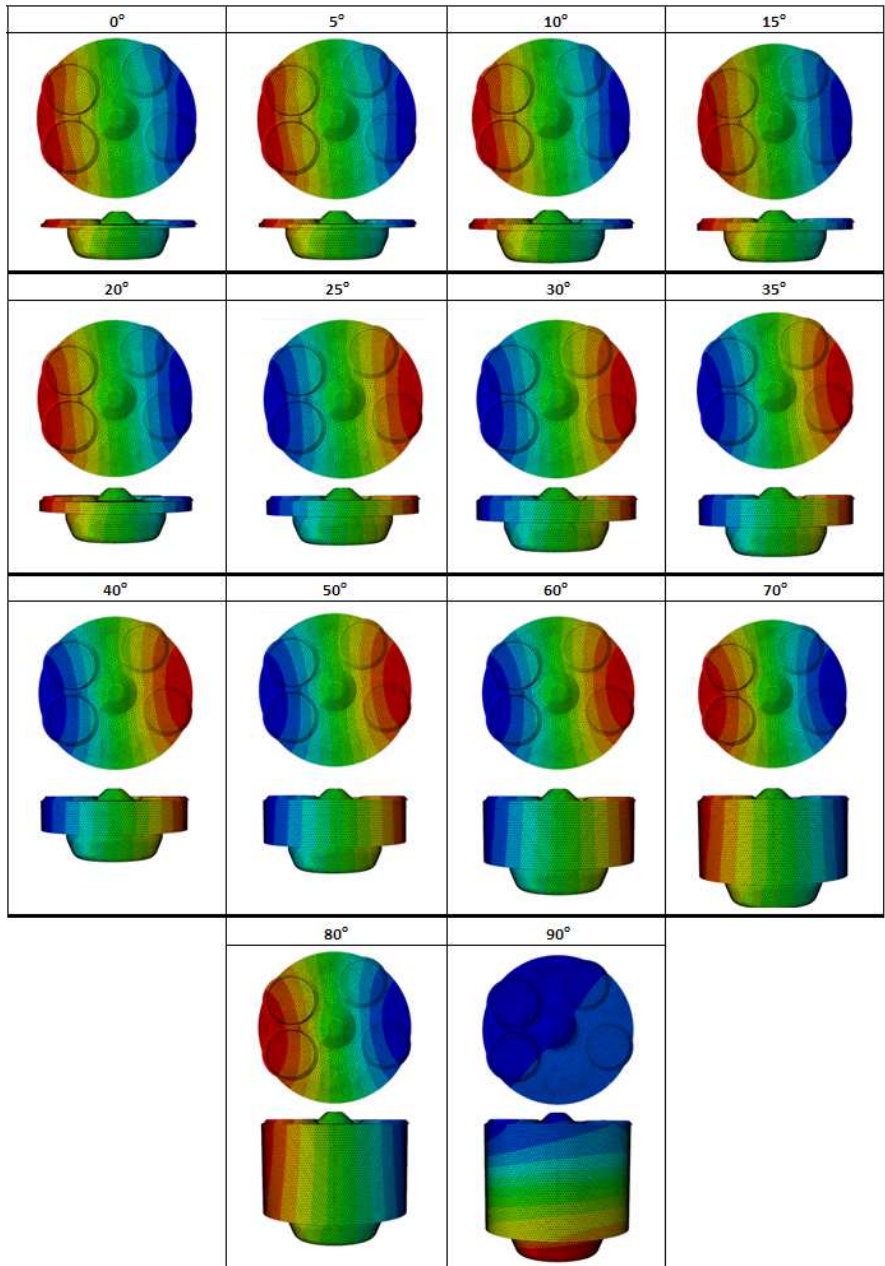


FIGURA 4. 16 – Modo 2: variação com o ângulo do eixo do motor

Nota-se que entre os ângulos de eixo do motor de 20° e 25° e entre 60° e 70°, ocorre uma inversão de 180° no posicionamento das amplitudes dos modos acústicos. Isto não tem significado físico e está relacionado apenas a arredondamentos matemáticos durante o cálculo da fase. Além disto, pode ser visualizada a alteração do modo circunferencial para o modo axial quando o ângulo do eixo do motor atinge 90°. Isto ocorre pelo fato de que, nesta posição, o volume da câmara de combustão é bastante grande e os modos axiais começam a se sobressair. Entretanto, tais modos não têm grande importância visto que a detonação já não mais ocorre nesta posição do pistão.

4.2.1.4 Estudo da influência dos valores de lambda

Uma vez verificada a influência do tipo de sensor na simulação dos modos acústicos presentes na câmara de combustão quando da ocorrência de detonação foi verificada a influência do valor de lambda nos referidos cálculos. Para tal foram comparados os resultados obtidos, a partir do sensor de pressão, para três diferentes valores de lambda ($\lambda=1,0$, $\lambda=1,3$ e $\lambda=1,5$). A FIG. 4.17 apresenta as diferenças encontradas para o 1º modo circunferencial, o 1º modo radial bem como o perfil das temperaturas simuladas no interior da câmara de combustão em função dos valores de lambda. Os outros modos acústicos apresentam o mesmo comportamento com pequenas diferenças nos valores.

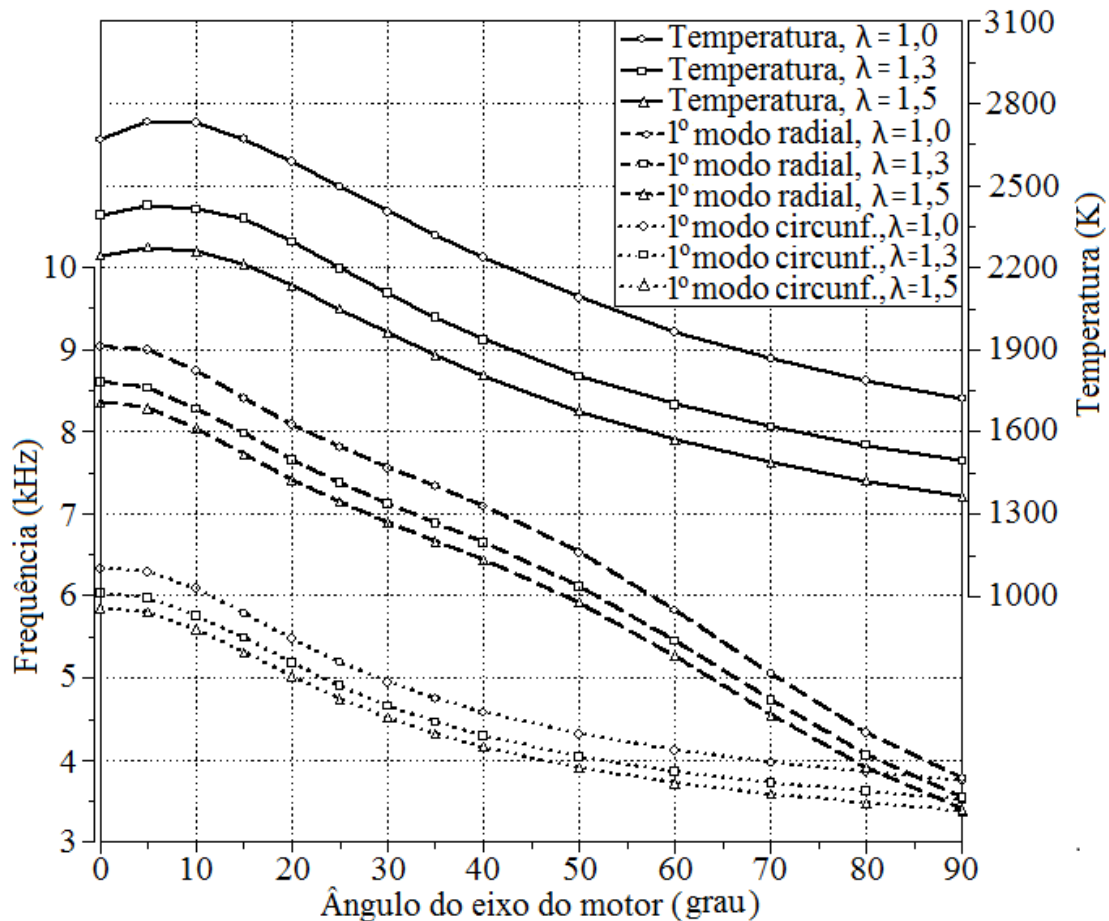


FIG. 4.17 – Comparativo de frequências em função de lambda (modos 2 e 4)

Para ambos os modos acústicos foi verificada uma significativa diferença nos valores de frequência simulados em função dos valores de lambda. Para o 1º modo circunferencial, a diferença máxima entre os valores extremos de lambda foi de 496,1

Hz (em torno de 5° de ângulo de eixo do motor) enquanto que para o 1° modo radial tal valor foi de 710,9 Hz (em torno de 10° de ângulo de eixo do motor). Tais resultados são significativamente importantes no sentido de se estabelecer os limites de frequência para a detecção da detonação já que as pesquisas desenvolvidas neste motor podem abranger tais condições.

Dentre outras influências, a explicação para tal diferença pode ser atribuída principalmente aos valores das temperaturas na câmara de combustão. Para um valor fixo de ângulo do eixo do motor, à medida que se empobrece a mistura (partindo-se de lambda estequiométrico) a temperatura no interior da câmara de combustão é, comparativamente, menor. Isto faz com que a velocidade do som também diminua e, conseqüentemente, a frequência dos modos acústicos. Tal comportamento pode ser observado na própria FIG. 4.17 onde são apresentadas as variações nos valores de temperatura (simuladas utilizando-se o software GT-Power).

4.2.2 Sistema de injeção direta de combustível utilizando Etanol

Similarmente à análise realizada para a configuração de sistema de injeção *PFI* utilizando *CNG* foi também realizada uma análise para o sistema de injeção direta de combustível utilizando Etanol. Para esta configuração foram avaliadas as influências do posicionamento do sensor, dos valores de lambda e das diferentes estruturas de fluxo. Os dados de entrada para a simulação dos modos acústicos podem ser visualizados no Apêndice C por meio das Tabelas C4, C5, C6, C7, C8 e C9.

4.2.2.1 Influência do posicionamento do sensor

Também para esta configuração foram verificadas as diferenças entre os resultados simulados a partir dos dados experimentais dos dois tipos de sensores, a saber: vela instrumentada e sensor de pressão. A FIG. 4.18 apresenta os resultados obtidos na simulação computacional para alguns dos principais modos acústicos considerando-se o valor de lambda igual a 1,3, pressão de injeção de 100 bar e estrutura de fluxo *medium swirl and tumble*.

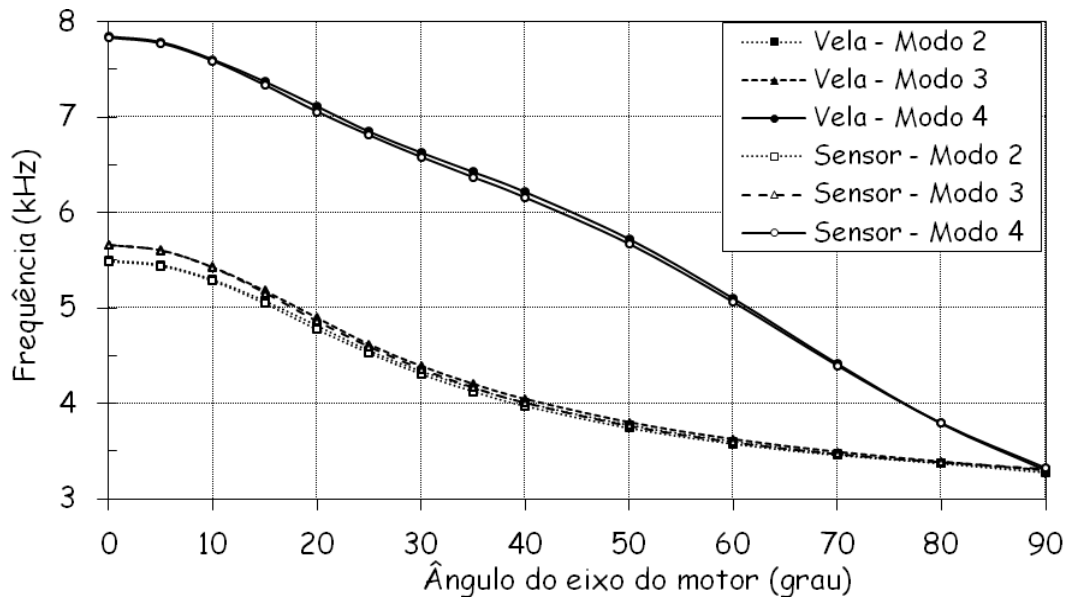


FIGURA 4.18 – Comparativo de frequências: vela instrumentada x sensor de pressão

Verifica-se que os resultados são muito próximos e as diferenças encontradas - erro percentual máximo de 1,0 % para todos os modos - são insignificantes para o objetivo deste trabalho. Tal resultado pode ser atribuído, em grande parte, ao fato de ter sido considerado o ciclo médio para ambos os sensores no procedimento de validação do modelo computacional o que tende a aproximar as temperaturas máximas e, conseqüentemente, diminuir as suas diferenças. Deste modo, também para a configuração do sistema de injeção direta líquida de etanol, a simulação computacional das frequências dos modos acústicos pode utilizar dados de entrada provenientes dos resultados experimentais obtidos indistintamente de qualquer um dos sensores.

A visualização das formas dos modos acústicos encontrados na câmara de combustão praticamente não difere significativamente daquela mostrada na FIG. 4.15 e, portanto, não será novamente mostrada.

Também a visualização do andamento do modo 2 em função do ângulo do eixo do motor apresenta praticamente o mesmo comportamento apresentado na FIG. 4.16 e, para se evitar a repetição tanto da figura quanto dos comentários, os mesmos também não serão mostrados aqui.

4.2.2.2 Influência dos valores de lambda

Uma vez verificada a influência do posicionamento do sensor na simulação dos modos acústicos presentes na câmara de combustão quando da ocorrência de detonação

foi verificada a influência do valor de lambda na referida simulação. Para tal foram comparados os resultados obtidos, a partir do sensor de pressão, para três diferentes valores de lambda ($\lambda=1,0$, $\lambda=1,3$ e $\lambda=1,5$) referentes às provas 22, 23 e 24 mostradas na TAB. 3.2. A FIG. 4.19 apresenta as diferenças encontradas para o 1º modo circunferencial, o 1º modo radial bem como os valores de temperatura máxima simuladas no interior da câmara de combustão. Os outros modos apresentam o mesmo perfil com pequenas diferenças nos valores.

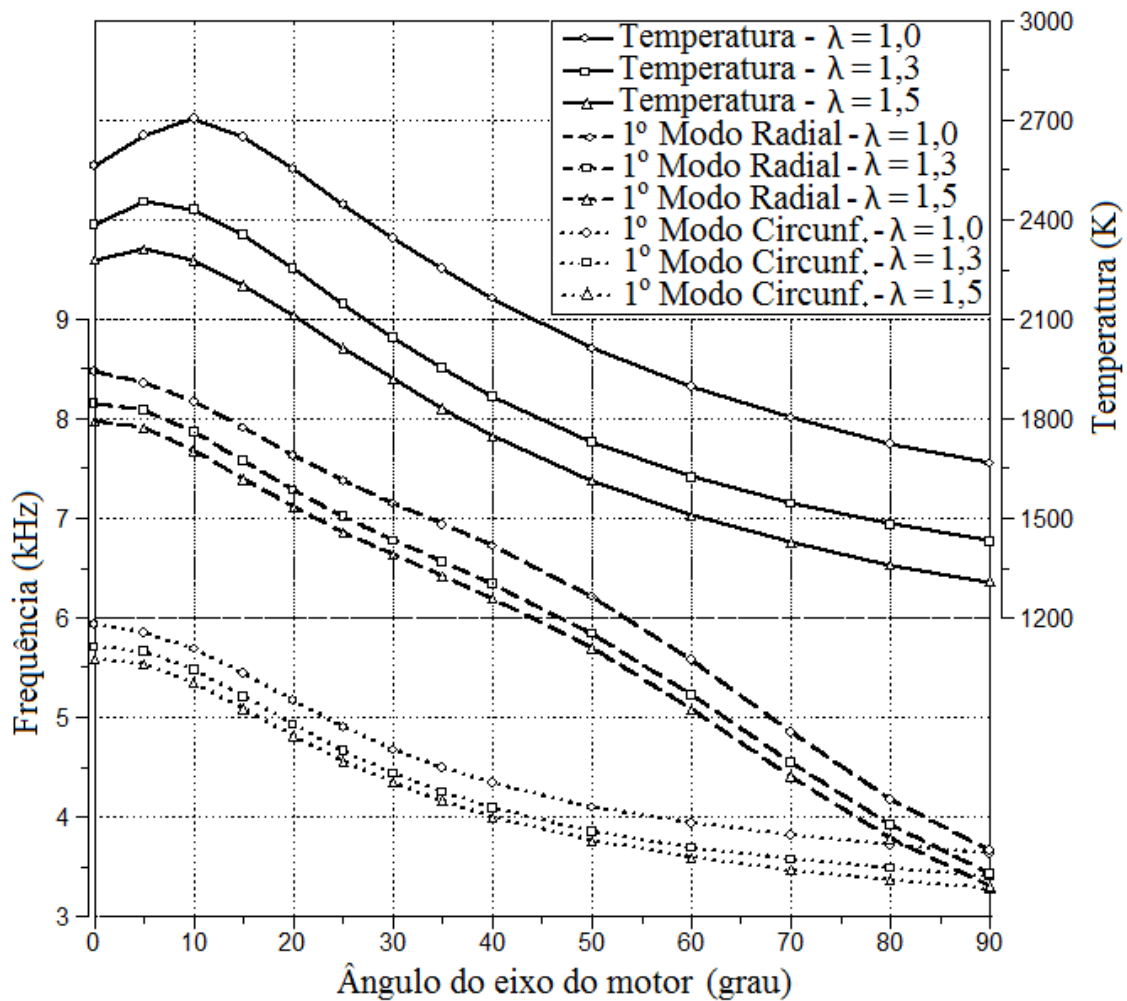


Figura 4.19 – Comparativo de frequências em função de lambda (modo 2)

Analogamente à configuração *PFI CNG* foi verificada uma significativa diferença nos valores de frequência simulados em função dos valores de lambda: diferença máxima de 358,5 Hz (em torno de 15º de ângulo de eixo do motor) para o 1º modo circunferencial e de 531,2 Hz (em torno de 40º de ângulo de eixo do motor) para o 1º modo radial.

Tal diferença pode ser explicada principalmente pela dependência da frequência em relação à temperatura no interior da câmara de combustão. Para um determinado valor do ângulo do eixo do motor, quanto mais pobre for a mistura menor será a temperatura. Isto implica numa menor velocidade do som e, conseqüentemente, num menor valor da frequência dos modos acústicos. A FIG. 4.19 também apresenta o comportamento destas temperaturas as quais foram obtidas a partir de simulação com o software GT-Power.

4.2.2.3 Influência das diferentes estruturas de fluxo

Tendo avaliado a influência dos valores de lambda nas frequências simuladas, foi realizada uma verificação da influência das diferentes estruturas de fluxo presentes na câmara de combustão, a saber: *low swirl*, *medium swirl and tumble* e *high swirl*. O valor de lambda foi mantido constante em 1,3. Os dados oriundos da simulação computacional utilizando o GT-Power os quais foram utilizados para calcular os modos acústicos utilizando o software Abaqus encontram-se no Apêndice C, nas Tabelas C.7, C.8 e C.9. As FIG. 4.20 e 4.21 apresentam o andamento do 1º modo circunferencial e do 1º modo radial, respectivamente.

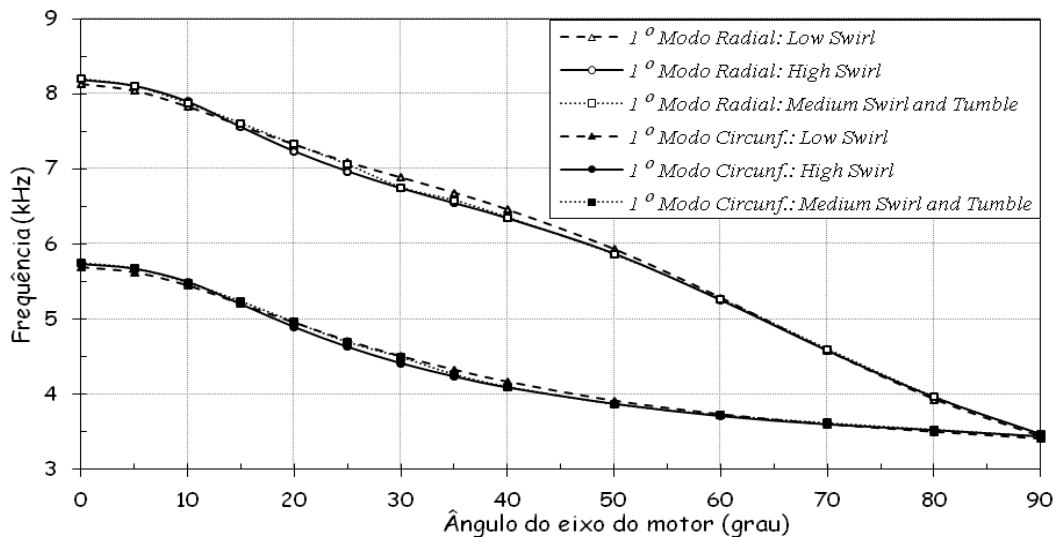


Figura 4.20 – Influência do tipo de estrutura de fluxo

Os resultados obtidos tanto para o 1º modo circunferencial quanto para o 1º modo radial são bastante conclusivos: não há diferença significativa entre os valores de frequências em função do ângulo do eixo do motor. Isto está diretamente relacionada ao

fato de que as temperaturas no interior da câmara de combustão são muito próximas para as diversas estruturas de fluxo visto que o parâmetro mais influente - lambda - para tais tipos de estruturas permaneceu constante em 1,3 para todas elas

4.2.2.4 Influência dos valores da pressão de injeção

Tendo avaliado a influência dos valores de lambda e a influência das diferentes estruturas de fluxo presentes na câmara de combustão nas frequências simuladas, foi ainda avaliada a influência dos valores da pressão de injeção. O valor de lambda foi mantido constante em 1,3 e a estrutura de fluxo foi mantida na configuração *low swirl*.

Os dados oriundos da simulação computacional utilizando o GT-Power os quais foram utilizados para calcular os modos acústicos utilizando o software Abaqus encontram-se no Apêndice C, nas Tabelas C.5 e C.7. A FIG. 4.21 apresenta o andamento do 1º modo circunferencial e do 1º modo radial, respectivamente.

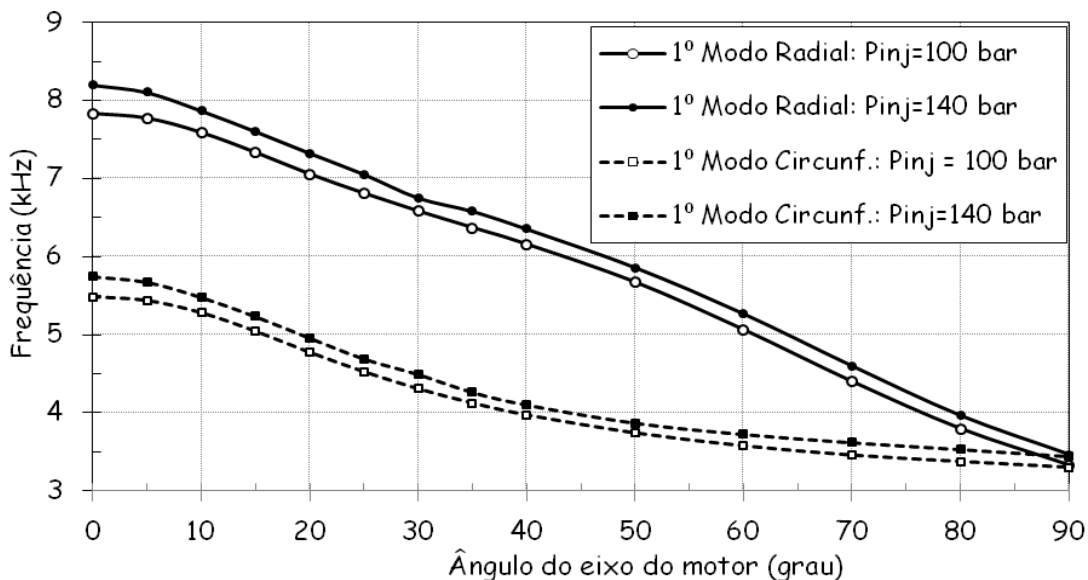


Figura 4.21 – Influência dos valores da pressão de injeção

Da análise da FIG. 4.21 observa-se que, para ambos os tipos de modos acústicos, foi verificada uma pequena diferença nos valores de frequência simulados em função dos valores da pressão de injeção. Para o 1º modo circunferencial, a diferença máxima entre os valores extremos de lambda foi de 260,4 Hz (para o valor 0º de ângulo de eixo do motor) enquanto que para o 1º modo radial tal valor foi de 371,8 Hz (também para o valor de 0º de ângulo de eixo do motor). Tal resultado está provavelmente

associado à melhor atomização do combustível para uma maior pressão de injeção do mesmo levando a uma combustão mais completa o que pode ser comprovado pelo maior valor da temperatura no interior da câmara de combustão.

4.2.3 Sistema de injeção direta de combustível utilizando CNG

Analogamente às duas configurações anteriormente avaliadas – sistema de injeção *PFI* utilizando *CNG* e sistema de injeção direta de combustível utilizando Etanol – foram analisadas a influência dos valores de lambda e a influência de diferentes estruturas de fluxo. Adicionalmente, são feitas considerações somente sobre o sensor de pressão visto que para esta configuração não foi possível a utilização de dados de entrada para a simulação dos modos acústicos oriundos da vela instrumentada.

4.2.3.1 Considerações gerais sobre o sensor de pressão

A FIGURA 4.22 apresenta os resultados obtidos na simulação computacional para alguns dos principais modos acústicos considerando-se o fixo o valor de lambda igual a 1,0 e estrutura de fluxo também mantida fixa em *low swirl*. Os dados de entrada para a obtenção dos resultados mostrados podem ser visualizados no Apêndice C na TAB. C10.

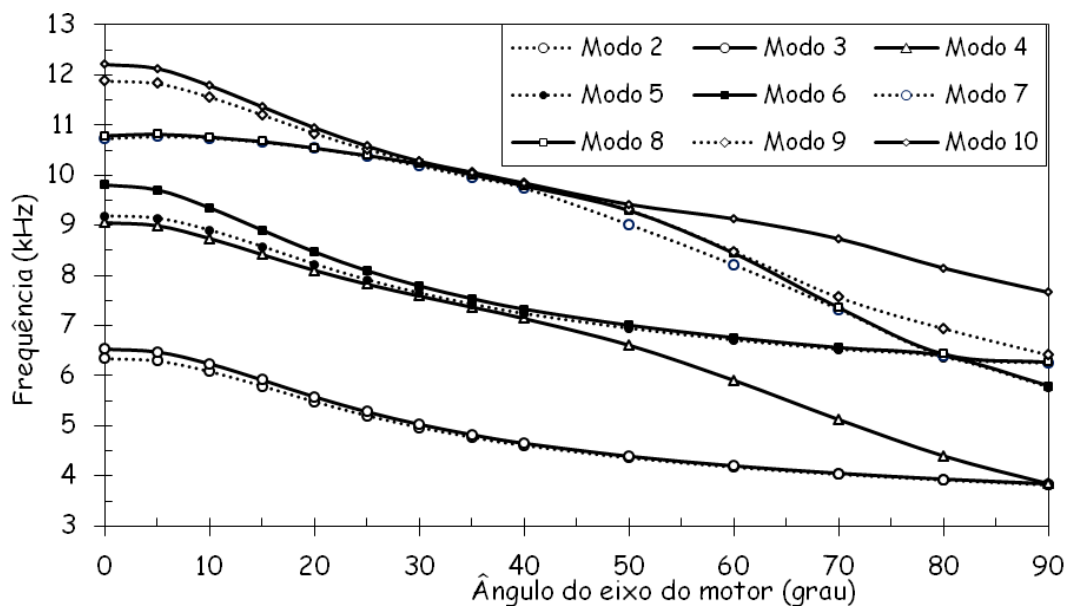


Figura 4.22 – Modos acústicos para $\lambda = 1,0$ (sensor de pressão)

Da análise da FIG. 4.22, pode-se concluir os seguintes pontos:

- a dependência da frequência com o ângulo do eixo do motor é bastante diferente para os modos acústicos circunferenciais e para o modo acústico radial;
- os modos 2 e 3 são os modos emparelhados (1º modo circunferencial). Eles apresentam o mesmo comportamento em função do ângulo do eixo do motor e diferem, nos valores de frequência, por um valor máximo de 3,1%, para um valor do ângulo do eixo do motor de 0°. Tal constatação, analogamente à configuração com o sistema de injeção *PFI* utilizando *CNG*, está de acordo com Hickling *et al* (1983) o qual indica uma diferença máxima de frequências entre modos emparelhados de 10%. Conforme já comentado no item 4.2.1.1 a presença dos modos emparelhados se deve à assimetria presente na câmara de combustão devido ao posicionamento das válvulas de aspiração e de escape.

A visualização das formas dos modos acústicos encontrados na câmara de combustão praticamente não difere daquelas mostradas na FIG. 4. 15 e, portanto, não serão novamente mostradas.

Também a visualização do andamento do modo 2 em função do ângulo do eixo do motor apresenta praticamente o mesmo comportamento apresentado na FIG. 4. 16 e, para se evitar a repetição tanto da figura quanto dos comentários, os mesmos também não serão mostrados aqui.

Conforme já citado anteriormente, para esta configuração em particular, não foi possível instrumentar o motor com a vela instrumentada e, portanto, não foi possível realizar uma comparação dos resultados com a mesma.

4.2.3.2 Influência dos valores de lambda

Após as considerações sobre o sensor de pressão foi verificada a influência do valor de lambda nos referidos cálculos. Para tal foram comparados os resultados obtidos, a partir do sensor de pressão, para três diferentes valores de lambda ($\lambda=1,0$, $\lambda=1,3$ e $\lambda=1,5$) referentes às provas 2, 4 e 6 mostradas na Tabela 3.3. Os dados de entrada para a simulação desta configuração podem ser visualizados no Apêndice C por meio das Tabelas C10, C11 e C12. A FIG. 4.23 apresenta as diferenças encontradas para os modos 2 (1º modo circunferencial) e 4 (1º modo radial). Os outros modos apresentam o mesmo perfil com pequenas diferenças nos valores.

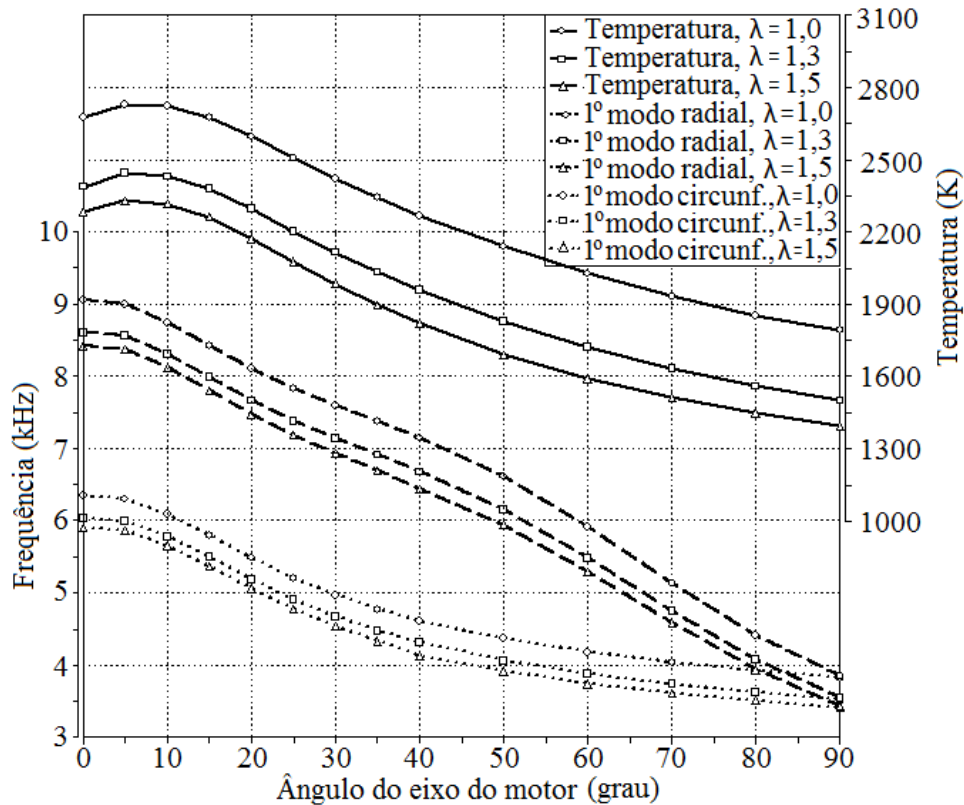


FIG. 4. 23– Comparativo de frequências em função de lambda (modo 4)

Para ambos os modos acústicos, foi verificada uma significativa diferença nos valores de frequência simulados em função dos valores de lambda: 488,5 Hz (em torno de 40° de ângulo de eixo do motor) para o 1º modo circunferencial e de 708,0 Hz (em torno de 40° de ângulo de eixo do motor) para o 1º modo radial.

Do mesmo modo que nas configurações anteriores, a explicação para esta diferença pode ser encontrada na dependência da frequência com a temperatura: para um valor fixo de ângulo de eixo do motor, quanto mais pobre é a mistura (partindo-se de lambda estequiométrico) menor é a temperatura no interior da câmara de combustão. Assim sendo, menor será a velocidade do som e, conseqüentemente, a frequência dos modos acústicos. A FIG. 4.23 também apresenta tal comportamento obtido a partir de simulação utilizando o software GT-Power.

4.2.3.3 Influência das diferentes estruturas de fluxo

Tendo avaliado a influência dos valores de lambda nas frequências simuladas, foi realizada uma verificação da influência das diferentes estruturas de fluxo presentes na câmara de combustão, a saber: *low swirl*, *medium swirl and tumble* e *high swirl*. O valor de lambda foi mantido constante em 1,3. Os dados oriundos da simulação

computacional utilizando o GT-Power os quais foram utilizados para calcular os modos acústicos utilizando o software Abaqus encontram-se no Apêndice C, na Tabela C.11, C13 e C14.

A FIGURA 4.24 apresenta os resultados relativos ao 1º modo circunferencial e 1º modo radial, respectivamente.

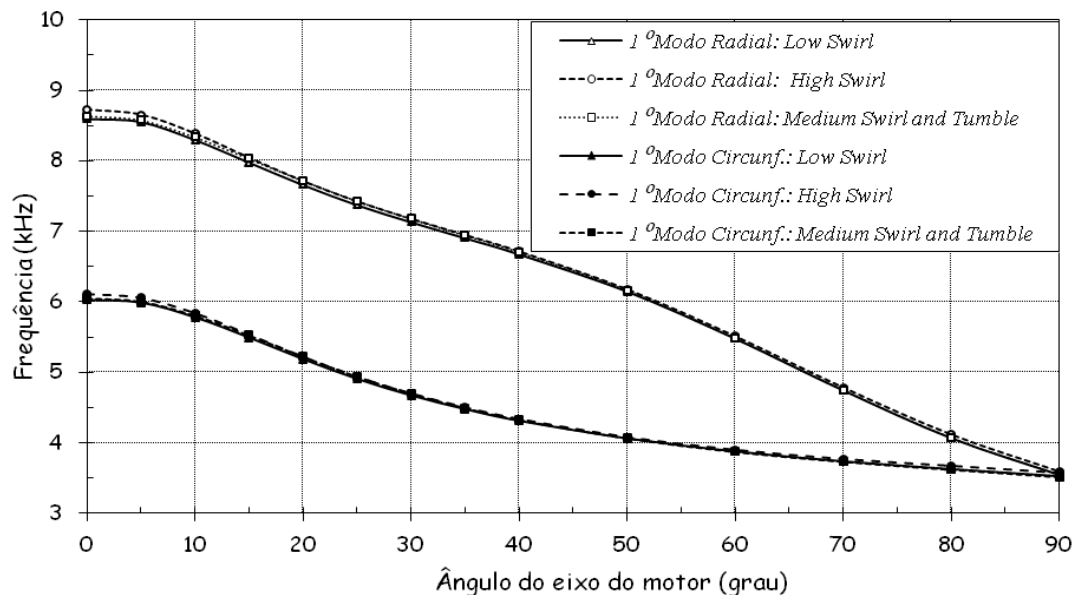


FIGURA 4.24 – Influência do tipo de estrutura de fluxo

Os resultados obtidos tanto para o 1º modo circunferencial quanto para o 1º modo radial são bastante conclusivos: não há diferença significativa entre os valores de frequências obtidos em função do ângulo do eixo do motor. Esta conclusão está diretamente relacionada ao fato de que as temperaturas no interior da câmara de combustão são muito similares para as diversas estruturas de fluxo visto que o parâmetro mais influente permaneceu constante para todas elas ($\lambda=1,3$).

Conforme já anteriormente citado, também estes resultados são importantes visto que os mais diversos tipos de estruturas de fluxo estão dentro do escopo de pesquisas a serem realizadas no referido motor.

4.2.4 Comparativo dos resultados do cálculo analítico e da simulação

Após ter calculado as frequências dos principais modos acústicos presentes na câmara de combustão durante a ocorrência da detonação de forma analítica e utilizando a simulação computacional, partiu-se para um confronto entre tais resultados. O

objetivo principal desta comparação foi o de compreender a influência e a necessidade de se considerar a geometria real da câmara de combustão. Assim, buscou-se verificar a viabilidade técnica da consideração da câmara de combustão como um cilindro de bases paralelas (simplificação adotada na Etapa 1) com o objetivo de se obter uma primeira aproximação dos valores das frequências dos modos acústicos presentes na câmara de combustão. Para tal, considerou-se a configuração de injeção *PFI* utilizando *CNG* para valores de lambda iguais a 1,0, 1,3 e 1,5 (dados experimentais para a simulação e o cálculo obtidos a partir do sensor de pressão). A FIG. 4.25 apresenta tais comparativos para o 1º modo circunferencial.

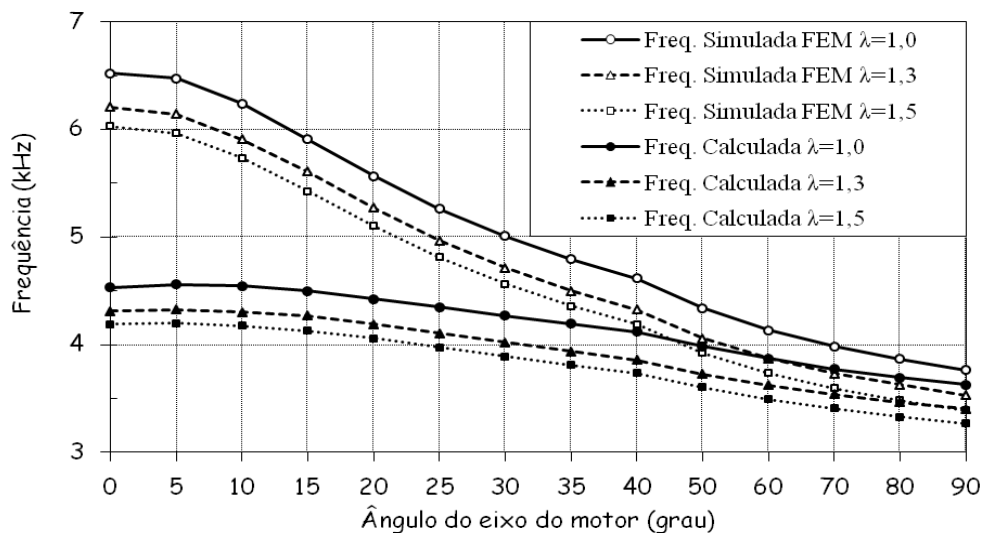


Figura 4.25 – Valores de λ: cálculo x simulação - 1º modo circunferencial

A partir da FIG. 4.25, comparando-se valores iguais de lambda, percebe-se uma significativa divergência entre os resultados para ângulos do eixo do motor próximos do PMS. Esta diferença tende a ser menor à medida que o pistão se desloca em direção ao PMI: diferença de 30,5% para ângulo do eixo do motor igual a 0º e de 3,6% para ângulo do eixo do motor igual a 90º. Isto pode ser explicado pela geometria do pistão. Quando o pistão encontra-se no ponto morto superior, a presença do *bowl* exerce grande influência na geometria formada e invalida a suposição de que a câmara de combustão possa ser considerada como um cilindro de bases paralelas. Já quando o pistão desloca-se para o PMI, a altura do cilindro formado é grande e a presença do *bowl* não afeta de maneira significativa a geometria resultando, deste modo, em valores mais próximos aos da simulação. É de se esperar, embora sem interesse prático do ponto de vista de ocorrência de detonação, que os resultados sejam ainda mais próximos

para ângulos de eixo do motor em torno de 180° (PMI) dada a tendência das duas curvas.

Em resumo, o cálculo analítico subestima as frequências reais dos modos acústicos presentes na câmara de combustão (valores em torno de 1700 Hz). Entretanto, tal cálculo serve como uma primeira idéia dos valores a serem esperados para os referidos modos acústicos.

Similarmente à situação comparativa dos valores de lambda, o mesmo tipo de comportamento pode ser observado para as diversas estruturas de fluxo. A FIG. 4.26 apresenta o comparativo para a configuração *DI* utilizando Etanol e $\lambda=1,3$ para as estruturas de fluxo *low swirl*, *medium swirl and tumble* e *high swirl* (dados experimentais para a simulação e o cálculo obtidos a partir do sensor de pressão).

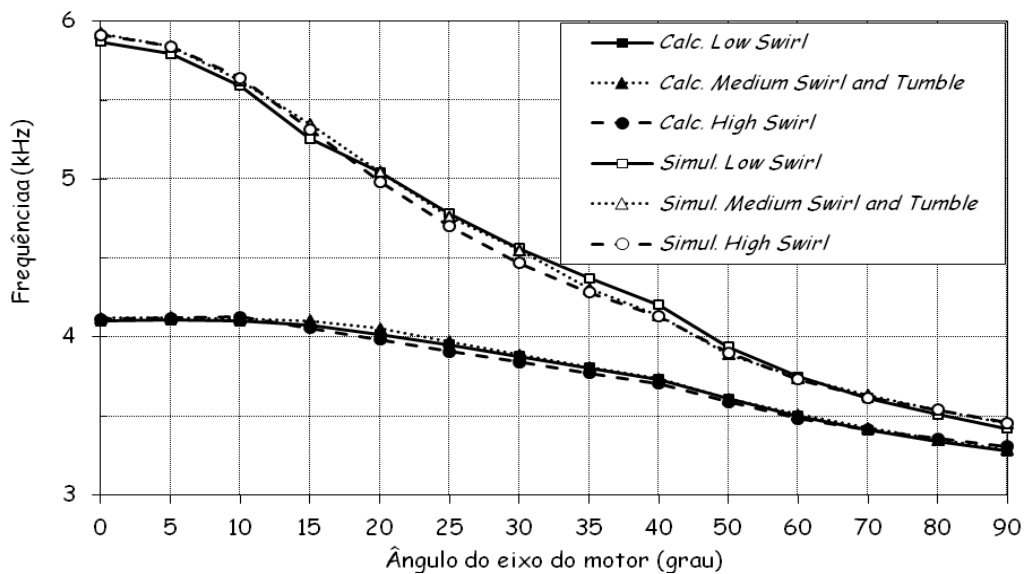


FIGURA 4.26 – Estruturas de fluxo: cálculo x simulação - 1º modo circunferencial

Conforme pode ser visto na FIG. 4.26, para estruturas de fluxo iguais, percebe-se uma grande divergência entre os resultados para ângulos do eixo do motor próximos do PMS. Analogamente ao observado na Figura 4.25, tal diferença tende a ser menor à medida que o pistão se desloca para o PMI: diferença de 30,2 % para o ângulo do eixo do motor igual a 0° e de 4,2% para 90°. Isto pode ser novamente explicado pela presença do *bowl* na geometria do pistão. Em resumo, o cálculo analítico subestima as frequências reais dos modos acústicos presentes na câmara de combustão (valores em torno de 1800 Hz).

Deste modo, a partir das duas análises anteriores, o cálculo analítico embora subestime os valores de frequências pode ser interessante para se obter uma vaga idéia

de ordem de grandeza dos valores de frequência dos modos acústicos. Ele pode ser considerado como um indicador aproximado dos valores de frequência sendo recomendado somente para esta finalidade pois não serve para a determinação exata dos referidos valores.

4.2.5 Comparativo dos resultados da simulação

A partir dos resultados da simulação computacional foi realizado um comparativo, considerando os principais modos acústicos, para os vários tipos de estruturas de fluxo e sistemas de injeção em função do combustível. As FIG. 4.27 e 4.28 apresentam, respectivamente, para o 1º modo circunferencial e o 1º modo radial, os comparativos entre a configuração *PFI CNG* (com valores de λ iguais a 1,0, 1,3 e 1,5) e *DI CNG* para as estruturas de fluxo *low swirl*, *medium swirl and tumble* e *high swirl* e para valores de λ 1,0, 1,3 e 1,5 (mantida a estrutura de fluxo *low swirl*). Os dados utilizados para a simulação computacional foram obtidos por meio da utilização do sensor de pressão. Cabe ressaltar que este comparativo, em linhas gerais, serve também para os resultados obtidos a partir da utilização da vela instrumentada.

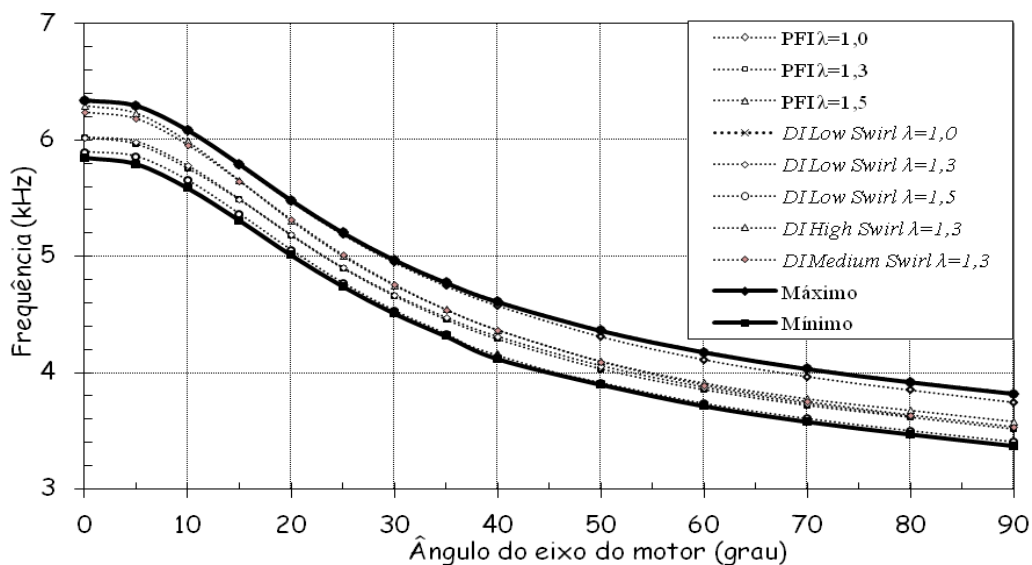


FIGURA 4.27 – Comparativo entre *CNG PFI* e *DI*: 1º modo circunferencial

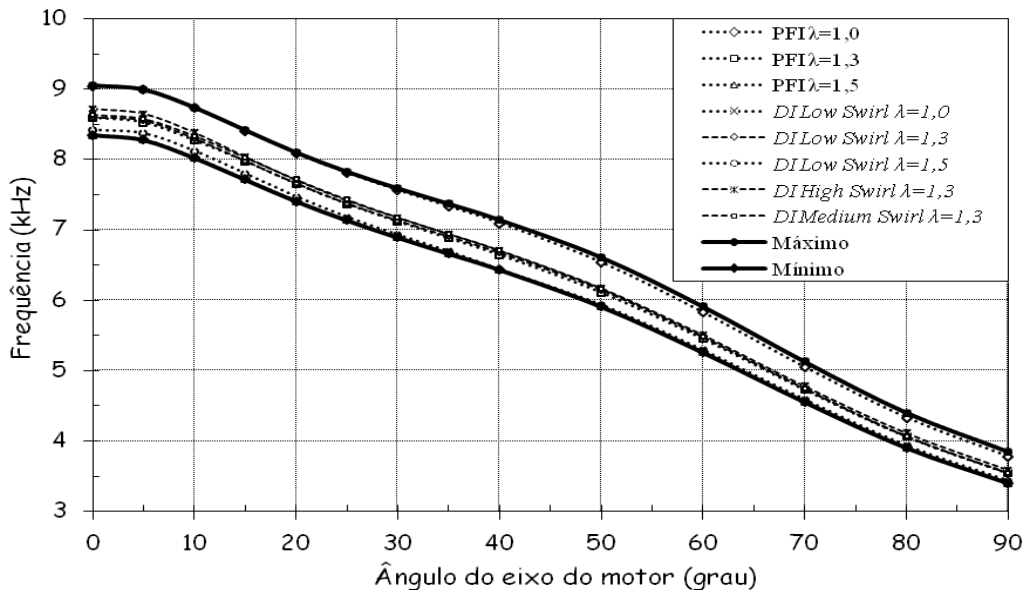


FIGURA 4.28 – Comparativo entre CNG PFI e DI: 1º modo radial

Percebe-se pela análise das FIG. 4.27 e 4.28 que os valores limites de frequência são determinados pelas curvas referentes aos valores extremos de lambda (valor mínimo: $\lambda=1,5$ para a configuração PFI e valor máximo: $\lambda=1,0$ para a configuração DI). A faixa de variação máxima dos valores de frequência estão em torno de 500 Hz para o 1º modo circunferencial e 700 Hz para o 1º modo radial para toda a faixa de variação do ângulo do eixo do motor.

Procedimento análogo foi realizado para o 1º modo circunferencial e o 1º modo radial considerando a configuração DI Etanol para valores de λ iguais a 1,0, 1,3 e 1,5, estruturas de fluxo *low swirl*, *medium swirl and tumble* e *high swirl* e valores de pressão de injeção de 100 e 140 bar. Os dados utilizados para a simulação computacional são oriundos do sensor de pressão. As FIG. 4.29 e 4.30 apresentam tais resultados.

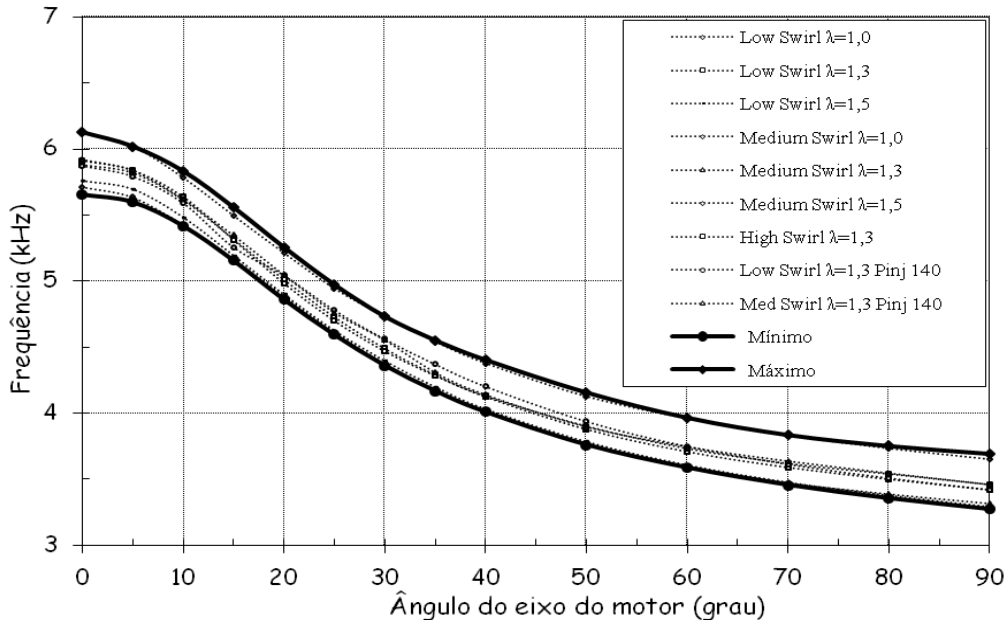


FIGURA 4.29 – Comparativo para *DI* Etanol: 1º modo circunferencial

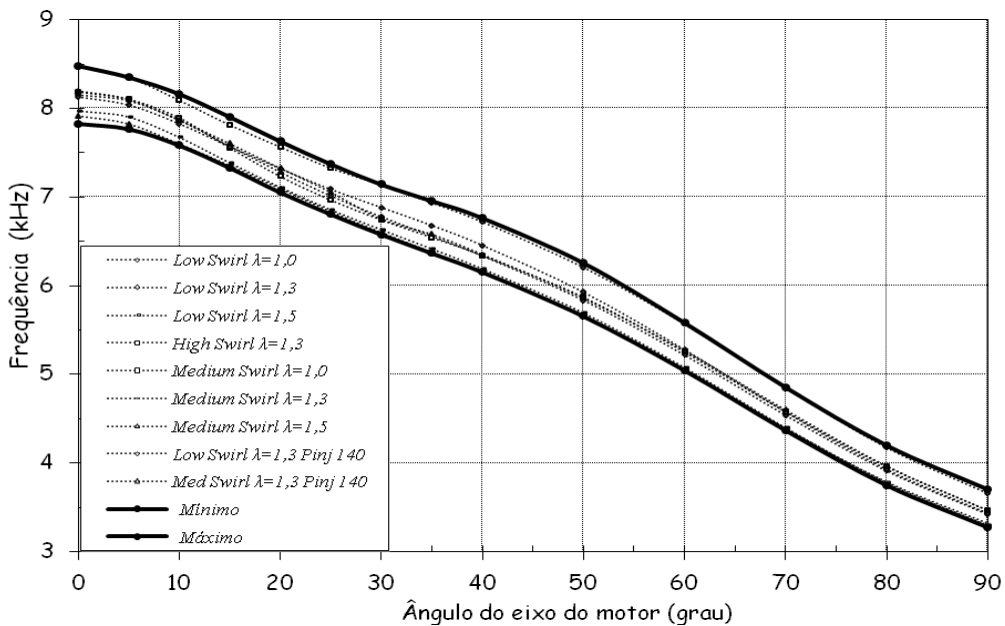


FIGURA 4.30 – Comparativo para *DI* Etanol: 1º modo radial

Percebe-se pelas FIG. 4.29 e 4.30 que o limite superior de frequência foi determinado pela curva referente ao valor estequiométrico de lambda (estrutura de fluxo *medium swirl and tumble*). Já o limite inferior foi ditado pela estrutura de fluxo *low swirl* e valores de lambda variando entre 1,3 e 1,5. A faixa de variação máxima dos valores de frequência estão em torno de 470 Hz para o 1º modo circunferencial e 650 Hz para o 1º modo radial para toda a faixa de variação do ângulo do eixo do motor.

Para se obter a variação total dos valores de frequência, foram comparados os resultados para as diversas configurações avaliadas (*PFI* e *DI*) e os diferentes combustíveis (*CNG* e Etanol). As FIG. 4.31 e 4.32 apresentam tais resultados.

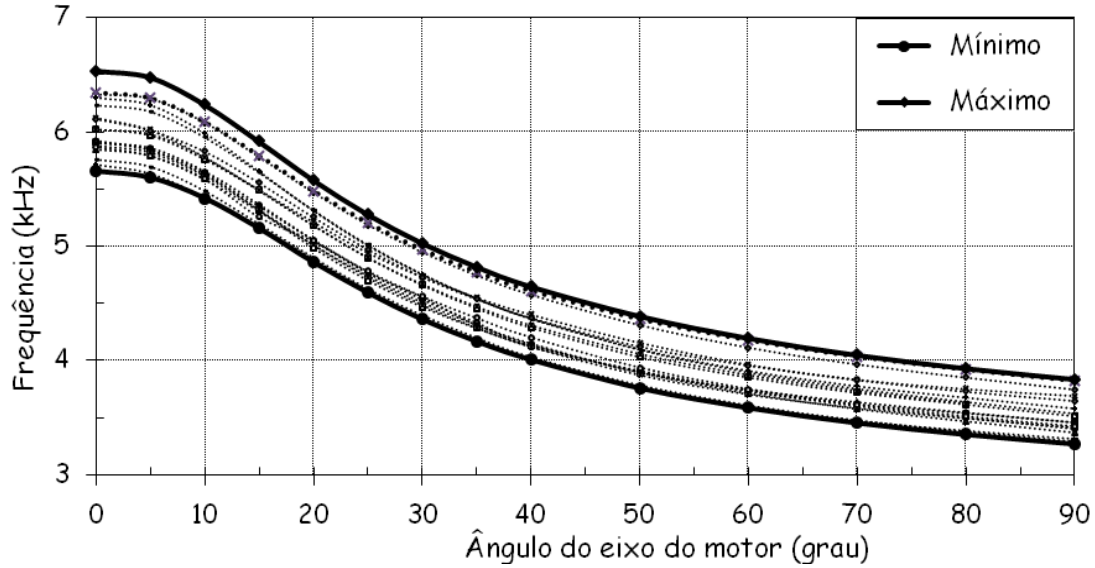


FIGURA 4.31 – Comparativo total: 1º modo circunferencial

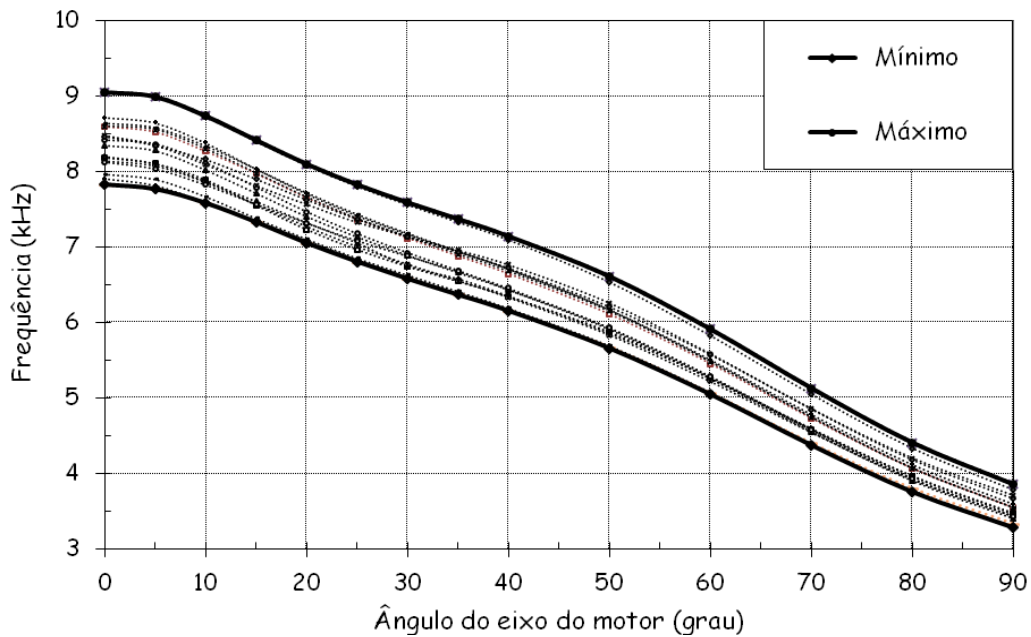


FIGURA 4.32 – Comparativo total: 1º modo radial

Percebe-se pela análise das FIG. 4.30 e 4.31 que tanto o limite superior de frequência quanto o inferior foram determinados pela configuração *DI* etanol. A faixa de variação máxima dos valores de frequência estão próximos a 880 Hz para o 1º modo circunferencial e 1220 Hz para o 1º modo radial para toda a faixa de variação do ângulo

do eixo do motor considerando-se a faixa do ângulo do eixo do motor passível de ocorrência da detonação.

A importância de tais resultados reside no fato de que eles serão muito úteis, futuramente, para se determinar a faixa de frequência a ser considerada no dimensionamento de filtros para aplicação no sistema de detecção da detonação.

4.3 Definição preliminar de parâmetros

A realização de experimentos e a respectiva análise de seus resultados requer atenção especial no que tange ao sistema de aquisição de dados bem como aos parâmetros de funcionamento do motor envolvidos.

Todo e qualquer sistema de análise de combustão está baseado na aquisição de sinais de pressão no interior da câmara de combustão em função do ângulo do eixo do motor já que os parâmetros relacionados à velocidade da queima do combustível bem como às análises termodinâmicas variam muito rapidamente com o posicionamento do eixo do motor. Tal observação é válida também para a análise da detonação visto que as velocidades envolvidas em tal fenômeno são muito mais elevadas do que a combustão considerada normal (proveniente da vela de ignição).

Neste sentido, antes de se proceder às análises dos sinais obtidos experimentalmente, conforme citado no Capítulo 3 (item 3.3.3), foi realizado um estudo preliminar para se determinar a influência da resolução do ângulo do eixo do motor na detecção dos sinais das ondas de pressão no interior da câmara de combustão (item 4.3.3 utilizando o sensor de pressão e item 4.3.4 utilizando a vela instrumentada) e os sinais de vibração no bloco do motor (item 4.3.5 utilizando o acelerômetro) durante a ocorrência de detonação bem como para se definir o valor a ser adotado para tal resolução o qual será detalhado no item 4.3.1.

Outra consideração a ser feita relacionada ao funcionamento do motor é escolha do ciclo representativo do mesmo. Para cada um dos testes experimentais realizados foram considerados 100 ciclos de funcionamento do motor. Como se sabe, o motor de combustão interna de ignição por centelha apresenta uma elevada variabilidade cíclica e dentre estes ciclos verificou-se a ocorrência de ciclos com significativa ocorrência de detonação, ciclos com moderada ocorrência de detonação e ciclos sem a ocorrência da detonação. Como uma análise completa de todos os ciclos seria inviável, realizou-se

um estudo para a definição do ciclo representativo de funcionamento do motor o qual será detalhado no item 4.3.2. Cabe ressaltar que, como o objetivo deste trabalho é a caracterização do fenômeno da detonação por meio da identificação do conteúdo espectral de frequências durante a sua ocorrência, foram enfatizados os ciclos com inequívoca presença da mesma.

Além disto, todos os sinais obtidos experimentalmente a partir dos transdutores – sensor de pressão, vela instrumentada e acelerômetro – foram tratados utilizando filtros de modo a adequar a faixa de frequência de interesse para o estudo da detonação otimizando assim os processos de análise dos mesmos tanto em termos de memória necessária para o armazenamento dos dados como em tempo de processamento. Os detalhes da escolha dos filtros serão reportados no item 4.3.3.

Por último, no item 4.3.4, serão comentados os parâmetros e os métodos de avaliação envolvidos na análise dos sinais oriundos dos testes experimentais para todos os transdutores utilizados.

4.3.1 Definição da resolução do ângulo do eixo do motor

Conforme citado em Bertola *et al* (2006), para uma eficiente detecção do fenômeno da detonação é necessária a maior resolução possível do ângulo do eixo do motor. Os referidos autores comparam diversas resoluções e ressaltam que para um valor acima de $0,1^\circ$ ocorrem diferenças significativas nos picos de pressão detectados.

Brunt (1998), por sua vez, cita em seu estudo que um valor de $0,2^\circ$ para a resolução do eixo do motor é adequada para o algoritmo de detecção de detonação por ele utilizado.

Neste trabalho, o valor máximo para a resolução do ângulo do eixo do motor possível de ser obtida com o encoder disponível é de $0,1^\circ$. No intuito de verificar a influência da resolução do referido ângulo nos testes planejados foi realizado um estudo comparativo entre diversas resoluções. Para tal, foi escolhida a configuração do sistema de injeção *PFI CNG* e os seguintes valores de resolução: $0,1^\circ$, $0,2^\circ$, $0,3^\circ$, $0,5^\circ$ e $0,9^\circ$. A FIG. 4.33 apresenta os resultados considerando os valores acima indicados para o sensor de pressão posicionado no cabeçote do motor.

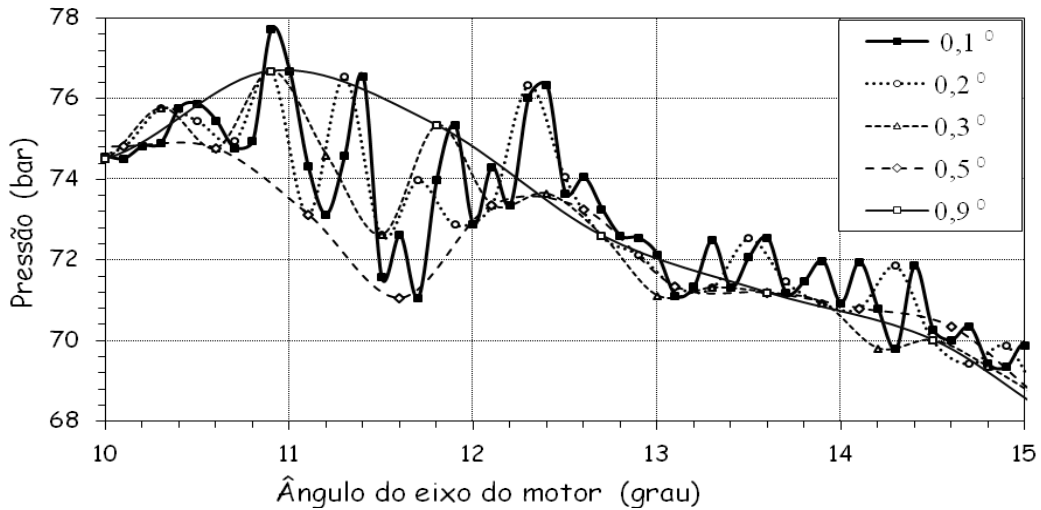


FIGURA 4.33 – Resolução do ângulo do eixo do motor – sensor de pressão

Nota-se uma significativa diferença entre os resultados obtidos para os diversos valores de resolução. À medida que o valor da resolução aumenta (0,5° e 0,9°) percebe-se claramente a incapacidade de se detectar diversos picos de pressão.

As curvas representativas das resoluções de 0,2° e 0,3° apresentam diferenças de até 2,8 bar, para ângulos do eixo do motor em torno de 12°, em relação à curva representativa da resolução de 0,1°. Tal diferença é muito elevada para fins de detecção da detonação sendo tais resoluções descartadas.

Analogamente ao sensor de pressão, realizou-se o mesmo procedimento comparativo acima detalhado para a vela instrumentada posicionada no cabeçote do motor considerando a mesma configuração de sistema de injeção de combustível.

A FIGURA 4.34 apresenta os resultados obtidos.

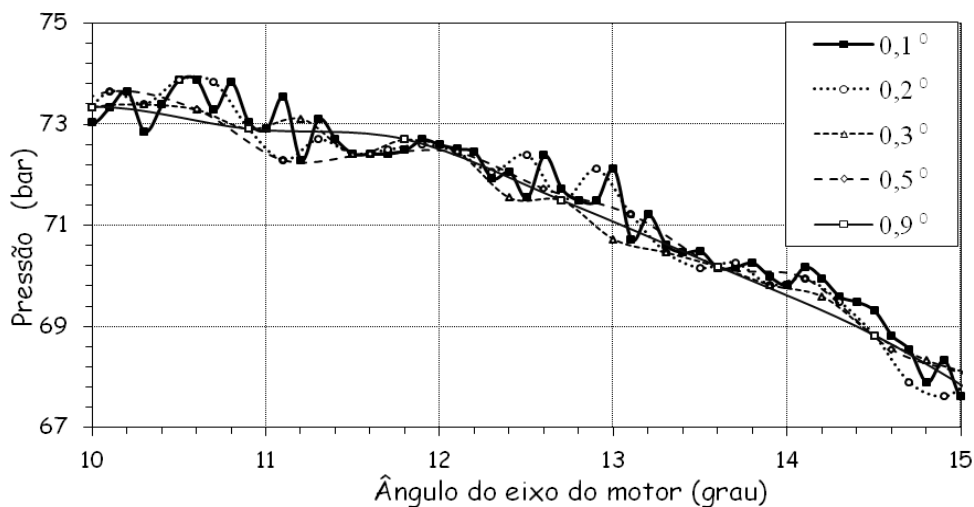


FIGURA 4.34 – Resolução do ângulo do eixo do motor – vela instrumentada

Similarmente aos resultados mostrados para o sensor de pressão, nota-se uma significativa diferença entre os resultados obtidos para os diversos valores de resolução. Aqui também, as resoluções de $0,5^\circ$ e $0,9^\circ$ foram prontamente descartadas.

As curvas representativas das resoluções de $0,2^\circ$ e $0,3^\circ$ apresentam diferenças de até 1,6 bar, para ângulo do eixo do motor próximos de $11,1^\circ$ e $13,0^\circ$, em relação à curva representativa da resolução de $0,1^\circ$. Estes valores, embora menores do que aqueles encontrados para o sensor de pressão são ainda muito elevados para fins de detecção da detonação e, neste sentido, tais resoluções também foram descartadas quando comparadas à resolução de $0,1^\circ$.

Por último, considerando-se os sinais das ondas de vibração oriundas do acelerômetro posicionado no bloco do motor, foi realizada a mesma comparação anteriormente citada para o sensor de pressão e para a vela instrumentada. A FIG. 4.35 apresenta os resultados obtidos.

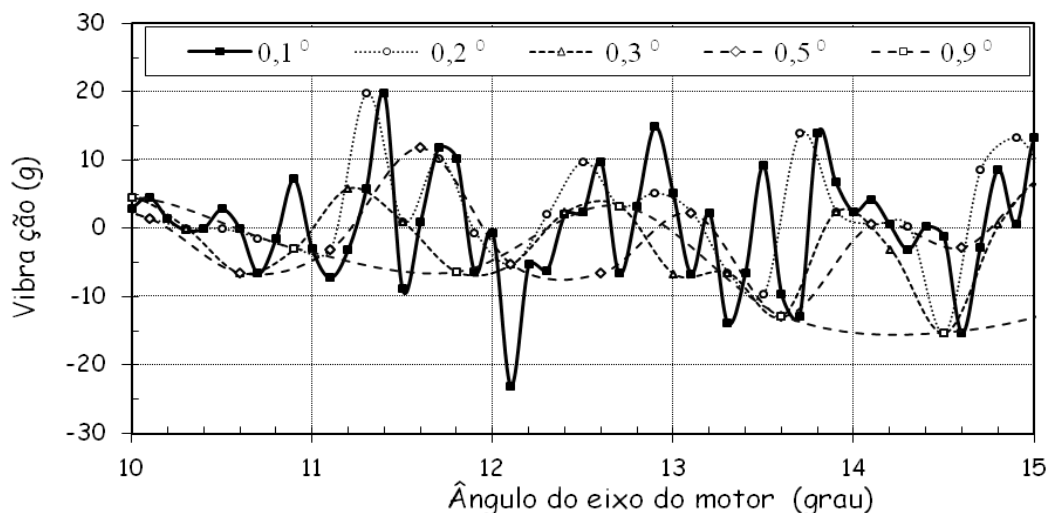


FIGURA 4.35 – Resolução do ângulo do eixo do motor – acelerômetro

Similarmente aos resultados obtidos para a vela e para o sensor de pressão as diferenças nos resultados entre as diversas resoluções foram significativas.

A curva representativa da resolução de $0,2^\circ$ apresenta uma diferença de até 15 g, para o ângulo de eixo do motor próximo a $12,1^\circ$ enquanto as outras mostraram-se inadequadas para a detecção da detonação.

A partir dos resultados obtidos para os três tipos de sensores torna-se evidente a necessidade de se utilizar o valor de $0,1^\circ$ para a resolução do ângulo do eixo do motor de modo a permitir uma análise satisfatória do fenômeno da detonação. Sendo assim tal resolução foi adotada para todos os experimentos realizados neste trabalho.

Ressalta-se que a adoção deste valor de resolução do ângulo do eixo do motor implica em um maior gasto de memória dos dados experimentais a serem obtidos comparado às outras resoluções. Entretanto, para os objetivos deste trabalho, priorizou-se a eficácia na detecção do fenômeno da detonação.

Os resultados obtidos para os diferentes tipos de sensores confirmam as considerações citadas por Bertola *et al* (2006).

4.3.2 Definição do ciclo representativo de funcionamento do motor

Analogamente ao estudo para a definição da resolução do ângulo do eixo do motor utilizou-se a configuração do sistema de injeção *PFI CNG* no estudo para a definição do ciclo representativo de funcionamento do motor envolvendo todos os transdutores, a saber: sensor de pressão, vela instrumentada e acelerômetro.

4.3.2.1 Provas utilizando o sensor de pressão

Comparou-se cinco ciclos de funcionamento do motor os quais foram selecionados devido à presença inequívoca de detonação (de um total de 100 ciclos) no intuito de se verificar as diferenças dos seus conteúdos espectrais e definir o ciclo representativo de funcionamento do motor. A FIG. 4.36 apresenta para a configuração *PFI CNG* e $\lambda=1,0$ o perfil das curvas de pressão no interior da câmara de combustão provenientes do sensor de pressão para tais ciclos selecionados: 46, 49, 61, 62 e 98.

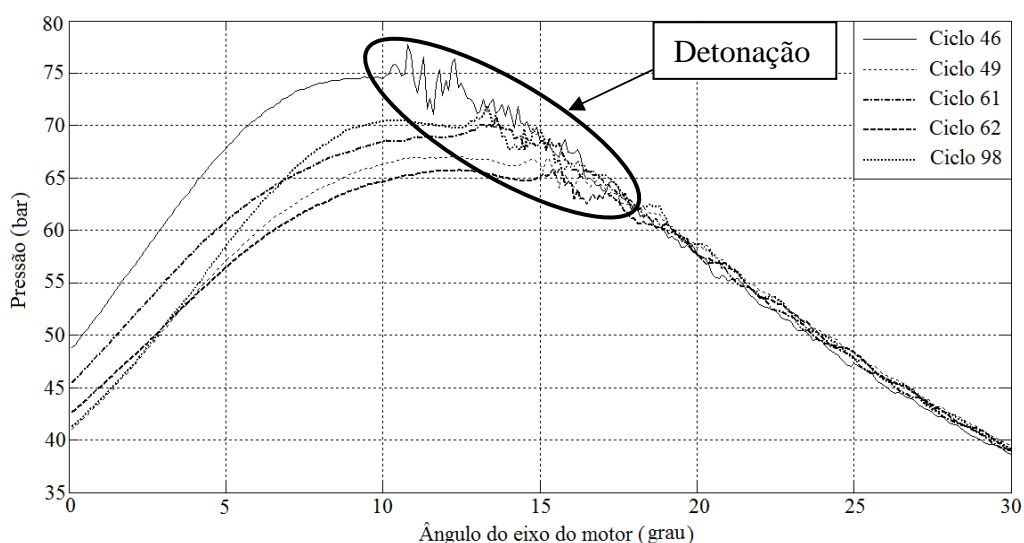


FIGURA 4.36 – Ciclos 46, 49, 61, 62 e 98 – sensor de pressão

Da análise da FIG. 4.36 verifica-se o fenômeno da variabilidade cíclica do motor. A diferença nos picos de pressão atinge até 10 bar para os ciclos analisados e o instante inicial da ocorrência da detonação bem como a sua duração diferem entre eles.

A FIGURA 4.37 apresenta os espectrogramas para os respectivos ciclos.

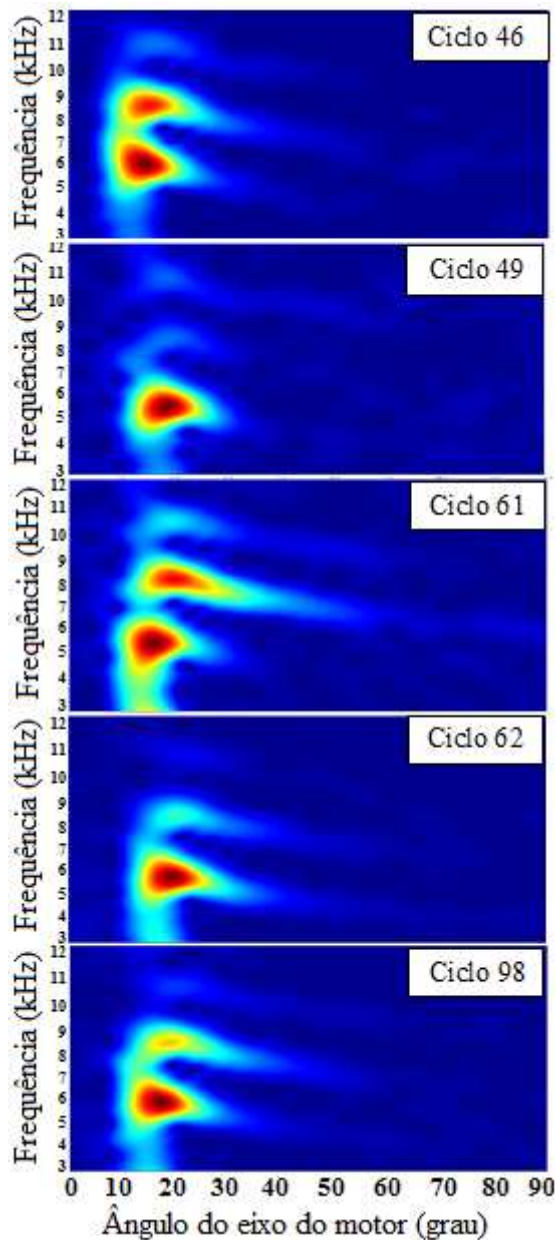


Figura 4.37 – Sensor de pressão: ciclos 46, 49, 61, 62 e 98

Da análise da FIG. 4.37, verifica-se que o conteúdo espectral é bastante similar embora se possa perceber diferenças de amplitudes. Alguns modos acústicos são detectados de maneira diversa para os diversos ciclos. O ciclo 46 é o ciclo no qual maior número de modos acústicos é detectado e com maior intensidade. Tal fato está

associado a sua maior severidade na ocorrência da detonação. Considerando-se estas pequenas diferenças encontradas e no intuito de se criar uma base representativa de comparação, o ciclo 46 apresenta-se como o mais representativo desta configuração para as análises comparativas com os outros tipos de transdutores e, também, com os resultados obtidos a partir da simulação computacional utilizando *FEM*.

4.3.2.2 Provas utilizando a vela instrumentada

Analogamente ao estudo para a definição do ciclo representativo de funcionamento do motor, realizado para os resultados provenientes do sensor de pressão, utilizou-se a configuração de sistema de combustível *PFI CNG* para o estudo envolvendo os sinais oriundos da vela instrumentada. Também a partir de um total de 100 ciclos foram identificados cinco ciclos em função da presença inequívoca de detonação no intuito de se verificar as diferenças dos seus conteúdos espectrais. A FIG. 4.38 apresenta o perfil das curvas de pressão no interior da câmara de combustão provenientes da vela instrumentada para os ciclos 46, 49, 61, 62 e 98.

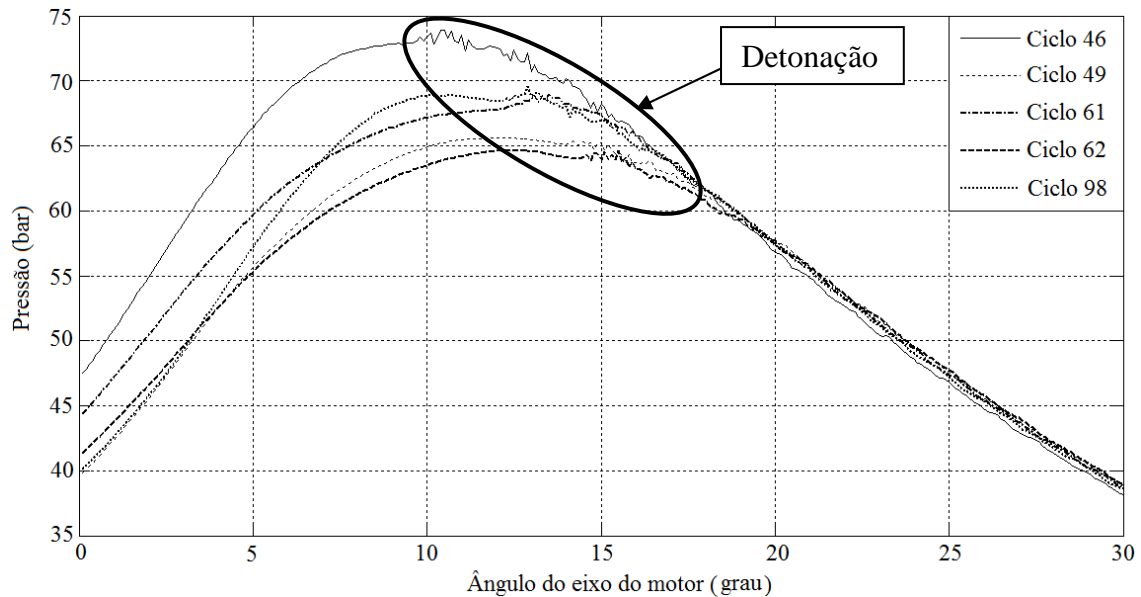


FIGURA 4.38 – Ciclos 46, 49, 61, 62 e 98 – vela instrumentada

Da análise da FIG. 4.38 verifica-se o fenômeno da variabilidade cíclica do motor. A diferença dos valores de pico da pressão atinge o valor de 10 bar para os ciclos analisados. Além disto, o instante inicial da ocorrência da detonação bem como a sua duração são diferentes para cada um deles.

A FIGURA 4.39 apresenta, por meio dos espectrogramas, os resultados da análise do conteúdo espectral de cada um dos respectivos ciclos em função do ângulo do eixo do motor.

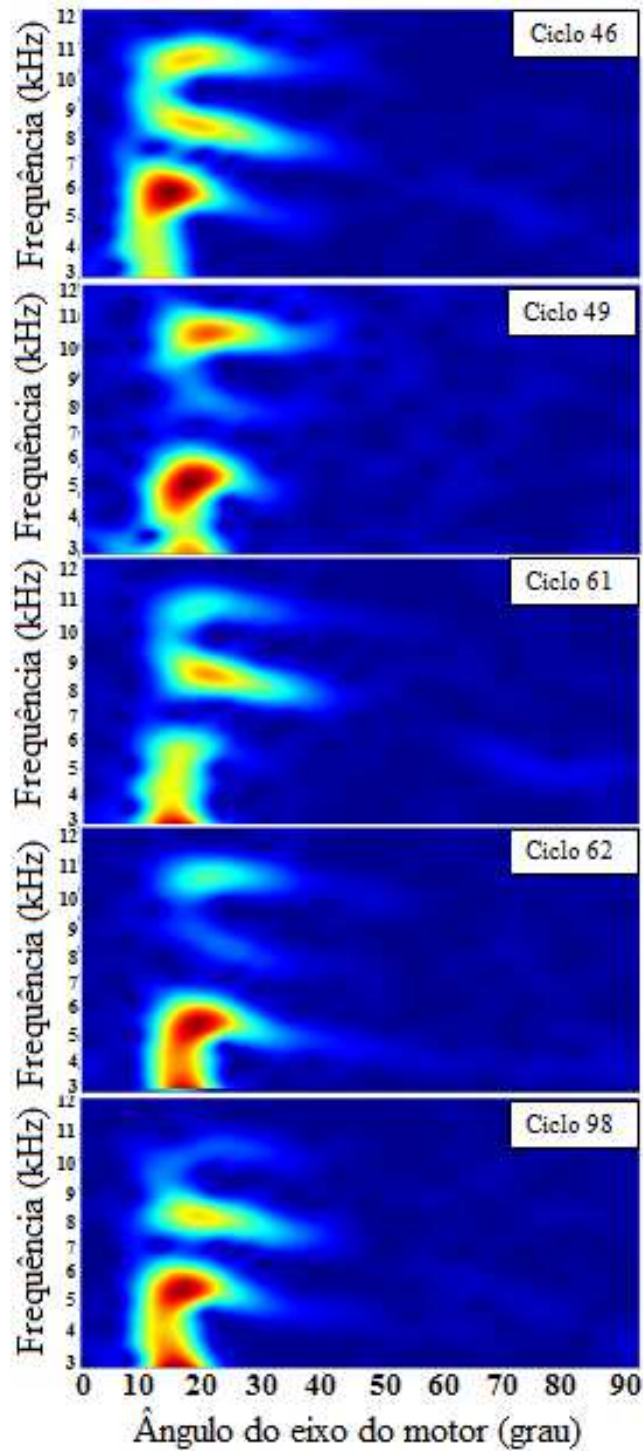


Figura 4.39 – Vela instrumentada: ciclos 46, 49, 61, 62 e 98

Da análise da FIG. 4.39, verifica-se que o conteúdo espectral é bastante similar

embora se possa perceber diferenças de amplitudes. Alguns modos acústicos são detectados de maneira diversa para os diferentes ciclos. O ciclo 46 é o ciclo no qual o maior número de modos acústicos é detectado e com maior intensidade. Tal fato está associado a sua maior severidade na ocorrência da detonação. Considerando-se estas pequenas diferenças encontradas e no intuito de se criar uma base representativa de comparação, o ciclo 46 apresenta-se como o mais representativo desta configuração para as análises comparativas com os outros tipos de sensores e, também, com os resultados obtidos a partir da simulação computacional utilizando *FEM*.

4.3.2.3 Provas utilizando o acelerômetro

Analogamente ao estudo para a definição do ciclo representativo de funcionamento do motor, realizado para os resultados provenientes do sensor de pressão e vela instrumentada, utilizou-se a configuração de sistema de combustível *PFI CNG* para o estudo envolvendo os sinais oriundos do acelerômetro. Também a partir de um total de 100 ciclos foram identificados cinco ciclos em função da presença inequívoca de detonação no intuito de se verificar as diferenças dos seus conteúdos espectrais. A FIG. 4.40 apresenta o perfil das curvas de vibração no bloco do motor provenientes da o acelerômetro para os ciclos 46, 49, 61, 62 e 98.

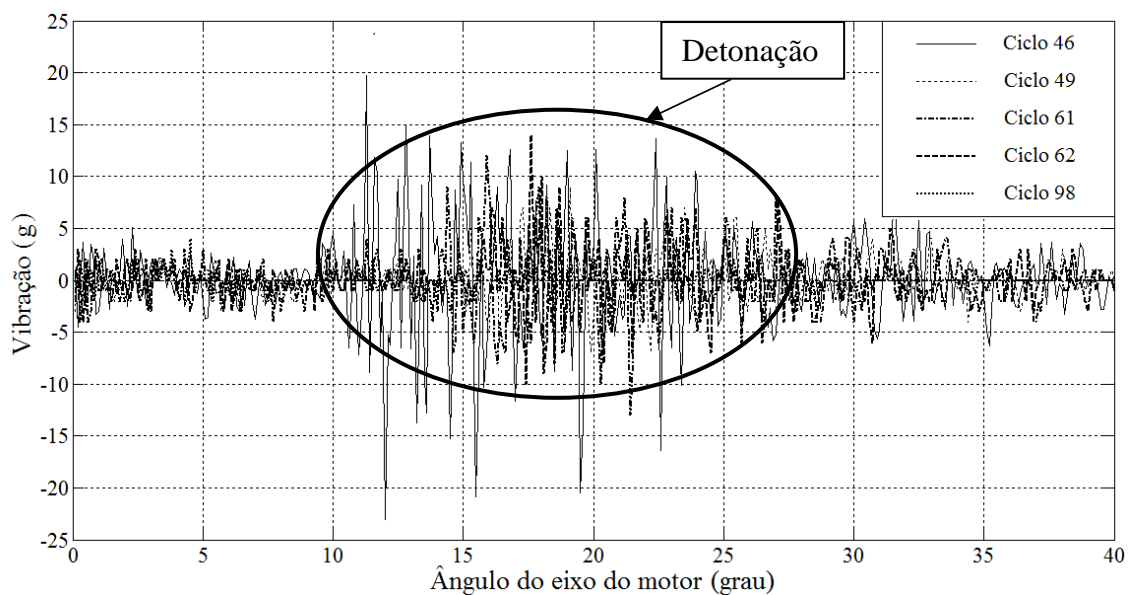


FIGURA 4.40 – Ciclos 46, 49, 61, 62 e 98 – acelerômetro

Da análise da FIG. 4.40 verifica-se o reflexo do fenômeno da variabilidade cíclica do motor transferida para o bloco do motor. A diferença dos valores de pico da vibração atinge o valor de 20 g para os ciclos analisados. Além disto, o instante inicial da ocorrência da detonação bem como a sua duração são diferentes para cada um deles.

A FIGURA 4.41 apresenta os resultados da análise do conteúdo espectral de cada um dos respectivos ciclos por meio dos espectrogramas.

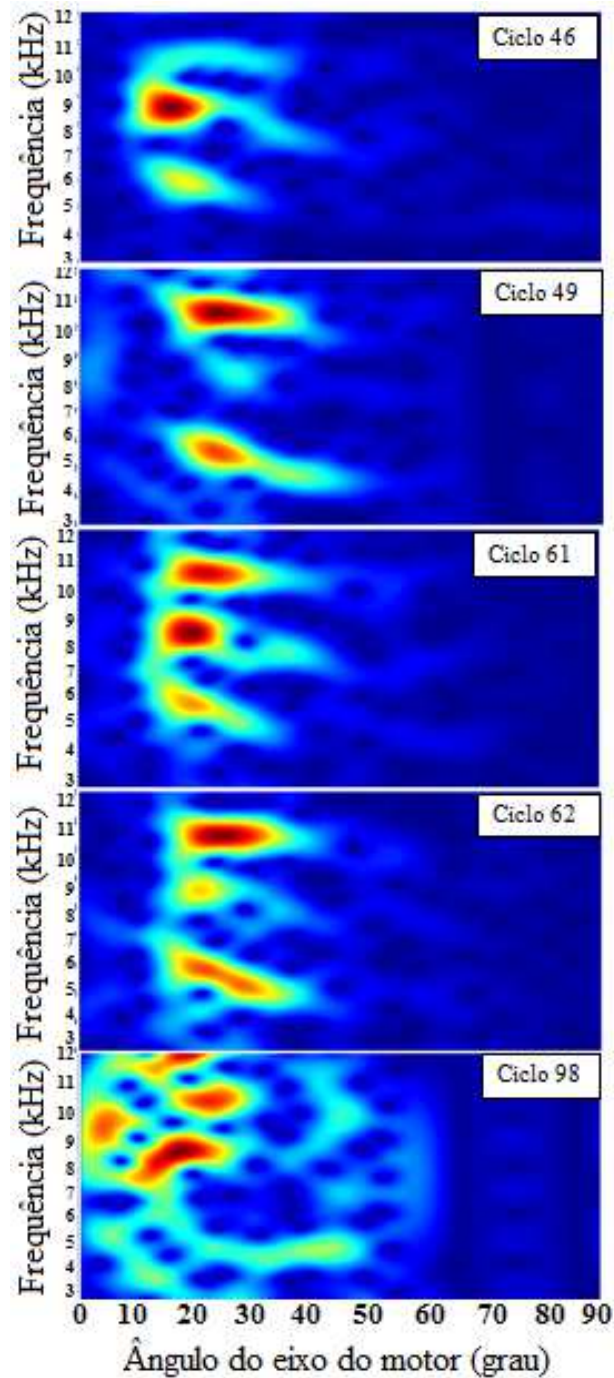


Figura 4.41 – Acelerômetro: ciclos 46, 49, 61, 62 e 98

Por meio da FIG. 4.41 verificam-se diferenças no conteúdo espectral dos diversos ciclos. O ciclo 98 nitidamente sofre influência de outras ressonâncias provavelmente relacionadas ao funcionamento do motor e não é adequado como ciclo representativo de funcionamento do motor. Os ciclos 46, 61 e 62 apresentam características semelhantes podendo ser escolhidos como o ciclo representativo, para esta configuração, utilizando o acelerômetro como sensor.

Considerando-se as diferenças encontradas e no intuito de se criar uma base representativa de comparação, o ciclo 46 apresenta-se como o mais representativo para esta configuração para as análises comparativas entre os sensores e, também, com os resultados obtidos a partir da simulação computacional utilizando *FEM*.

O mesmo procedimento de análise e escolha do ciclo representativo foi realizado para as outras configurações avaliadas.

4.3.3 Definição dos parâmetros dos filtros

A literatura consultada apresenta diferentes valores para a faixa de frequências de interesse para os estudos sobre detonação. Tais diferenças se devem a diversos fatores, tais como, o objetivo da pesquisa, a utilização de uma margem de segurança nos limites adotados para garantir sinais adequados para análise e as características dos motores utilizados (por exemplo, diâmetro do cilindro e posição da vela de ignição). A TAB. 4.5 apresenta os valores limites para os filtros disponíveis na literatura consultada.

TABELA 4.5
Características dos filtros

<i>Referência</i>	<i>Faixa de Frequência (kHz)</i>	<i>Tipo de Filtro</i>	<i>Ordem</i>
Borg et al (2006)	5 - 30	---	---
Brunt et al (1998)	5 - 20	---	---
Eng (2002)	4 - 25	---	---
Millo e Ferraro (1998)	3 - 20 (pressão) 3 - 30 (vibração)	---	---
Naber et al (2006)	5 - 27	Chebyshev	8 ^a
Scholl at al (1998)	5 - 25 (motor 3.0 L) 6 - 25 (motor 2.0 L)	Chebyshev	3 ^a
Xiaofeng et al (1993)	6 - 25	---	---
Witze e Green (1993)	0,15 - 28	---	---

Conforme citado em Borg *et al* (2006), a frequência de corte do filtro passa baixa é normalmente escolhida para prevenir *anti-aliasing* (deste modo sendo dependente da frequência de amostragem e da frequência natural do transdutor utilizado) enquanto a frequência de corte do filtro passa alta deve ser elevada o suficiente para remover todos os componentes de baixa frequência da pressão sem atenuação de componentes da frequência fundamental.

Além disto, um dos objetivos deste trabalho foi o de comparar os resultados experimentais com os resultados simulados utilizando *FEM* em função do ângulo do eixo do motor. Para tal foi necessário identificar os valores das frequências de ressonância da câmara de combustão obtidos com o pistão posicionado desde o ponto morto superior até próximo ao ponto morto inferior (valores de frequências considerados baixos em função do volume elevado da câmara).

Do exposto acima, da análise dos dados da literatura consultada e, também, em função dos objetivos deste trabalho bem como das características do motor utilizado, todas as análises envolvendo os experimentos foram realizadas tomando-se os sinais filtrados no range de frequência de 2 a 25 kHz. Para a definição do tipo de filtro avaliou-se diversos tipos de filtros digitais que foram determinados por meio do software MatLab. As características técnicas do filtro escolhido devido aos seus melhores resultados podem ser visualizadas na TAB. 4.6.

TABELA 4.6
Características dos filtros Butterworth

<i>Item</i>	<i>Característica Técnica</i>
<i>Tipo de filtro</i>	Butterworth
<i>Passa alta (frequência inferior)</i>	2 kHz
<i>Passa baixa (frequência superior)</i>	25 kHz
<i>Ordem</i>	8

Os valores dos coeficientes dos filtros são os seguintes:

- Filtro passa alta

$$B = [0,74, -5,94, 20,78, -41,56, 51,95, -41,56, 20,78, -5,94, 0,74]$$

$$A = [1,00, -7,40, 24,01, -44,51, 51,63, -38,35, 17,82, -4,74, 0,55]$$

- Filtro passa baixa

$$A = [1,000, -0,59, 1,20, -0,46, 0,36, -0,08, 0,03, -0,003, 0,0002]$$

$$B = [0,006, 0,046, 0,16, 0,32, 0,40, 0,32, 0,16, 0,046, 0,0057]$$

A equação dos filtros pode ser visualizada pela EQ. (4.1):

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(8)z^{-7} + b(9)z^{-8}}{1 + a(2)z^{-1} + \dots + a(8)z^{-7} + a(9)z^{-8}} \quad (4.1)$$

As curvas para as respostas dos filtros anteriores podem ser visualizadas na FIG. 4.42.

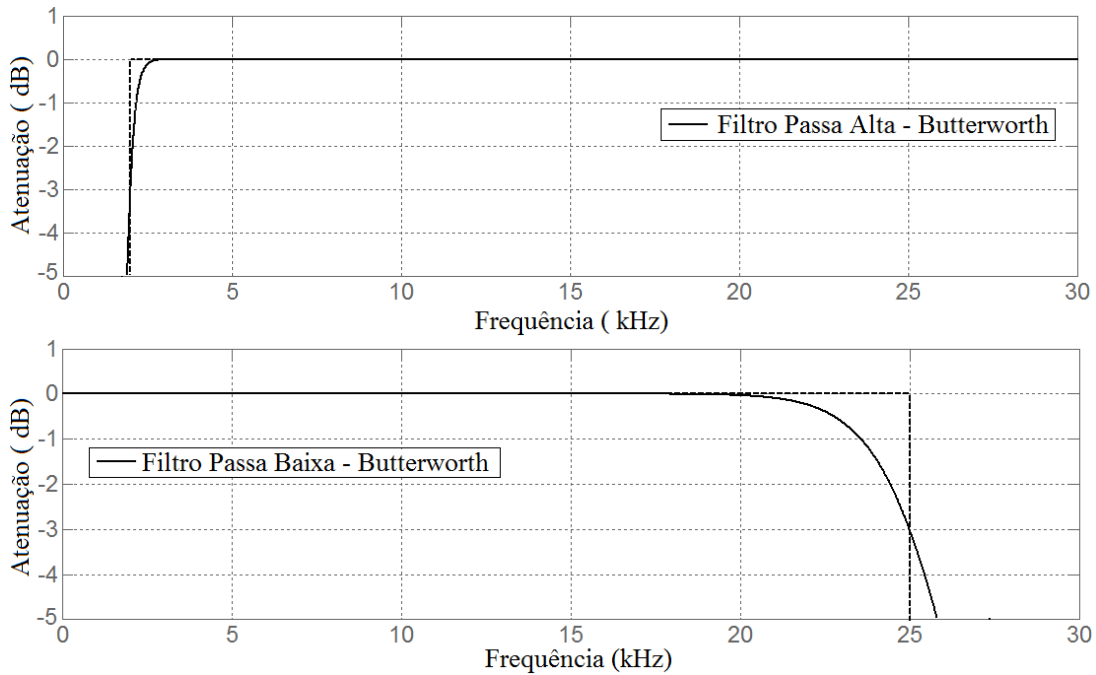


FIGURA 4.42 – Curva resposta dos filtros passa alta e passa baixa

A escolha entre a utilização de dois filtros (um passa baixa e um passa alta) ao invés de um único filtro passa banda não obedeceu a nenhum critério técnico específico. Foi determinada apenas pelo desejo de se compreender passo a passo a alteração da curva de pressão com a aplicação individual dos referidos filtros.

4.3.4 Definição dos parâmetros e métodos de avaliação

Para a avaliação dos resultados obtidos experimentalmente, independentemente do tipo de transdutor considerado, foi utilizada a seguinte sequência de análise:

- primeiramente foi realizada uma análise de *FFT* para se determinar a faixa de frequência de interesse relacionada à ocorrência da detonação. Foi adotado um filtro passa alta com frequência de corte de valor reduzido suficiente para se eliminar/reduzir a componente de baixa frequência e evidenciar a amplitude dos modos acústicos na

faixa de frequência de interesse. Tal determinação foi realizada comparando-se com os resultados obtidos da simulação computacional para cada configuração avaliada;

- em seguida, foi realizada uma análise detalhada na faixa de frequência de interesse selecionada acima de modo a facilitar a identificação da presença de modos acústicos;

- por último, foi realizada uma *STFT* (*Short-Time Frequency Transform*) o qual é uma técnica para examinar o conteúdo de frequências dos sinais de interesse em função do tempo (em função do ângulo do eixo do motor). Consiste em se dividir o sinal original, no domínio do tempo, em segmentos menores por meio da utilização de uma janela que se desloca progressivamente sendo calculada, para cada uma delas, a densidade de energia espectral. A apresentação dos resultados, neste caso, é realizada por meio do espectrograma o qual se resume em gráficos cujos eixos são o ângulo do eixo do motor, a frequência e a intensidade do sinal.

Nos experimentos realizados, utilizou-se uma janela de *Hanning* de 192 pontos com um *overlapping* de 190 pontos. Além disto, cada seção resultante do deslocamento da janela foi preenchida com zeros totalizando amostras de 1024 pontos nas quais foi realizada uma *FFT*. Os resultados são mostrados pelo mapeamento do módulo de cada valor de *FFT* em uma escala colorida (cor vermelha: a mais alta energia). Os programas computacionais desenvolvidos para tais análises utilizaram o software MatLab v7.6.

4.4 Determinação experimental utilizando sensor de pressão (Etapa 3)

Conforme já citado anteriormente no Capítulo 4, o mesmo tipo de procedimento de análise utilizado para os experimentos envolvendo este sensor foi também adotado para todos os outros experimentos realizados com os demais sensores conforme será explicado nos itens 4.5 e 4.6.

A título de esclarecimento, neste trabalho, a referência de 0° do eixo do motor indica a posição do pistão no ponto morto superior na fase de compressão.

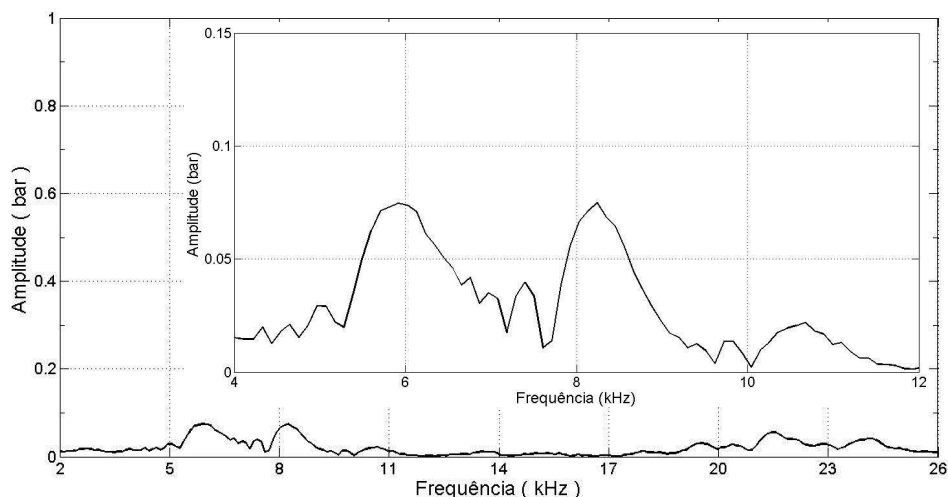
4.4.1 Configuração de injeção PFI utilizando CNG

Nesta configuração, foi realizada somente a análise da influência dos valores de λ visto que não se realizou experimentos com diferentes estruturas de fluxo.

4.4.1.1 Influência dos valores de lambda

Deve ser ressaltado que as frequências presentes no sinal de pressão detectado pelo sensor de pressão no interior da câmara de combustão estão contidas numa larga faixa de valores. Desta forma, deve-se identificar o conteúdo de frequências por meio da análise utilizando a Transformada Rápida de Fourier (*FFT*) de modo a conhecer quais delas estão relacionadas ao fenômeno da detonação. Conforme citado em Puzinauskas (1992), as frequências mais baixas são dominantes em termos de conteúdo energético, entretanto, não estão diretamente relacionadas à detonação. Assim, antes de se proceder às análises, foi realizada uma *FFT* de modo a identificar o espectro de frequências presente no interior da câmara de combustão (considerando-se a aplicação dos filtros citados na Tabela 4.6) e detectado pelo sensor de pressão. Para esta análise foram utilizados respectivamente os seguintes experimentos: $\lambda = 1,0$ (prova 2), $\lambda = 1,3$ (prova 4) e $\lambda = 1,5$ (prova 6) conforme pode ser visto na TAB. 3.2.

A FIGURA 4.43 apresenta os resultados para $\lambda = 1,0$ e inclui também a faixa de frequências diretamente relacionada à ocorrência do fenômeno da detonação situada aproximadamente entre 4 e 12 kHz. Tal faixa de frequências foi determinada comparando-a à faixa de frequências obtida a partir da simulação computacional utilizando o Método de Elementos Finitos dos nove primeiros modos acústicos conforme mostrado na FIG. 4.13.

FIGURA 4.43 – Análise *FFT*: $\lambda = 1,0$ – *PFI CNG* – sensor

Pode-se visualizar que em torno de 6 kHz e 8 kHz ocorrem as maiores amplitudes e, conseqüentemente, o maior conteúdo energético. Entretanto, tal análise não é capaz de identificar a dependência das frequências com o ângulo do eixo do motor. Por isto, é necessário analisar o sinal de pressão utilizando a *STFT* (*Short-Time Fourier Transform*). A FIG. 4.44 apresenta os seus resultados por meio do espectrograma considerando o intervalo de 0° a 90° do ângulo do eixo do motor de modo a abranger toda a faixa de interesse para o estudo da detonação bem como para permitir analisar o seu comportamento ao longo do ângulo do eixo do motor.

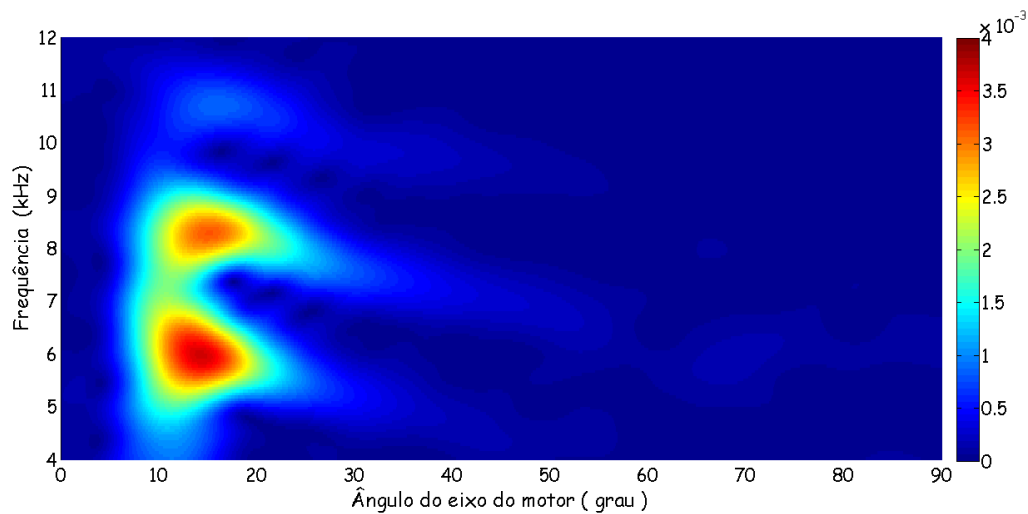


FIGURA 4.44 – Espectrograma: $\lambda = 1,0$ – PFI CNG – sensor

Da análise da FIG. 4.44, observa-se os diversos modos acústicos detectados pelo sensor de pressão identificados pelas regiões alongadas e mais claras. A legenda indica a escala de intensidade em função das diferentes cores. Verifica-se o comportamento decrescente dos valores de frequência em função do ângulo do eixo do motor. Este comportamento experimental foi também verificado nos resultados obtidos pela simulação com o Método de Elementos Finitos (conforme comentado no item 4.2.1.2) e a principal explicação para tal está relacionada à redução dos valores de temperatura no interior da câmara de combustão à medida que o pistão se desloca em direção ao ponto morto inferior os quais afetam diretamente os valores da velocidade do som e, conseqüentemente, reduzem os valores das frequências.

A faixa de frequências em torno de 6 kHz refere-se ao 1° modo circunferencial e aquela em torno de 8 kHz refere-se ao 2° modo circunferencial e uma pequena contribuição do 1° modo radial. O maior conteúdo energético está contido no 1° modo

circunferencial o que está de acordo com Eng (2002). A detecção dos referidos modos acústicos está diretamente relacionada ao posicionamento do sensor de pressão no interior da câmara de combustão: deslocado do seu ponto central. A ocorrência da detonação em níveis significativos está compreendida entre 8 e 25° do eixo do motor embora seja ainda detectada, em menores níveis, até próximo de 50°.

Analogamente à condição para lambda igual a 1,0, foi realizada uma *FFT* para a condição referente a lambda igual a 1,3. A FIG. 4.45 apresenta os resultados obtidos.

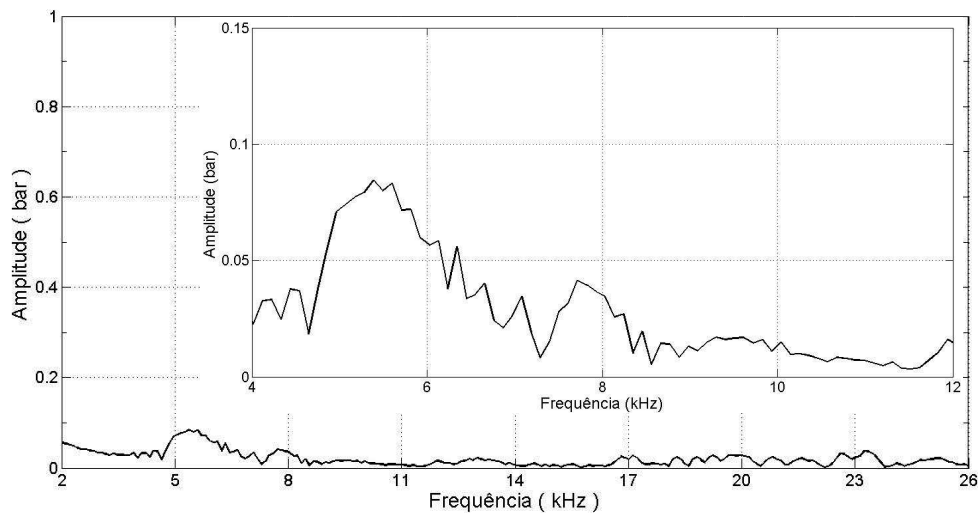


FIGURA 4.45 – Análise *FFT*: $\lambda = 1,3$ – *PFI CNG* - sensor

Verifica-se que as maiores amplitudes ocorrem que em torno de 5,5 kHz para o 1° modo circunferencial e ligeiramente abaixo de 8 kHz para o 2° modo circunferencial e alguma contribuição do 1° modo radial. A detecção destes modos acústicos está diretamente relacionada ao posicionamento do sensor de pressão no interior da câmara de combustão: deslocado do seu ponto central. A FIG. 4.46 apresenta o espectrograma considerando o intervalo de 0° a 90° do ângulo do eixo do motor para esta configuração.

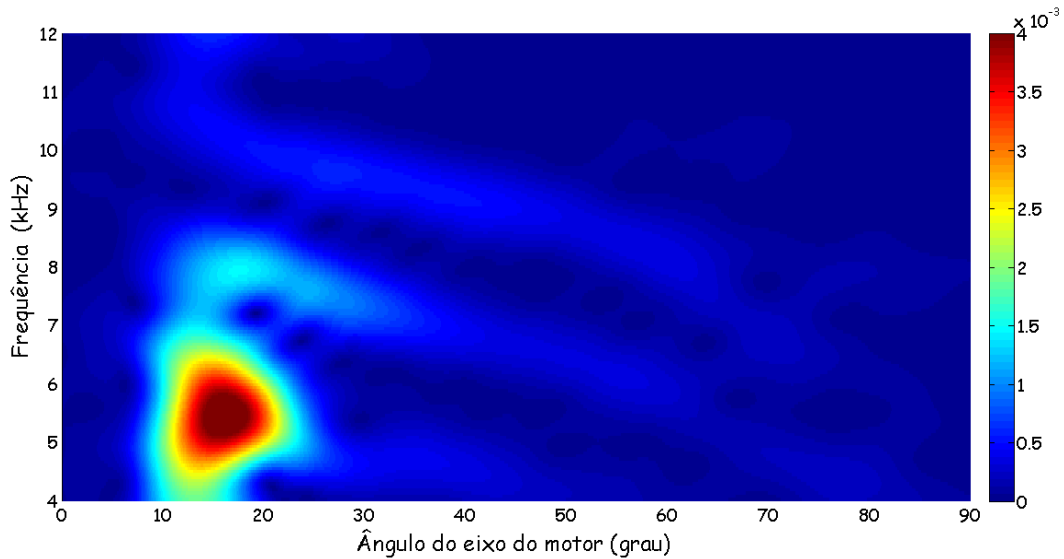


FIGURA 4.46 – Espectrograma: $\lambda = 1,3$ – PFI CNG - sensor

Da análise da FIG. 4.46, verifica-se os diversos modos acústicos detectados pelo sensor de pressão identificados pelas regiões alongadas e mais claras. Observa-se o comportamento decrescente dos valores de frequência em função do ângulo do eixo do motor. A ocorrência da detonação em níveis significativos está compreendida entre 10 e 25° embora seja ainda detectada, em menores níveis, até próximo de 50°.

O mesmo procedimento utilizado para os valores de lambda igual a 1,0 e 1,3 foi adotado também para o valor de lambda igual a 1,5. A FIG. 4.47 apresenta o resultado da *FFT*.

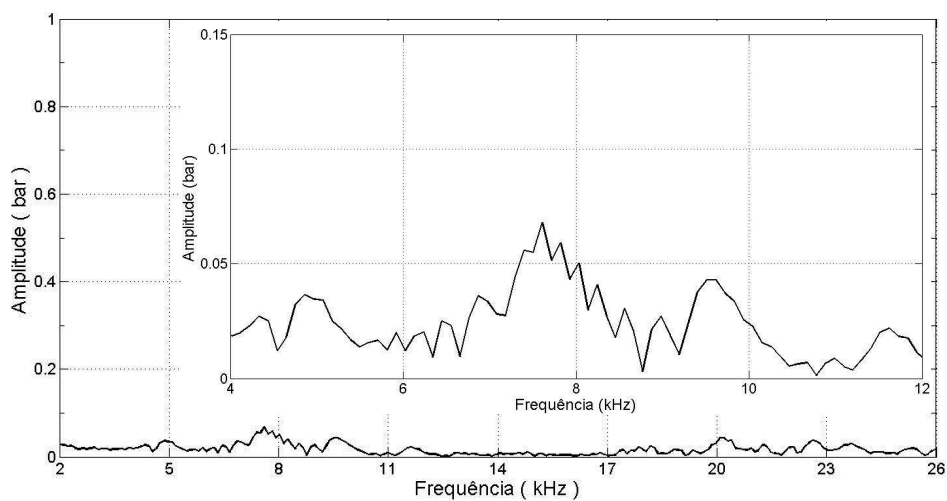


FIGURA 4.47 – Análise *FFT*: $\lambda = 1,5$ - PFI CNG - sensor

Verifica-se que as maiores amplitudes ocorrem que em torno de 5 kHz, ligeiramente abaixo de 8 kHz e em torno de 9,5 kHz. A FIG. 4.48 apresenta o espectrograma considerando o intervalo de 0° a 90° do ângulo do eixo do motor de modo a abranger toda a faixa de interesse para o estudo da detonação bem como para permitir analisar o seu comportamento ao longo do ângulo do eixo do motor.

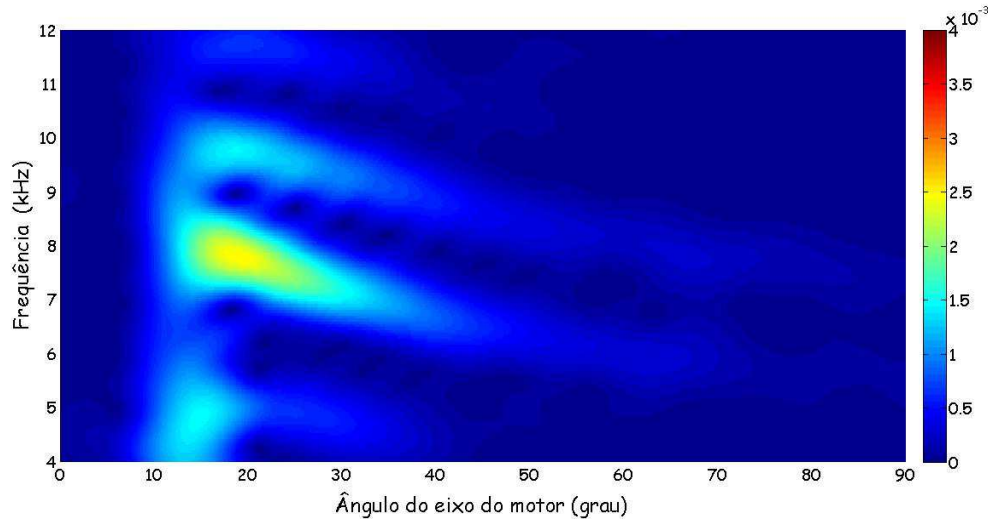


FIGURA 4.48 – Espectrograma: $\lambda = 1,5$ - PFI CNG - sensor

Da análise das FIG. 4.47 e 4.48, verifica-se os diversos modos acústicos detectados pelo sensor de pressão identificados pelas regiões alongadas e mais claras. Observa-se o comportamento decrescente dos valores de frequência em função do ângulo do eixo do motor. A faixa de frequências em torno de 5,5 kHz refere-se ao 1° modo circunferencial, aquela em torno de 8 kHz refere-se principalmente ao 2° modo circunferencial e a faixa em torno de 9,5 kHz refere-se ao 1° modo radial. A ocorrência da detonação em níveis significativos está compreendida entre 10 e 25° do eixo do motor embora seja ainda detectada, em menores níveis, até próximo de 50°.

Além disto, percebe-se uma significativa diferença entre os resultados obtidos em função dos valores de lambda sendo os mesmos muito próximos aos resultados simulados. Percebe-se uma redução dos valores de frequência em função do aumento dos valores de lambda. Além disto, alguns modos não foram observados (ou apresentaram intensidade bastante reduzida).

4.4.2 Configuração de injeção DI utilizando Etanol

Nesta configuração, realizou-se além da análise da influência dos valores de lambda, a análise das diferentes estruturas de fluxo e a análise da influência dos valores da pressão de injeção.

4.4.2.1 Influência dos valores de lambda

Analogamente à configuração *PFI CNG* foi realizada inicialmente uma análise utilizando a Transformada Rápida de Fourier (*FFT*); em seguida, foram identificados os principais modos acústicos presentes na câmara de combustão relacionados à detonação e, por último, os sinais foram analisados utilizando a *STFT* de modo a identificar a correlação das frequências com o ângulo do eixo do motor. Para tais análises, foram utilizados respectivamente os seguintes experimentos: $\lambda=1,0$ (prova 22), $\lambda=1,3$ (prova 23) e $\lambda=1,5$ (prova 24) conforme pode ser visto na TAB. 3.2.

A FIGURA. 4.49 apresenta os resultados para $\lambda=1,0$.

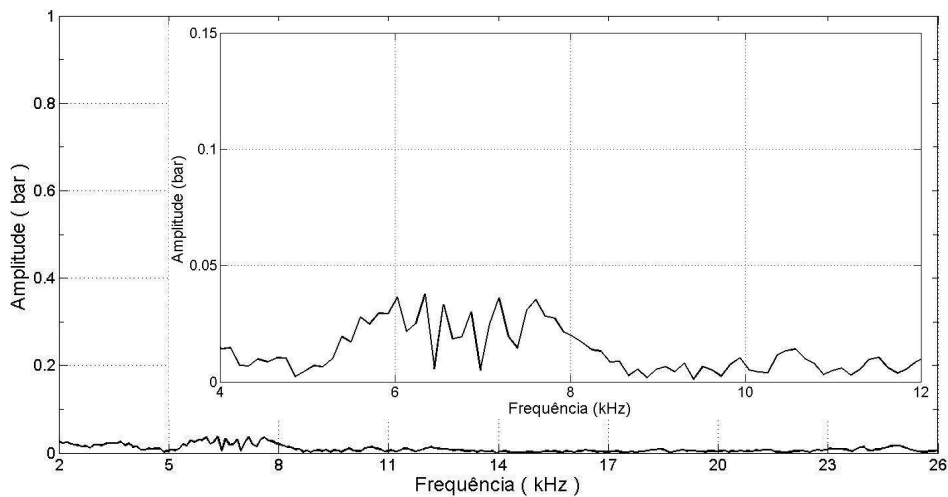


FIGURA 4.49 – Análise *FFT*: $\lambda = 1,0$ – *DI* Etanol - sensor

Da FIG. 4.49 verifica-se que as maiores amplitudes ocorrem na faixa entre 5 kHz e 8 kHz. A FIG. 4.50 apresenta o comportamento dos modos acústicos ao longo do ângulo do eixo do motor por meio do espectrograma considerando o intervalo de 0° a 90° de modo a abranger toda a faixa de interesse para o estudo da detonação.

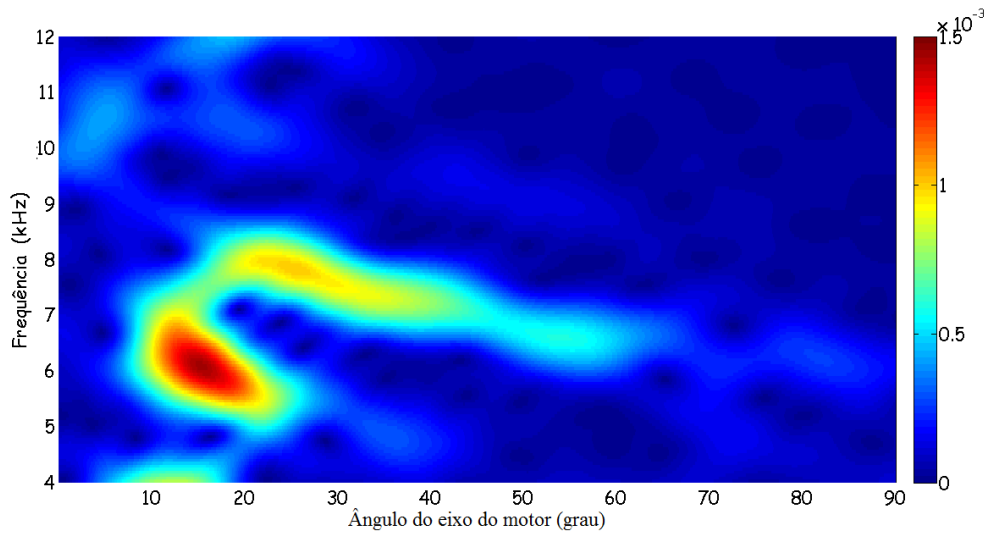


Figura 4.50 – Espectrograma: $\lambda = 1,0$ – *DI* Etanol – sensor

Observa-se os principais modos acústicos: 1º modo circunferencial situado entre 10º e 25º do eixo do motor e o 2º modo circunferencial situado entre 20º e 60º. Ambos apresentam o comportamento típico esperado para os modos acústicos na câmara de combustão: redução da frequência com o aumento do ângulo do eixo do motor. O maior conteúdo energético encontra-se no 1º modo circunferencial conforme citado em Eng (2002).

Na sequência da análise da influência dos valores de lambda, a FIG. 4.51 apresenta os resultados para $\lambda=1,3$.

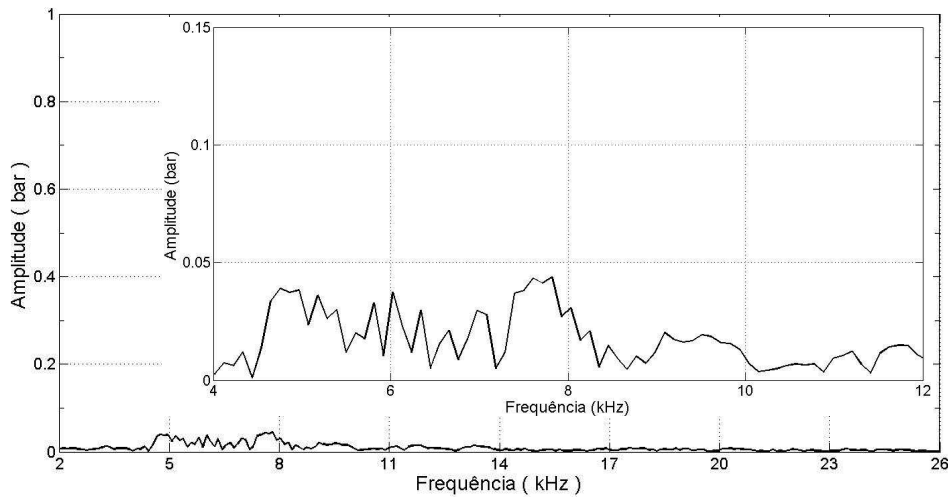


Figura 4.51 – Análise *FFT*: $\lambda = 1,3$ – *DI* Etanol – sensor

Da FIG. 4.51 visualiza-se os quatro principais modos acústicos: o 1º modo

circunferencial (em torno de 5 kHz), a contribuição do 2º modo circunferencial e do 1º modo radial (em torno de 7,5 kHz) e o 1º modo combinado (em torno de 9,5 kHz). A FIG. 4.52 mostra a evolução dos referidos modos acústicos em função do ângulo do eixo do motor.

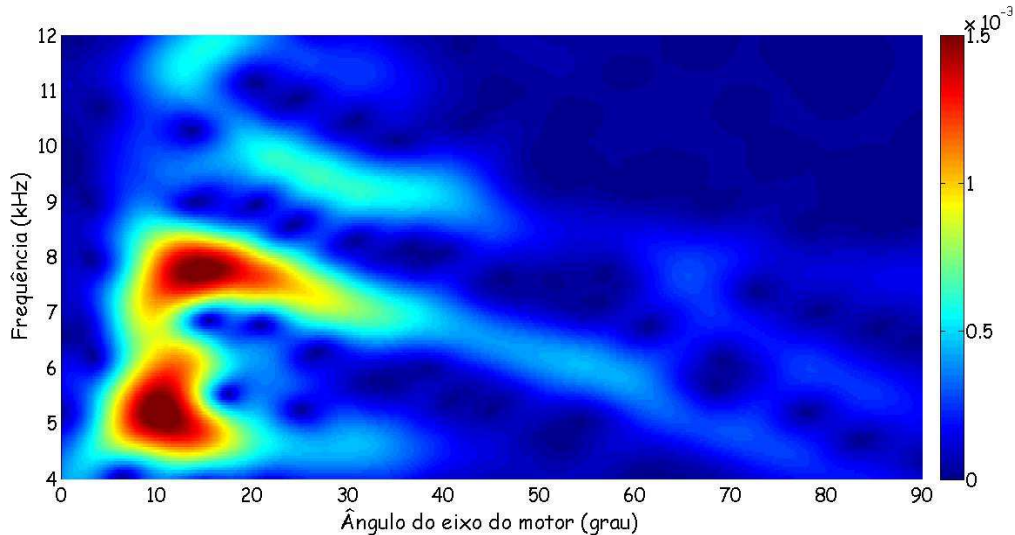


Figura 4.52 – Espectrograma: $\lambda = 1,3$ – *DI* Etanol – sensor

Pela FIG. 4.52, observa-se a presença dos quatro principais modos acústicos: o 1º modo circunferencial cuja ocorrência está entre 5º e 20º do ângulo do eixo do motor porém numa ampla faixa de frequência (entre 4,5 kHz e 6,5 kHz), a contribuição do 2º modo circunferencial e do 1º modo radial com ocorrência significativa entre 10º e 40º e persistindo com oscilações até próximo de 60º com menor intensidade e, por último, o 1º modo combinado com ocorrência entre 20º e 40º porém com menor intensidade comparada aos modos anteriores.

Por último, segue a análise para o valor de lambda igual a 1,5 cuja *FFT* pode ser visualizada por meio da FIG. 4.53.

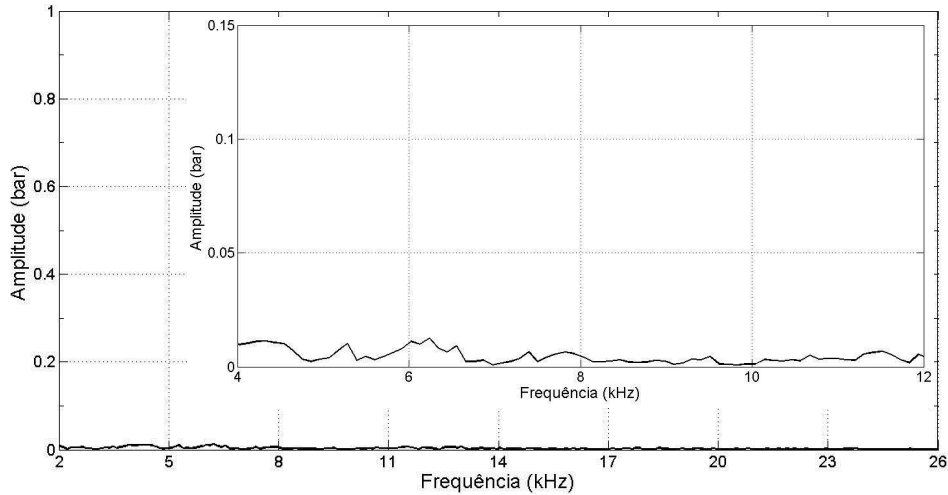


FIGURA 4.53 – Análise *FFT*: $\lambda = 1,5$ – *DI* Etanol – sensor

Percebe-se por meio da FIG. 4.53 a ocorrência de três picos de amplitude (comparativamente menores em relação aos anteriores): o primeiro, em torno de 4,5 kHz; o segundo, em torno de 6 kHz e, o terceiro, em torno de 7,5 kHz. Para detalhar mais a análise acima, realizou-se uma *STFT* cujo resultado pode ser visto na FIG. 4.54.

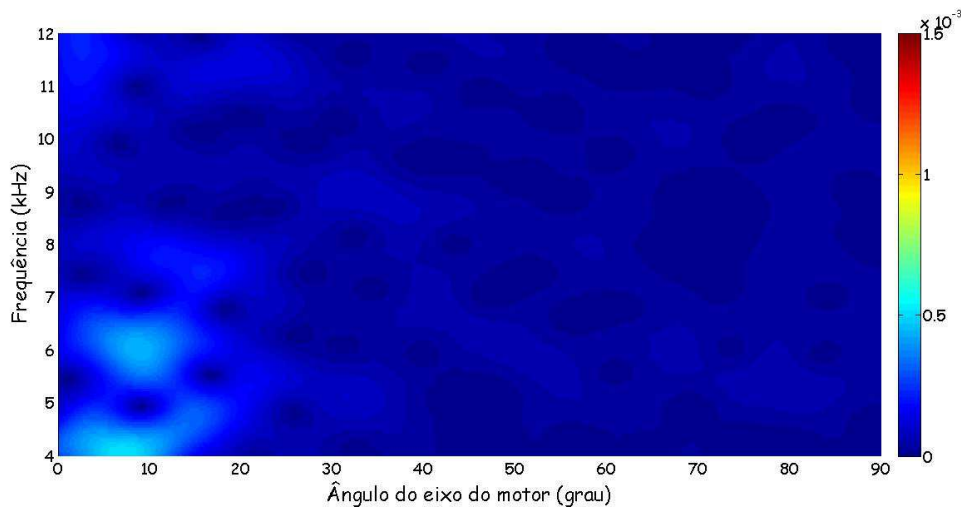


FIGURA 4.54 – Espectrograma: $\lambda = 1,5$ – *DI* Etanol – sensor

A análise da FIG. 4.54 não permite uma definição clara dos modos acústicos. Em princípio, a duração do fenômeno da detonação é bastante curta e de reduzida intensidade. O comportamento típico do referido fenômeno em função do ângulo do eixo do motor não se apresenta tão definido não permitindo, assim, uma análise comparativa mais aprofundada. Uma possível explicação para tal fato é que as oscilações relativas à detonação não tenham sido tão intensas quanto se desejaria dada à

pouca energia presente na mistura e, assim, a autoignição não tenha se sustentado por um longo período.

4.4.2.2 Influência das diferentes estruturas de fluxo

Uma vez realizada a análise da influência dos valores de lambda, procedeu-se à avaliação da influência dos diversos tipos de estruturas de fluxo. A FIG. 4.55 apresenta o resultado da análise utilizando *FFT* na faixa de frequência de interesse para a análise da detonação para a estrutura de fluxo *low swirl*.

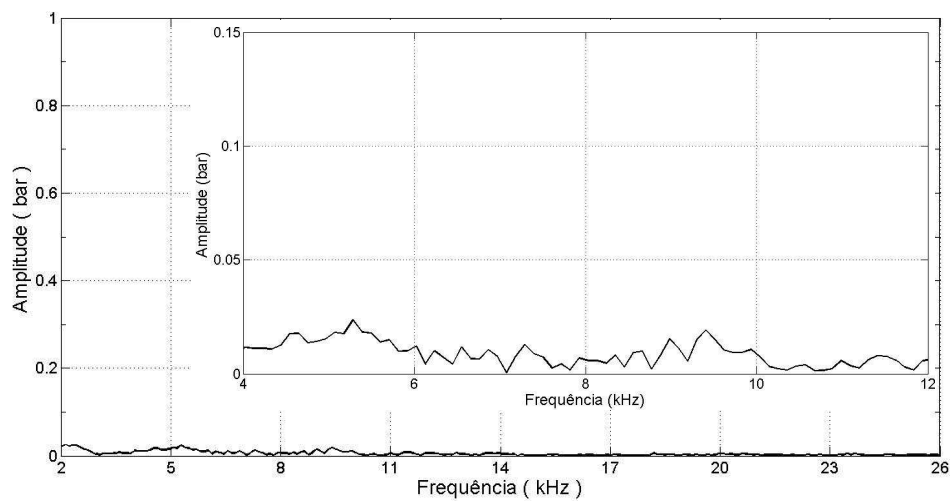


FIGURA 4.55 – Análise *FFT*: *low swirl* – *DI* Etanol – sensor

Da FIG. 4.55 nota-se na faixa de frequência de interesse da detonação pequenas amplitudes relacionadas aos modos acústicos: 1º modo circunferencial em torno de 5 kHz, as contribuições do 1º modo radial e do 2º circunferencial em torno de 7,5 kHz e o 1º modo combinado em torno de 9,5 kHz. A FIG. 4.56 mostra o comportamento destes modos acústicos em função do ângulo do eixo do motor.

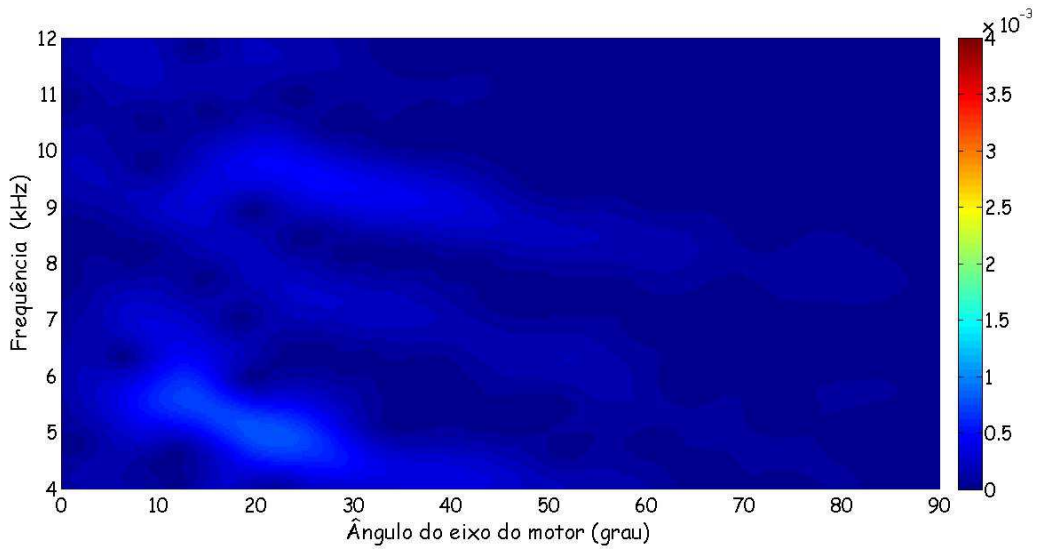


FIGURA 4.56 – Espectrograma: *low swirl* – *DI Etanol* – sensor

Embora as amplitudes dos modos acústicos sejam reduzidas, verifica-se o comportamento típico dos mesmos em função do ângulo do eixo do motor (redução dos valores de frequência em função do referido ângulo).

A FIG. 4.57 mostra o resultado da *FFT* para a estrutura de fluxo *medium swirl and tumble*.

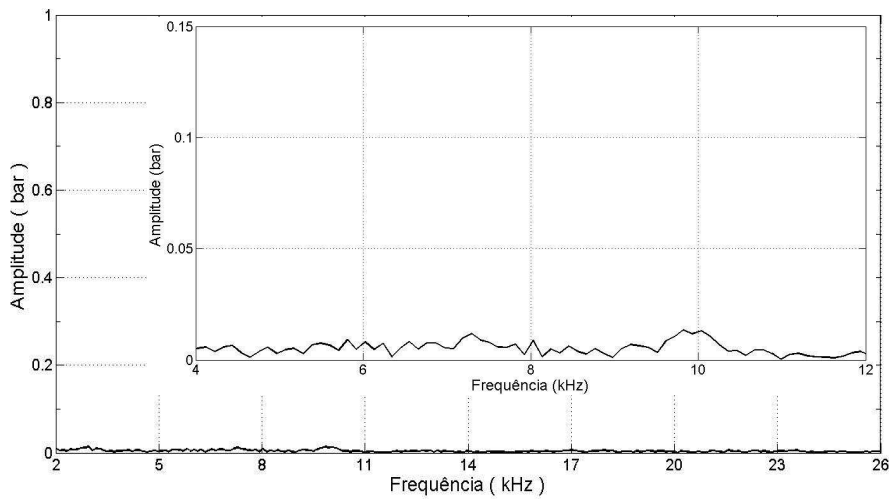


FIGURA 4.57 – Análise *FFT*: *medium swirl and tumble* – *DI Etanol* – sensor

A partir da FIG. 4.57, na faixa de frequências referente à ocorrência da detonação, verifica-se discretas amplitudes relacionadas aos modos acústicos sendo muito difícil identificar a sua presença na câmara de combustão.

Utilizou-se a análise *STFT* de modo a identificar a dependência dos modos acústicos com o ângulo do eixo do motor cujo resultado está mostrado na FIG. 4.58.

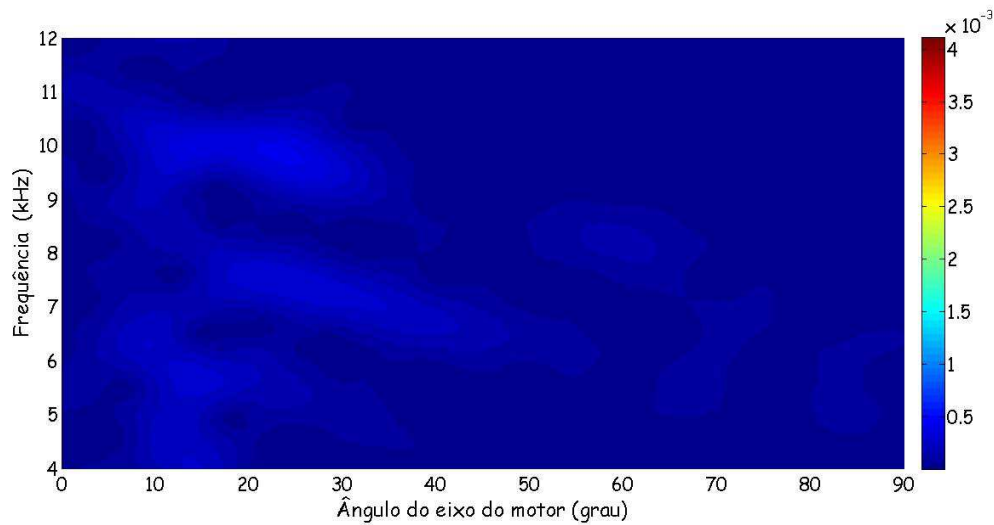


FIGURA 4.58 – Espectrograma: *medium swirl and tumble* – DI Etanol – sensor

Analogamente à estrutura de fluxo *low swirl*, verifica-se reduzidas amplitudes referentes aos modos acústicos (1º modo circunferencial em torno de 6 kHz, a contribuição do 2º modo circunferencial e do 1º modo radial em torno de 7,5 kHz e o 1º modo combinado em torno de 10 kHz) embora possa ser verificado o comportamento típico dos mesmos em função do ângulo do eixo do motor (redução dos valores de frequência em função do referido ângulo).

A FIG. 4.59 apresenta o resultado da *FFT* para a estrutura de fluxo *high swirl*.

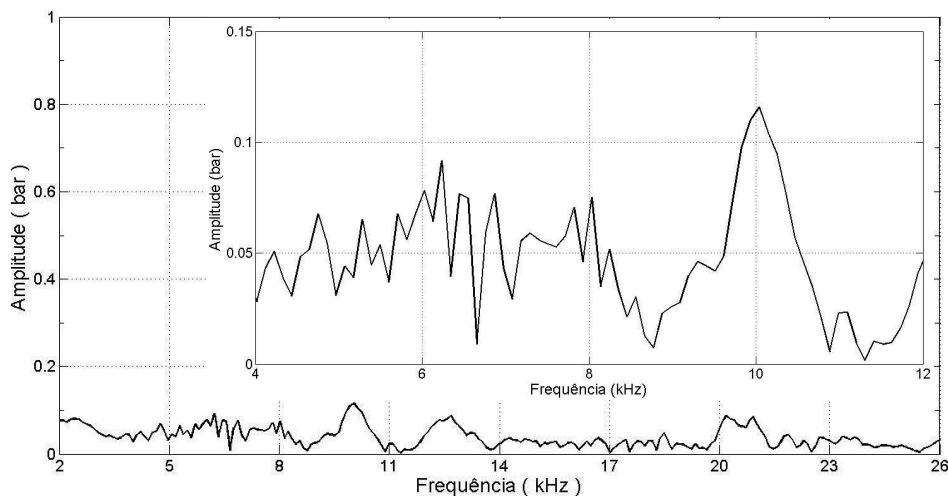


FIGURA 4.59 – Análise *FFT*: *high swirl* – DI Etanol - sensor

Da FIG. 4.59, observa-se picos de amplitude referentes aos principais modos

acústicos presentes no interior da câmara de combustão. O 3º modo circunferencial pode ser facilmente identificado (em torno de 10 kHz) enquanto os outros se confundem na faixa de frequência entre 4 e 8,5 kHz. O comportamento dos modos acústicos em função do ângulo do eixo do motor pode ser visualizado por meio da FIG. 4.60.

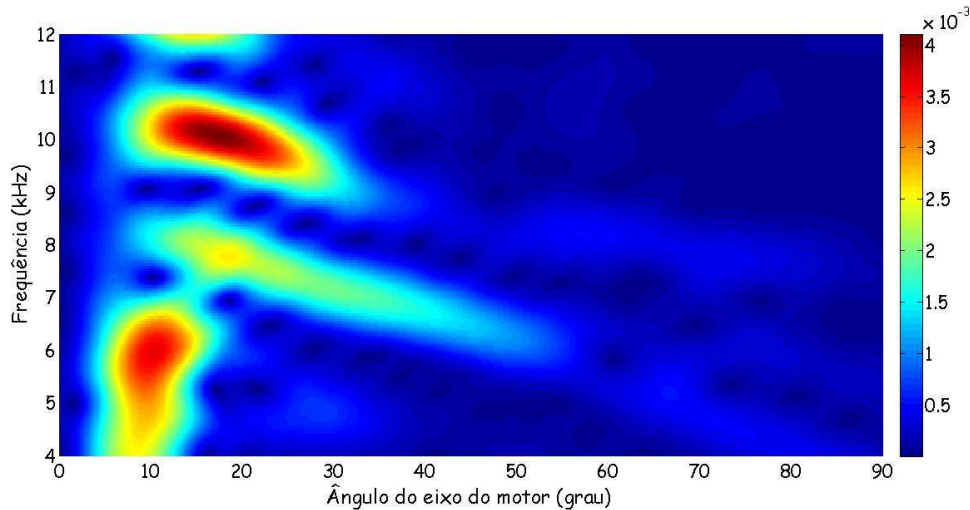


FIGURA 4.60 – Espectrograma: *high swirl* – DI Etanol – sensor

Da FIG. 4.60, identifica-se o 1º modo circunferencial em torno de 6 kHz com curta duração: 5 a 15º do ângulo do eixo do motor), a contribuição do 2º modo circunferencial e do 1º modo radial em torno de 8 kHz o qual se estende de 10 a 50º e o 3º modo circunferencial em torno de 10 kHz com duração compreendida entre 10 e 30º.

Percebe-se uma nítida diferença na intensidade dos modos acústicos excitados pela ocorrência da detonação entre as várias estruturas de fluxo: na estrutura de fluxo *high swirl* os modos acústicos foram claramente detectados enquanto nas outras estruturas a excitação dos referidos modos foi mais discreta. Uma possível explicação para tal constatação pode ser o fato de que, com elevada turbulência na câmara de combustão, aumenta a probabilidade de ocorrência de pontos de autoignição.

4.4.2.3 Influência dos valores da pressão de injeção

Uma vez avaliada a influência dos valores de lambda e a influência das diversas estruturas de fluxo no espectro de frequências dos modos acústicos presentes na câmara de combustão devido à ocorrência da detonação, foi realizada uma avaliação da influência do valor da pressão de injeção de combustível (100 e 140 bar) sendo

mantido o valor de lambda igual a 1,3 e a estrutura de fluxo *low swirl*. A FIG. 4.61 apresenta a análise *FFT* do sinal de pressão oriunda do sensor de pressão.

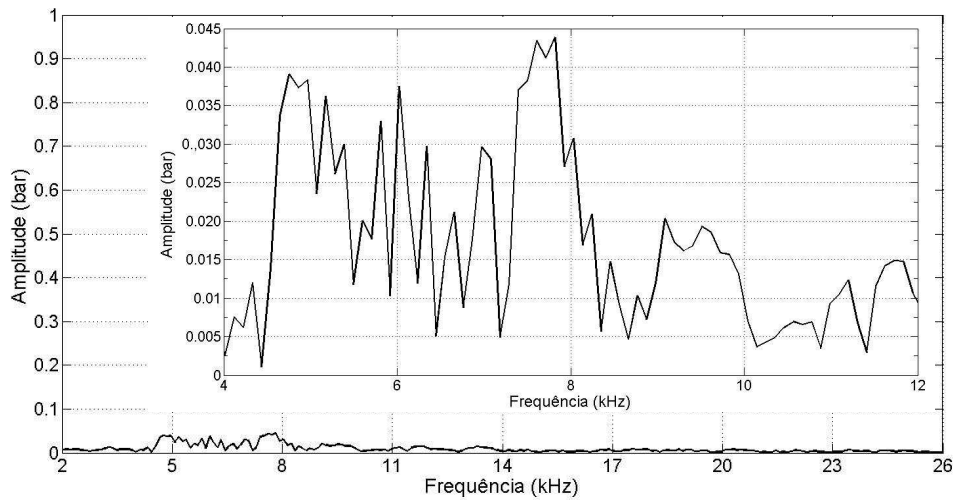


FIGURA 4.61 – Análise *FFT*: pressão injeção 100 bar – *DI* Etanol – sensor

A FIG. 4.61 apresenta alguns picos relativos aos modos acústicos: o 1° modo circunferencial (em torno de 5 kHz), a contribuição do 2° modo circunferencial e do 1° modo radial (em torno de 7,5 kHz) e o 1° modo combinado (em torno de 9,5 kHz). No intuito de correlacionar as frequências relativas aos respectivos modos com o ângulo do eixo do motor, a FIG. 4.62 apresenta o espectrograma.

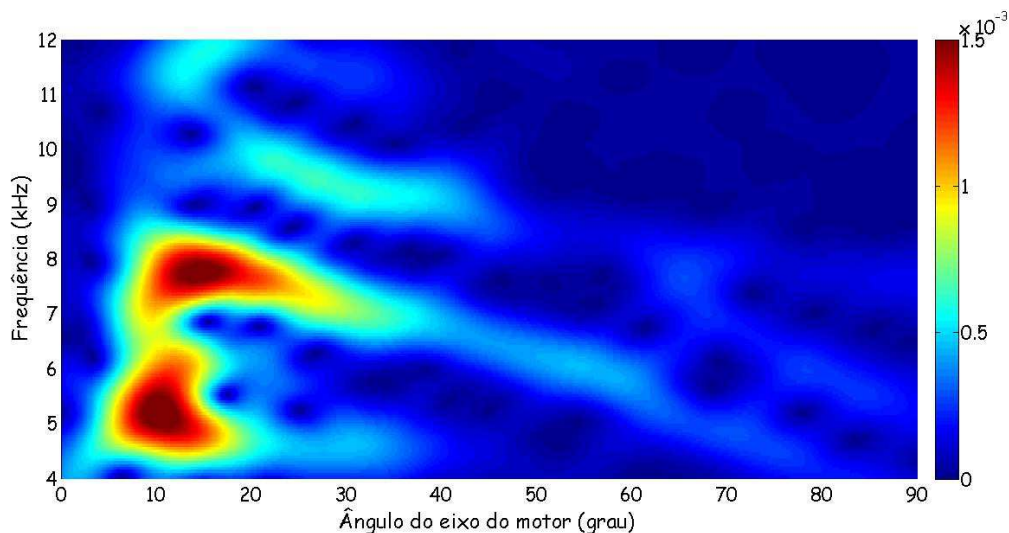


FIGURA 4.62 – Espectrograma: pressão injeção 100 bar – *DI* Etanol – sensor

O 1° modo circunferencial possui duração limitada (5 a 20°), a contribuição do

2º modo circunferencial e do 1º modo radial possui a mais longa duração estendendo-se de 10 a 40º (intensidade elevada) e até 65º com menor intensidade e o 1º modo combinado com duração de 20º até 40º com reduzida amplitude.

A FIG. 4.63 apresenta a análise *FFT* para a pressão de injeção de 140 bar.

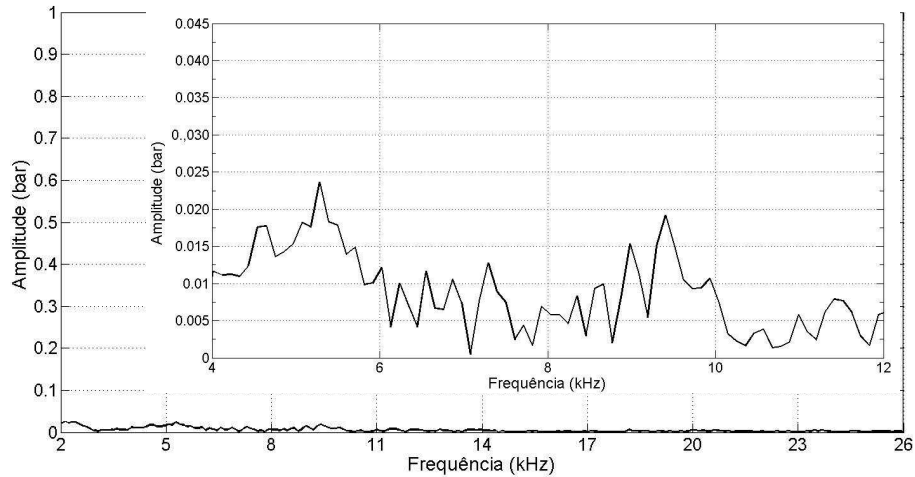


FIGURA 4.63 – Análise *FFT*: pressão injeção 140 bar – *DI* Etanol – sensor

Na faixa de frequências relacionada à ocorrência da detonação nota-se modos acústicos de reduzida intensidade: em torno de 5 kHz (1º modo circunferencial), alguns picos na faixa entre 6,5 e 8 kHz (relacionados ao 2º modo circunferencial e ao 1º modo radial) e outra ampla faixa compreendida entre 8,5 e 10 kHz (1º modo combinado). A FIG. 4.64 mostra a evolução de tais modos acústicos com o ângulo do eixo do motor.

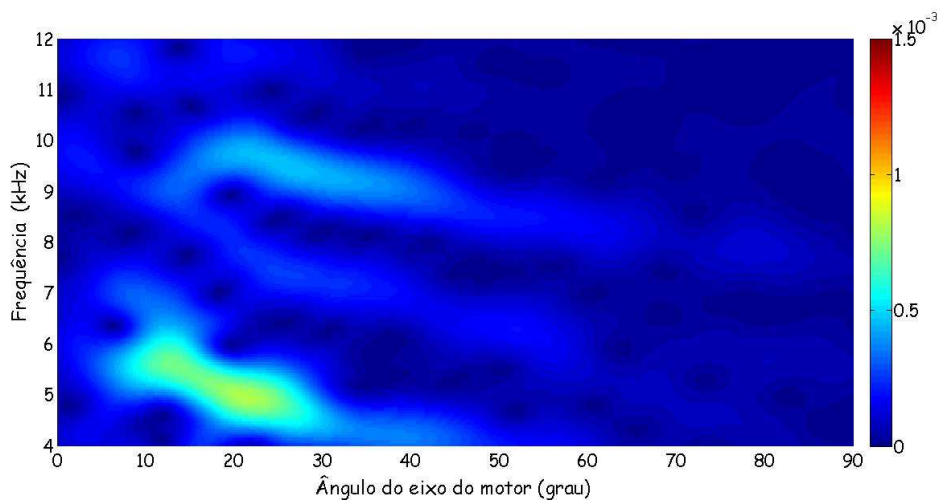


FIGURA 4.64 – Espectrograma: pressão injeção 140 bar – *DI* Etanol – sensor

Verificar a presença do 1º modo circunferencial com duração entre 10º e 30º e o 1º modo combinado com menor intensidade. O 2º modo circunferencial e o 1º modo radial praticamente não são detectados pelo sensor de pressão. Comparativamente à FIG. 4.61, verifica-se a menor intensidade do 1º modo circunferencial e do 1º modo combinado.

Observa-se que com a pressão de injeção de 140 bar a ocorrência da detonação foi mais discreta em relação à pressão de 100 bar, para condições de funcionamento do motor similares. Tal fato provavelmente está associado à melhor atomização do combustível no interior da câmara de combustão o que, tendencialmente, reduz a probabilidade de ocorrência da detonação. Obviamente que esta consideração carece de uma análise mais detalhada envolvendo outros ciclos com a ocorrência da detonação de modo a obter-se uma estatística mais confiável.

4.4.3 Configuração de injeção DI utilizando CNG

Também nesta configuração, foram realizadas tanto a análise da influência dos valores de lambda quanto a análise das diferentes estruturas de fluxo.

4.4.3.1 Influência dos valores de lambda

Analogamente às outras configurações anteriormente discutidas, antes de se proceder às análises propriamente ditas, foi realizada uma *FFT* de modo a entender o espectro de frequências presente no interior da câmara de combustão e detectado pelo sensor de pressão. Para esta análise, foram utilizados respectivamente os seguintes experimentos: $\lambda = 1,0$ (prova 2), $\lambda = 1,3$ (prova 4) e $\lambda = 1,5$ (prova 6) conforme pode ser visto na TAB. 3.3.

A FIG. 4.65 apresenta os resultados para $\lambda = 1,0$.

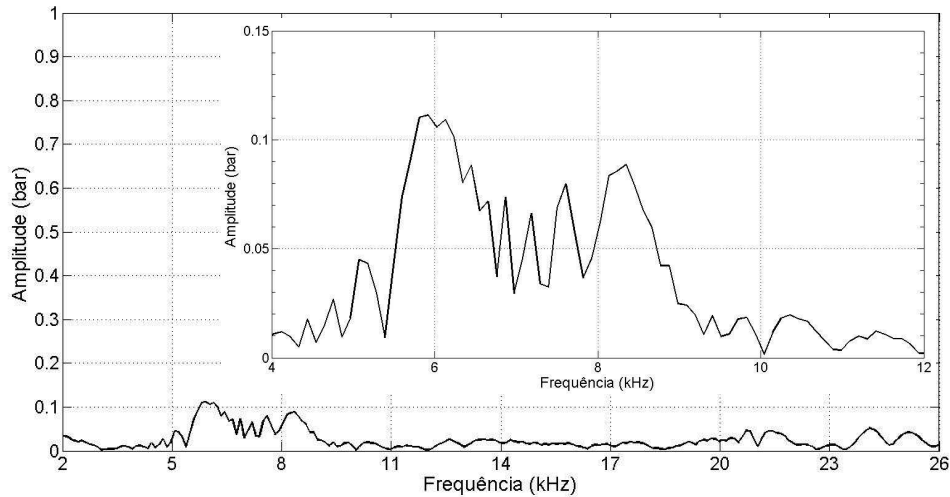


FIGURA 4.65 – Análise *FFT*: $\lambda = 1,0$ – *DI CNG* – sensor

Percebe-se pelo menos dois picos referentes aos principais modos acústicos presentes na câmara de combustão: um pico acentuado em torno de 6 kHz (1º modo circunferencial) e outro pico em torno de 8,5 kHz (2º modo circunferencial e 1º modo radial). A dependência destes modos acústicos com o ângulo do eixo do motor está apresentada na FIG. 4.66.

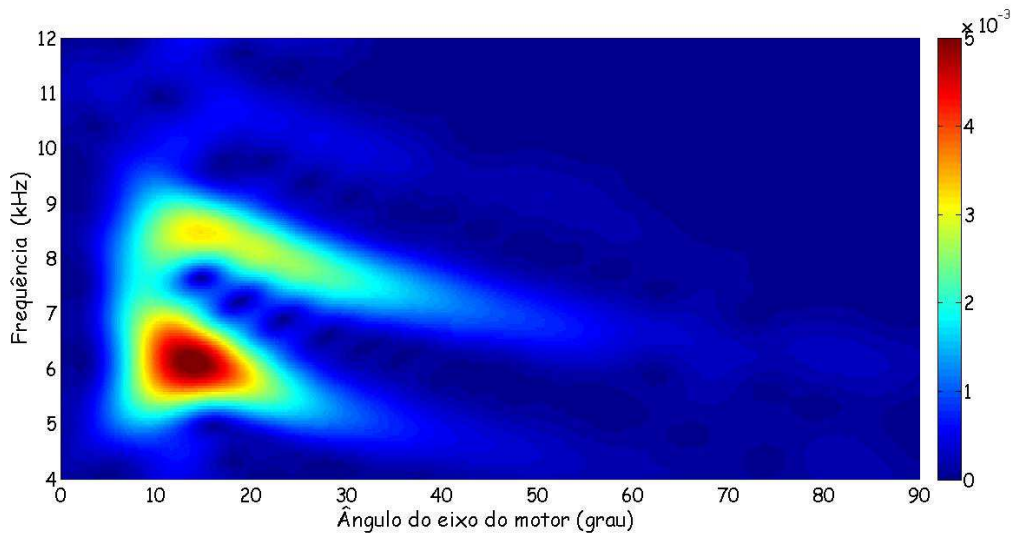


FIGURA 4.66 – Espectrograma: $\lambda = 1,0$ – *DI CNG* – sensor

Nota-se o 1º modo circunferencial em torno de 6 kHz com duração de 25º (5 a 30º) e a contribuição do 2º modo circunferencial e do 1º modo radial em torno de 8,5 kHz (com duração de 35º com elevada intensidade). Ambos os modos estendem-se até aproximadamente 60º do ângulo do eixo do motor porém com reduzida intensidade.

A Figura 4.67 apresenta os resultados para $\lambda = 1,3$.

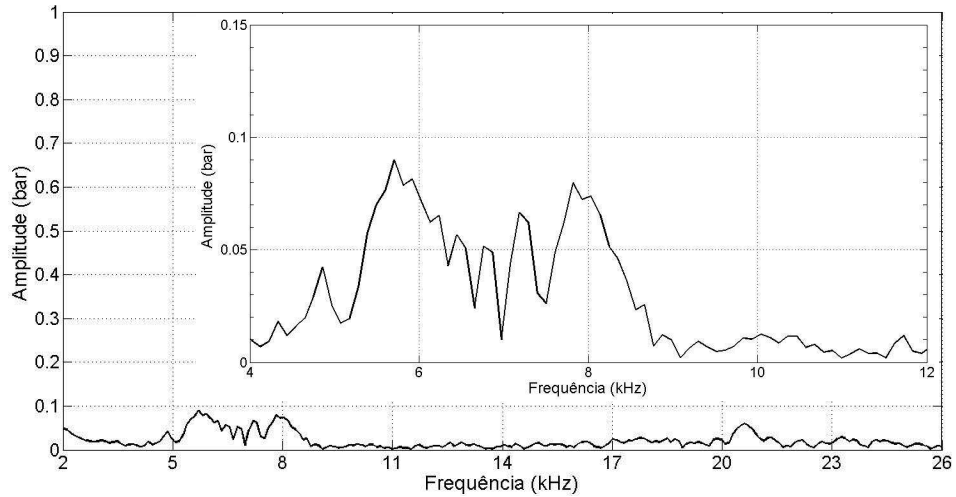


FIGURA 4.67 – Análise *FFT*: $\lambda = 1,3$ – *DI CNG* - sensor

Também para este valor de λ nota-se a presença de dois picos principais: um deles posicionado pouco abaixo de 6,0 kHz (1º modo circunferencial) e outro em torno de 8 kHz (1º modo radial e 2º modo circunferencial) valores estes ligeiramente abaixo daqueles encontrados para o valor de λ igual a 1,0. A FIG. 4.68 mostra a dependência destes modos com o ângulo do eixo do motor.

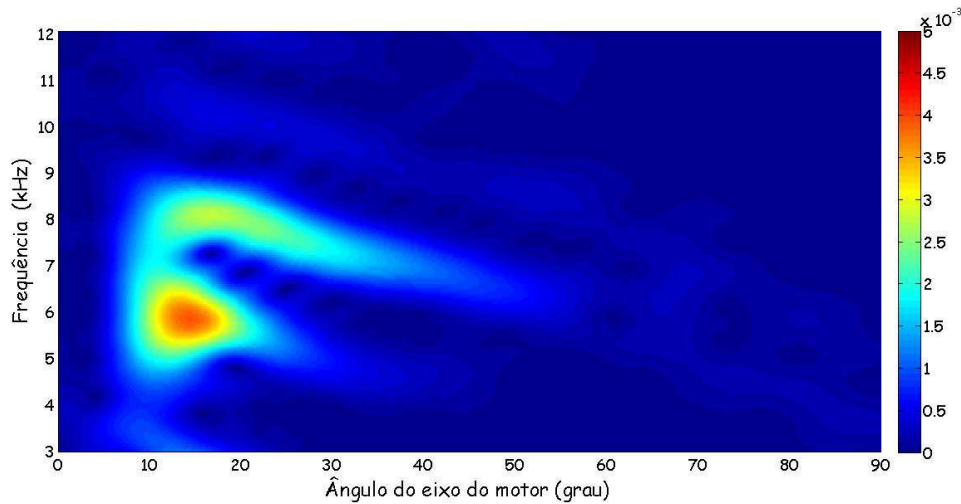


FIGURA 4.68 – Espectrograma: $\lambda = 1,3$ – *DI CNG* – sensor

Nota-se o 1º modo circunferencial com maior amplitude (curta duração: 10 a 20º) e a contribuição do 2º modo circunferencial e do 1º modo radial com duração de 20º (10 a 30º). O 1º modo combinado praticamente não é detectado pelo sensor de pressão.

A Figura 4.69 apresenta os resultados para $\lambda = 1,5$.

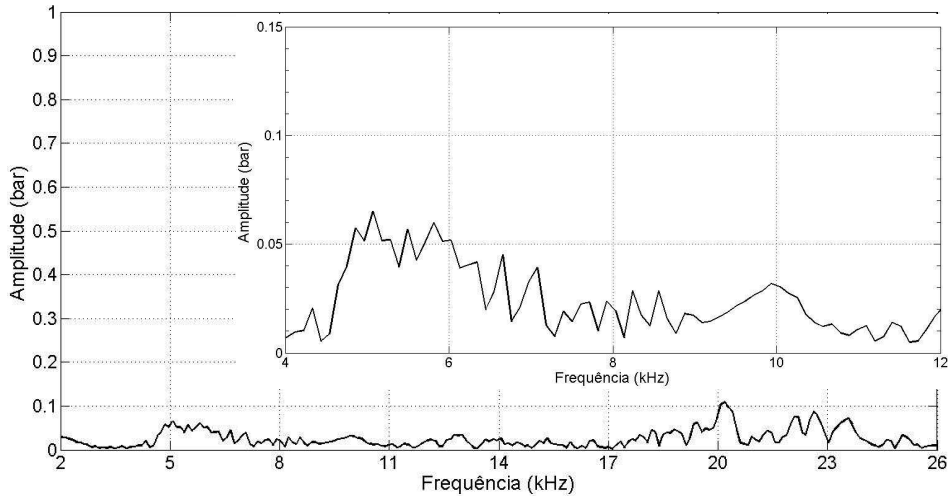


FIGURA 4.69 – Análise *FFT*: $\lambda = 1,5$ – *DI CNG* – sensor

Nota-se a presença de um largo pico de maior amplitude centrado em torno de 5 kHz e um pico menor posicionado em torno de 10 kHz em uma faixa mais estreita de frequência.

O espectrograma referente a este valor de λ pode ser visualizado na FIG. 5.70.

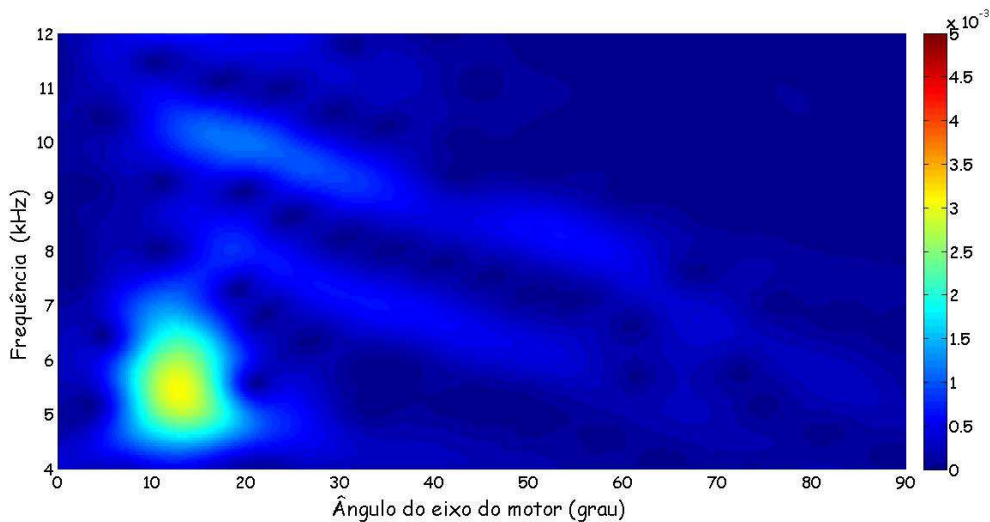


FIGURA 4.70 – Espectrograma: $\lambda = 1,5$ – *DI CNG* – sensor

O único modo acústico detectado de maneira clara pelo sensor de pressão é o 1º modo circunferencial em torno de 5,5 kHz. Os outros dois modos são ligeiramente detectados embora possuam duração mais longa (de 10° a 60°). Em relação aos valores de lambda anteriores (1,0 e 1,3) verifica-se que a detonação possui menor intensidade.

A influência do valor de lambda pode ser verificada por meio da redução dos valores de frequência para cada modo acústico característico em função do aumento de lambda. Tal fato está associado à menor quantidade de energia presente na câmara de combustão para valores de lambda mais elevados gerando valores mais baixos de temperatura, da velocidade do som e, conseqüentemente, das frequências.

4.4.3.2 Influência das diferentes estruturas de fluxo

Para esta análise, foram utilizados respectivamente os seguintes experimentos: estrutura de fluxo *low swirl* (prova 4), estrutura de fluxo *medium swirl and tumble* (prova 8) e estrutura de fluxo *high swirl* (prova 10) conforme pode ser visto na TAB. 4.4. O valor de lambda foi mantido igual a 1,3.

A Figura 4.71 apresenta os resultados para a estrutura de fluxo *low swirl*.

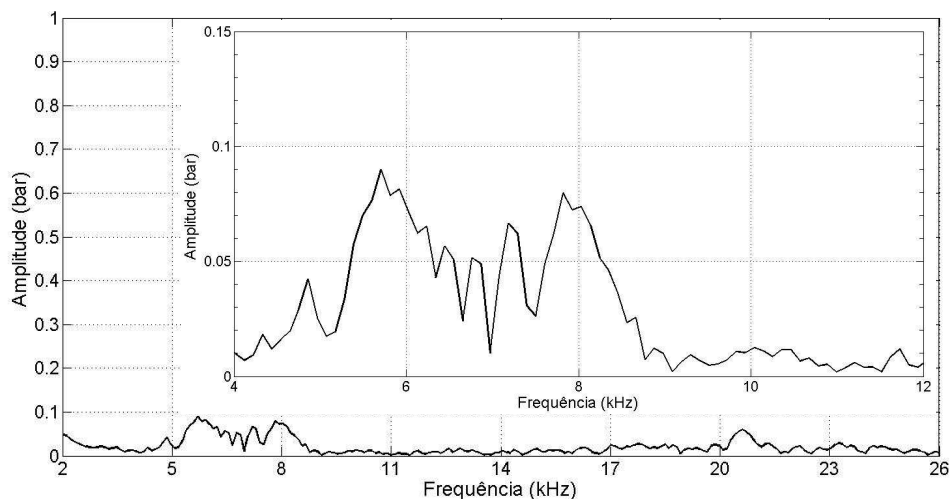


FIGURA 4.71 – Análise FFT: *low swirl* – DI CNG – sensor

Observa-se dois picos de amplitude entre 5 e 12 kHz (faixa de frequência de ocorrência da detonação identificada na simulação computacional): o pico posicionado ligeiramente abaixo de 6 kHz refere-se ao 1º modo circunferencial enquanto o pico em torno de 8 kHz refere-se à contribuição do 2º modo circunferencial e do 1º modo radial. O 1º modo combinado aparentemente não foi detectado pelo sensor de pressão pois apresenta baixa amplitude. (pico em torno de 10 kHz).

A FIG. 4.72 apresenta o espectrograma referente à configuração acima.

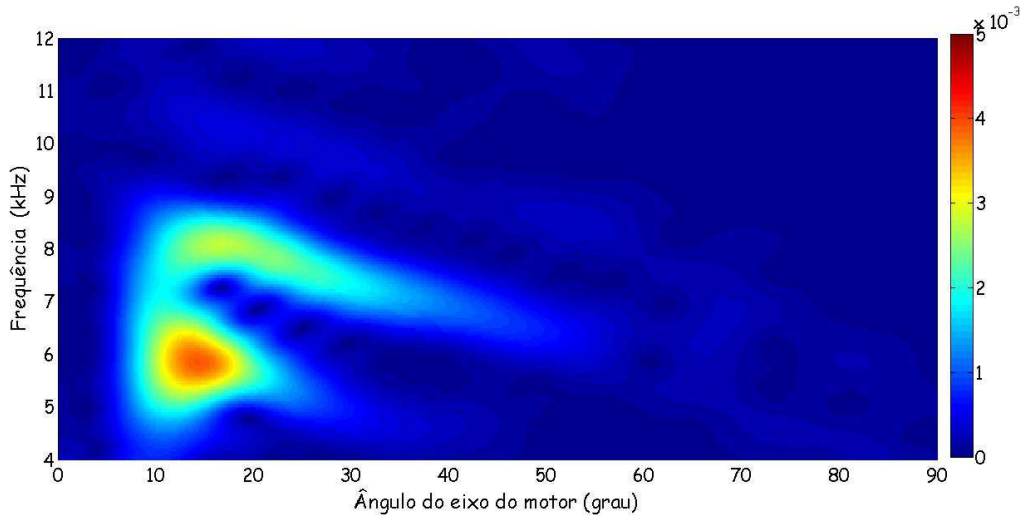


FIGURA 4.72 – Espectrograma: *low swirl* – *DI CNG* - sensor

Verifica-se que o 1º modo circunferencial, em torno de 6 kHz, possui duração de 10º enquanto o pico referente ao 2º modo circunferencial e ao 1º modo radial (em torno de 8 kHz) possui duração de aproximadamente 30º. A maior contribuição em termos de energia está associada ao 1º modo circunferencial.

A FIG. 4.73 apresenta a análise *FFT* para a estrutura de fluxo *medium swirl and tumble*.

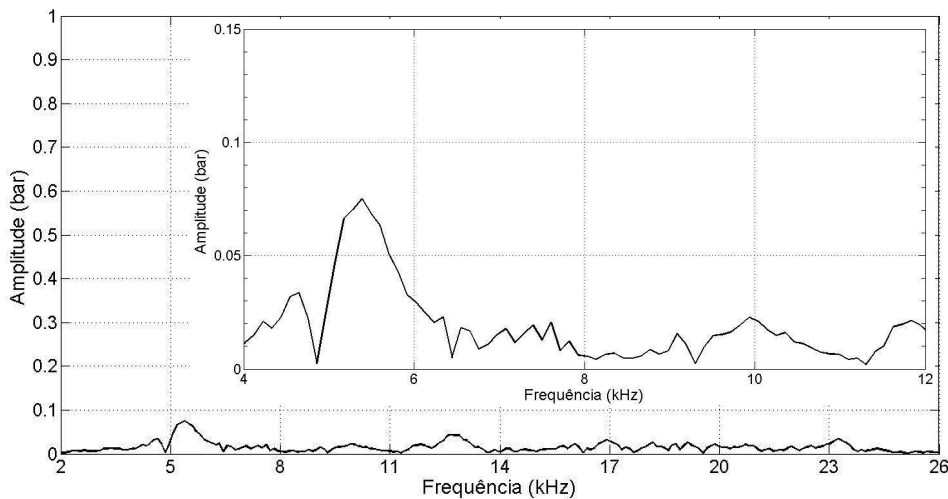


FIGURA 4.73 – Análise *FFT*: *medium swirl and tumble* – *DI CNG* – sensor

Percebe-se a presença de três picos principais associados aos modos acústicos detectados na câmara de combustão devido à ocorrência da detonação: um em torno de 5,5 kHz no qual está contida a maior parte da energia decorrente da ocorrência da detonação, outro em torno de 10 kHz (2º modo circunferencial) e, por último, outro em

torno de 12 kHz (3º modo circunferencial). A FIG. 4.74 mostra o comportamento destes modos acústicos em função do ângulo do eixo do motor.

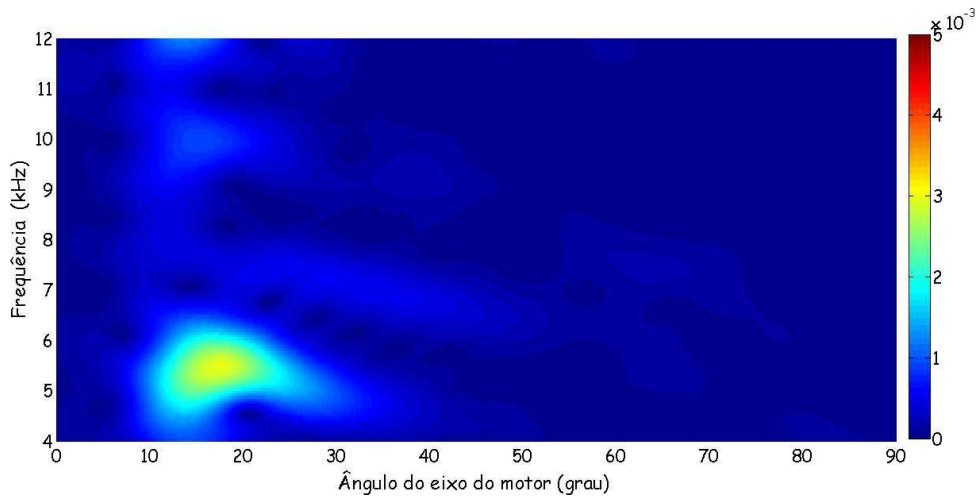


FIGURA 4.74– Espectrograma: *medium swirl and tumble* – *DI CNG* – sensor

O 1º modo circunferencial (em torno de 5,5 kHz) estende-se de 10 a 25º enquanto os outros dois modos apresentam menor intensidade comparado aos mesmos modos acústicos relacionados à configuração de estrutura de fluxo *low swirl*.

A FIG. 4.75 mostra a análise *FFT* para a configuração de estrutura de fluxo *high swirl*.

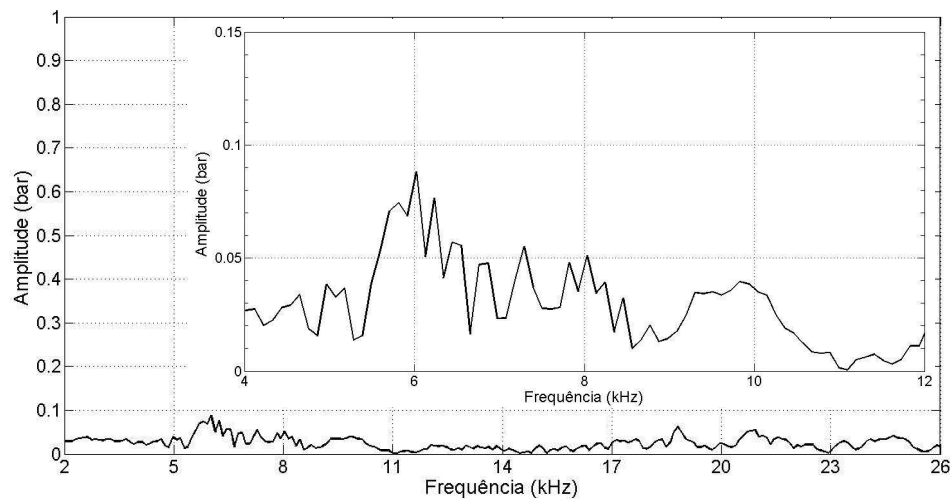


FIGURA 4.75 – Análise *FFT*: *high swirl* – *DI CNG* – sensor

Nota-se na faixa de frequência de interesse de análise da detonação a

ocorrência de picos em torno de 6 kHz (1° modo circunferencial), 8 kHz (1° modo radial e 2° circunferencial) e 10 kHz (contribuição de diversos modos). A FIG. 4.76 apresenta o espectrograma referente a esta configuração.

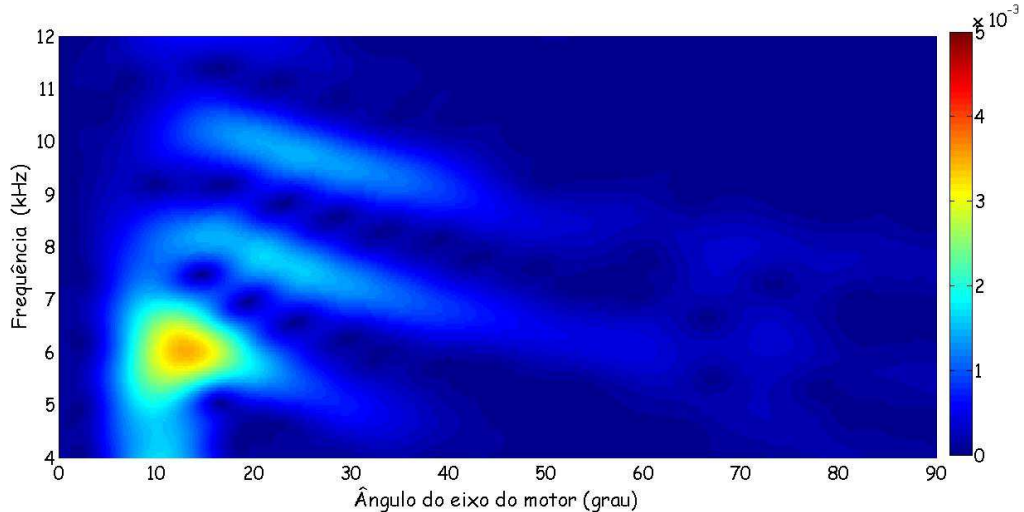


FIGURA 4.76 – Espectrograma: *high swirl* – *DI CNG* – sensor

O 1° modo circunferencial destaca-se dos outros modos sendo detectado com elevada intensidade em torno de 6 kHz e estendendo-se entre 10 e 20° do ângulo do eixo do motor. Os outros modos são detectados de maneira discreta pelo sensor de pressão. Todos eles apresentam o padrão de comportamento típico da detonação: redução da frequência em função do ângulo do eixo do motor.

As diferenças de frequências detectadas para as diversas configurações de estruturas de fluxo não são significativas. Os modos detectados são praticamente os mesmos e as suas intensidades não diferem de maneira significativa. Tal conclusão está diretamente ligada ao fato de que a energia presente na câmara de combustão é praticamente a mesma ($\lambda=1,3$) e, portanto, as temperaturas e as velocidades do som e, conseqüentemente, as frequências são praticamente as mesmas.

4.4.4 Comparativo dos resultados do sensor de pressão e da simulação

Com o objetivo de verificar a correlação entre os resultados experimentais provenientes do sensor de pressão e aqueles provenientes da simulação computacional, tais resultados foram comparados no espectrograma mostrado na FIG. 4.77 para a configuração *DI Etanol* com valor de lambda igual a 1,3 e estrutura de fluxo *high swirl*.

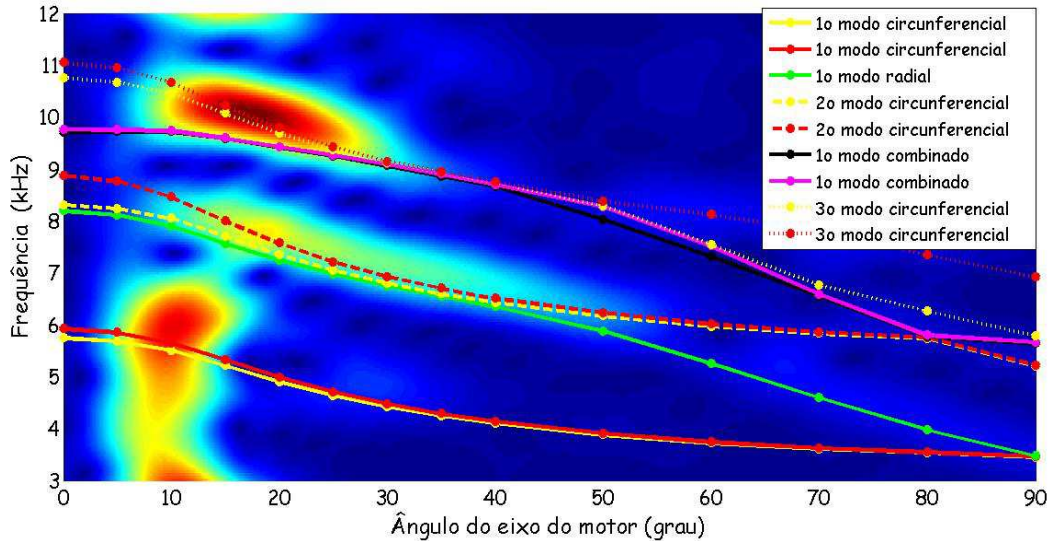


FIGURA 4.77 – Comparativo de resultados: sensor x simulação

Da análise da FIG. 4.77 verifica-se uma boa correlação entre os resultados comparados. O 1º modo circunferencial mostra a contribuição das frequências emparelhadas e a sua ocorrência é de curta duração em termos de ângulo do eixo do motor. O 1º modo radial contribui com uma pequena parcela (dado o posicionamento do sensor de pressão) juntamente com as frequências emparelhadas do 2º modo circunferencial para as frequências medianas tendo uma duração mais prolongada. Por último, o 1º modo combinado e, principalmente, o 3º modo circunferencial (nas suas frequências emparelhadas) contribuem nas frequências mais elevadas e com duração intermediária em relação às anteriores.

Resultados similares foram obtidos para as outras configurações avaliadas e foram propositadamente omitidas desta publicação com o objetivo de não torná-la excessivamente longa.

4.5 Determinação experimental utilizando vela instrumentada (Etapa 4)

Conforme já citado anteriormente para todos os outros experimentos realizados com o sensor de pressão, o mesmo tipo de procedimento de análise foi também adotado para os experimentos envolvendo este sensor.

Basicamente realizou-se análises nas três configurações de sistema de injeção de combustível, em diferentes valores de lambda e diversos tipos de estruturas de fluxo.

4.5.1 Configuração de injeção PFI utilizando CNG

4.5.1.1 Influência dos valores de lambda

Para esta análise foram utilizados os seguintes experimentos: $\lambda=1,0$ (prova 2), $\lambda=1,3$ (prova 4) e $\lambda=1,5$ (prova 6) conforme pode ser visto na TAB. 3.1.

A Figura 4.78 apresenta os resultados para $\lambda=1,0$ detalhando a faixa entre 4 e 12 kHz.

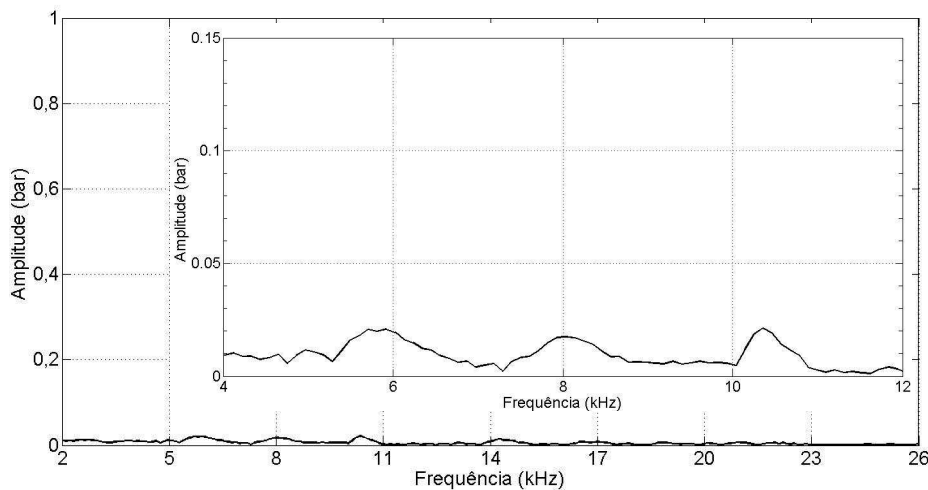


FIGURA 4.78 – Análise FFT: $\lambda = 1,0$ – PFI CNG – vela

Nota-se na faixa de frequência entre 4 e 12 kHz a presença de picos relacionados à ocorrência da detonação os quais referem-se ao 1º modo circunferencial (6 kHz), 1º modo radial (8 kHz) e 1º modo combinado (10,5 kHz), respectivamente. O comportamento dos modos acústicos com o ângulo do eixo do motor pode ser visualizado por meio da FIG. 4.79.

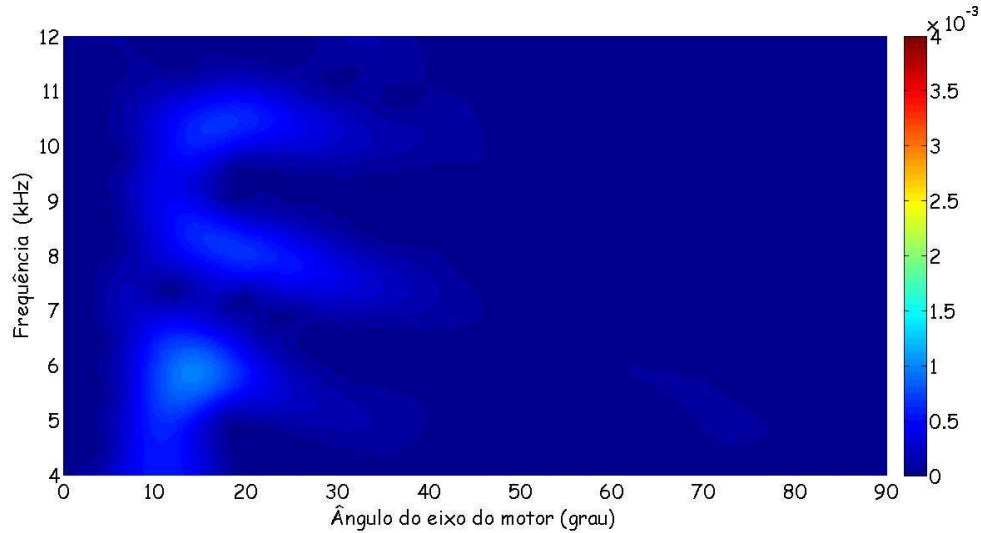


FIGURA 4.79 – Espectrograma: $\lambda = 1,0$ – PFI CNG – vela

Nota-se que as amplitudes dos modos acústicos são bastante atenuadas comparadas às amplitudes detectadas pelo sensor de pressão (Figura 4.44). Isto se deve ao posicionamento do sensor no interior da câmara de combustão. Além disto, constata-se claramente que o 1º modo circunferencial detectado pelo sensor de pressão é o modo acústico mais energético e, portanto, aquele que deve merecer maior atenção por parte dos técnicos da área.

A Figura 4.80 apresenta os resultados para $\lambda=1,3$ juntamente com o detalhamento da faixa de frequência compreendida entre 4 e 12 kHz.

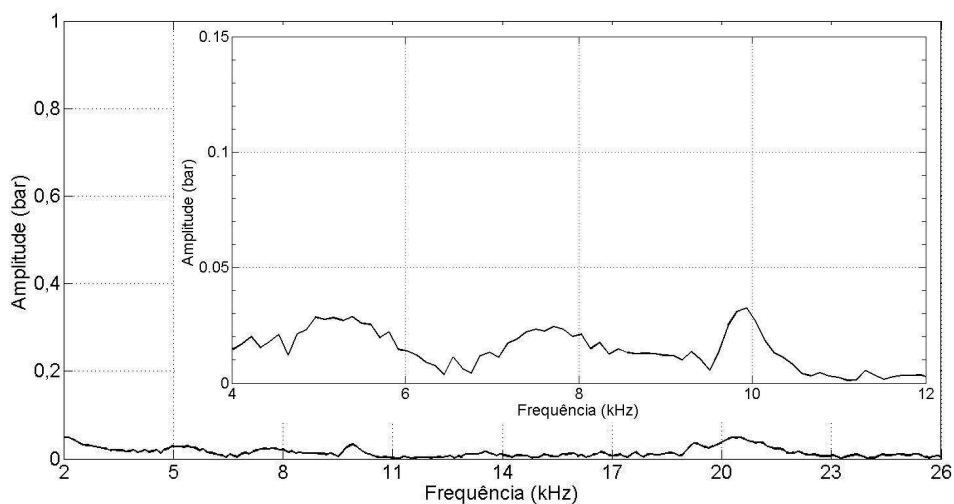


FIGURA 4.80 – Análise FFT: $\lambda = 1,3$ – PFI CNG – vela

Identifica-se picos relacionados aos modos acústicos excitados no interior da

câmara de combustão devido à ocorrência da detonação, a saber: o 1º modo circunferencial (em torno de 5 kHz), 1º modo radial (em torno de 7,5 kHz) e 1º modo combinado (em torno de 10 kHz). Tais valores são ligeiramente menores que aqueles obtidos para a condição de lambda igual a 1,0. Isto se deve à menor temperatura desenvolvida no interior da câmara de combustão fruto da menor quantidade de combustível injetada a qual implica numa menor velocidade do som. A FIG. 4.81 mostra a dependência dos referidos modos acústicos com o ângulo do eixo do motor.

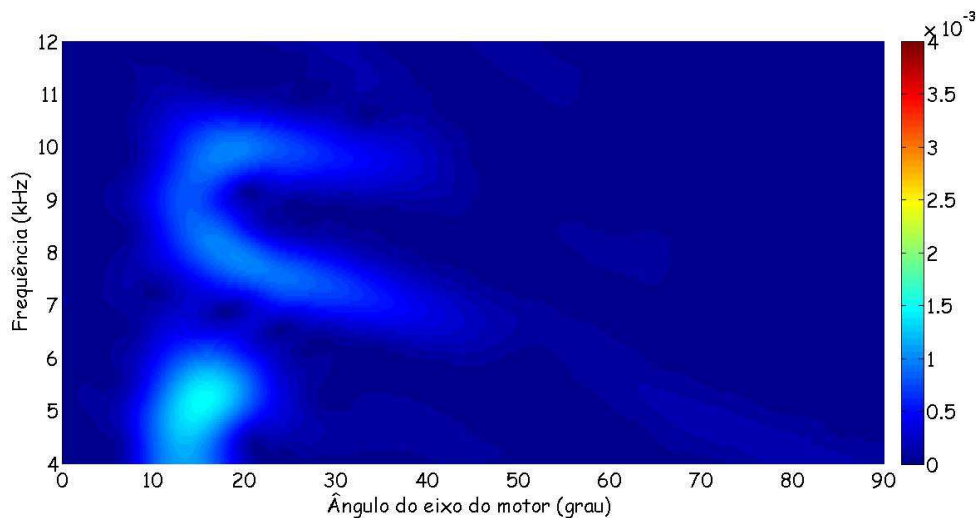


FIGURA 4.81 – Espectrograma: $\lambda = 1,3$ – PFI CNG – vela

Da análise da FIG. 4.81 verifica-se os mesmos modos acústicos detectados em relação à condição para lambda igual a 1,0 sendo as intensidades ligeiramente maiores em relação à mesma condição.

Em relação aos resultados obtidos com o sensor de pressão nota-se uma diferença significativa em relação ao conteúdo energético presente nos modos acústicos. O sensor de pressão, devido ao seu posicionamento deslocado do centro da câmara de combustão, é capaz de detectar um número maior de modos acústicos incluindo aqueles com maior conteúdo energético.

A FIGURA 4.82 apresenta os resultados para $\lambda = 1,5$ onde verifica-se em detalhes a faixa de frequência compreendida entre 4 e 12 kHz.

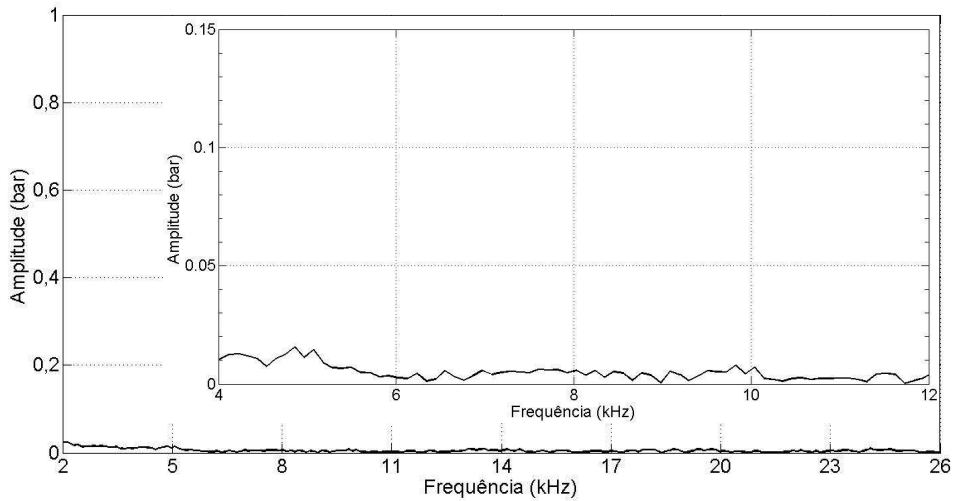


FIGURA 4. 82 – Análise *FFT* para $\lambda = 1,5$ – *PFI CNG* – vela

A identificação dos modos é bastante dificultada pela baixa amplitude dos mesmos pois elas não se destacam a ponto de se poder afirmar com facilidade quais modos estão presentes visto que a detonação ocorre com menor intensidade. A FIG. 4.83 mostra a evolução dos modos acústicos em função do ângulo do eixo do motor.

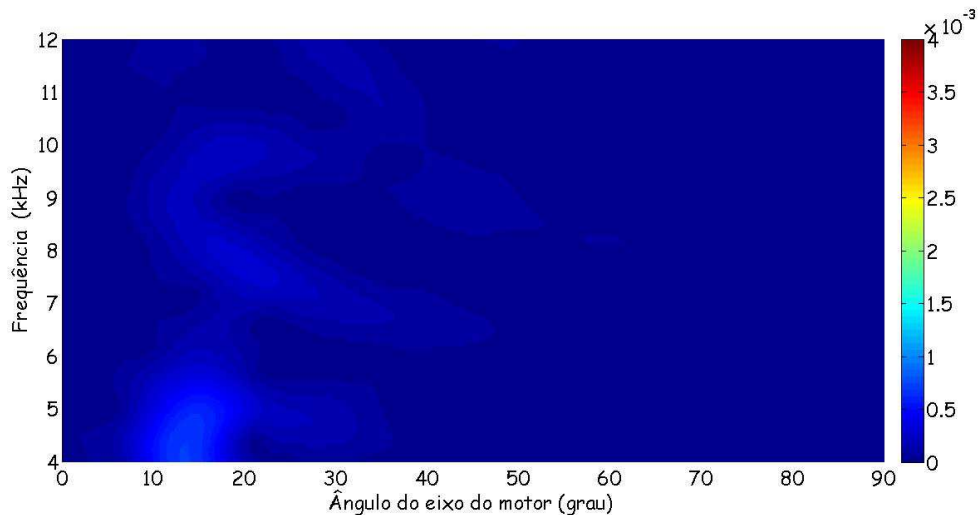


FIGURA 4.83 – Espectrograma: $\lambda = 1,5$ – *PFI CNG* – vela

Nota-se que o 1º modo circunferencial (em torno de 5 kHz), o 1º modo radial (em torno de 7,5 kHz) e o 1º modo combinado (em torno de 10 kHz) apresentam-se bastante discretos. Como era de se esperar, as diferenças encontradas nos valores de frequências em relação à condição de lambda igual a 1,3 são menores comparadas à diferença encontrada entre as condições de lambda igual a 1,0 e 1,3.

Comparada à detecção do sensor de pressão, nota-se que o mesmo é capaz de detectar satisfatoriamente os principais modos acústicos e, portanto, conclui-se que o sensor de pressão é o tipo de transdutor mais adequado para a detecção do fenômeno da detonação quando comparado à vela instrumentada.

4.5.2 Configuração de injeção *DI* utilizando Etanol

4.5.2.1 Influência dos valores de lambda

Para esta análise, a estrutura de fluxo foi mantida na configuração *low swirl* e foram utilizados respectivamente os seguintes experimentos: $\lambda=1,0$ (prova 22), $\lambda=1,3$ (prova 23) e $\lambda=1,5$ (prova 24) conforme pode ser visto na TAB. 3.2.

A FIGURA 4.84 apresenta os resultados para $\lambda = 1,0$ bem como o detalhamento da faixa de frequência relacionado à ocorrência da detonação para esta configuração de acordo com a simulação computacional.

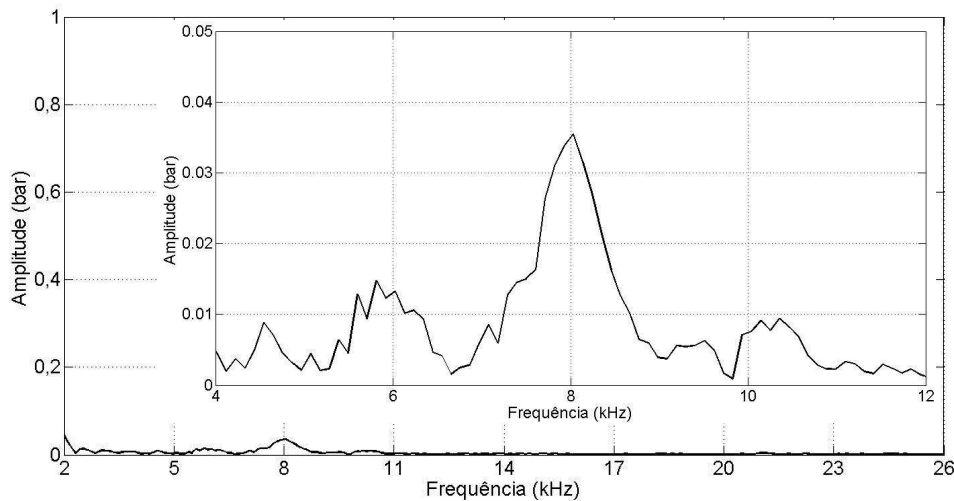


FIGURA 4.84 – Análise *FFT*: $\lambda = 1,0$ – *DI* Etanol – vela

Verifica-se três picos de amplitude: o primeiro ocorrendo em torno de 6 kHz, o segundo ocorrendo em torno de 8 kHz (de maior intensidade) e, por último, o terceiro ocorrendo em torno de 10,5 kHz.

A FIGURA 4.85 apresenta o comportamento dos referidos picos em função do ângulo do eixo do motor.

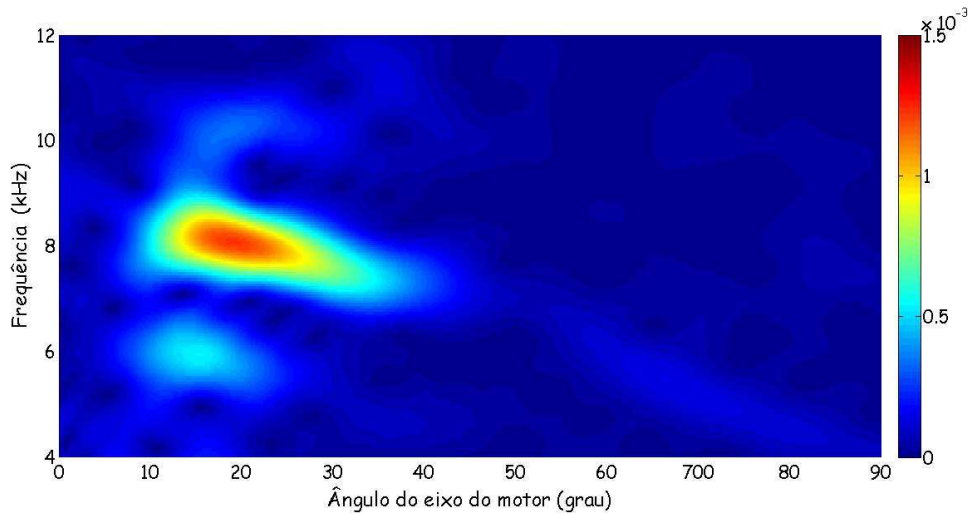


FIGURA 4.85 – Espectrograma: $\lambda = 1,0$ – *DI* Etanol – vela

O pico de maior intensidade ocorre em torno de 8 kHz e refere-se ao 1º modo radial tendo uma duração de 25º do ângulo do eixo do motor. O 1º modo circunferencial o qual ocorre em torno de 6 kHz possui baixa intensidade e não é significativo.

Comparando-se este resultado com aquele referente ao sensor de pressão pode-se verificar que a maior intensidade encontra-se no 1º modo circunferencial, passível de ser detectado somente com o sensor de pressão devido ao seu posicionamento deslocado do ponto central da câmara de combustão e que não coincidente com a linha modal do referido modo.

A FIGURA 4.86 apresenta os resultados para $\lambda = 1,3$ além do detalhamento dos picos relacionados à ocorrência da detonação.

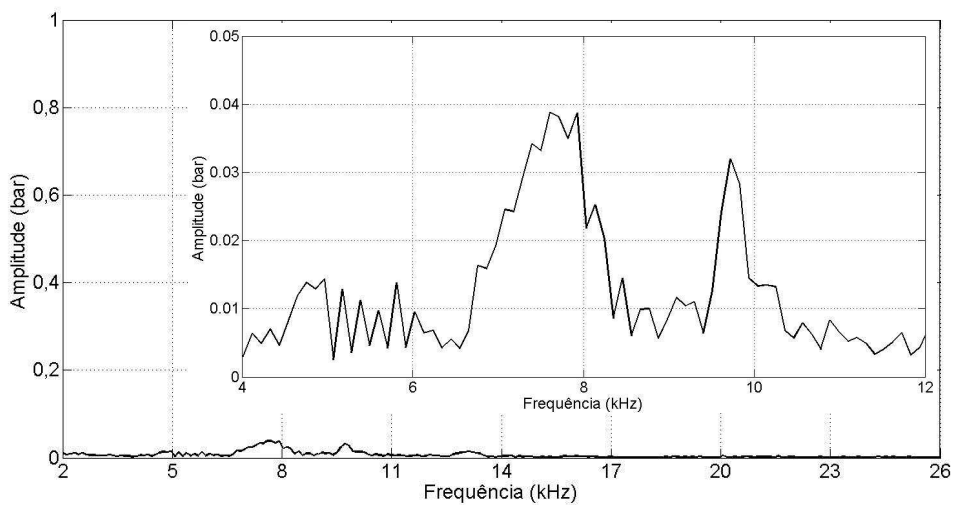


FIGURA 4.86 – Análise *FFT*: $\lambda = 1,3$ – *DI* Etanol – vela

Pode ser visualizado um pico de amplitude principal em torno de 7,5 kHz e outro em torno de 9,5 kHz. O andamento dos referidos picos com o ângulo do eixo do motor está mostrado na FIG. 4.87 para $\lambda = 1,3$.

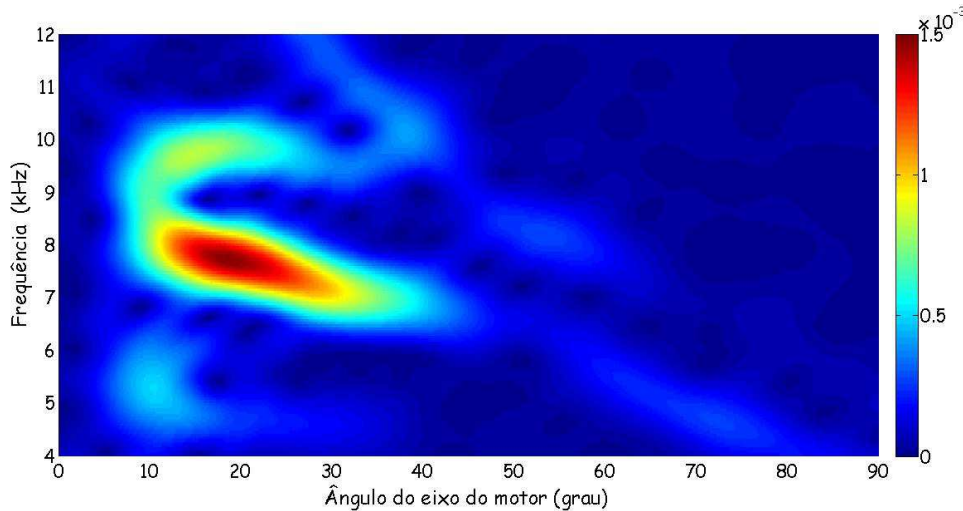


FIGURA 4 87 – Espectrograma: $\lambda = 1,3$ – *DI Etanol* - vela

O pico de maior intensidade ocorre em torno de 7,5 kHz e refere-se ao 1º modo radial tendo uma duração de 30º do ângulo do eixo do motor. O 1º modo circunferencial o qual ocorre abaixo de 6 kHz possui baixa intensidade e não é significativo. O 1º modo combinado apresenta intensidade discreta não tendo grande importância quando comparada ao 1º modo radial.

Novamente, pode-se comparativamente notar que o 1º modo circunferencial é o modo mais energético e aquele que pode ser melhor detectado, neste caso, utilizando-se o sensor de pressão.

A FIGURA 4.88 apresenta os resultados para $\lambda=1,5$ mostrando os principais picos de amplitude presentes na faixa de frequência de interesse (entre 4 e 12 kHz).

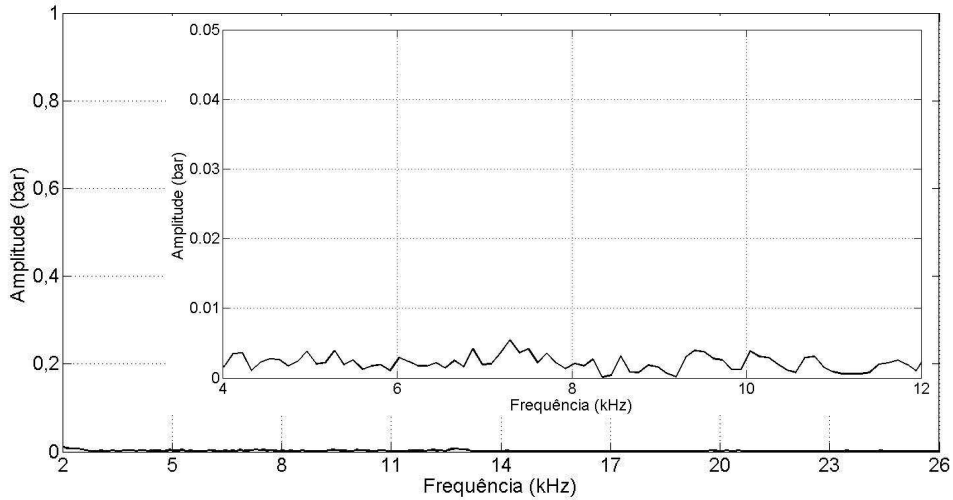


FIGURA 4.88 – Detalhe análise FFT: $\lambda = 1,5$ – DI Etanol – vela

Nesta configuração os picos de amplitude apresentam-se bastante discretos dificultando a sua identificação e confirmando uma situação onde a detonação não ocorreu com grande intensidade.

A FIGURA 4.89 apresenta o espectrograma para $\lambda = 1,5$.

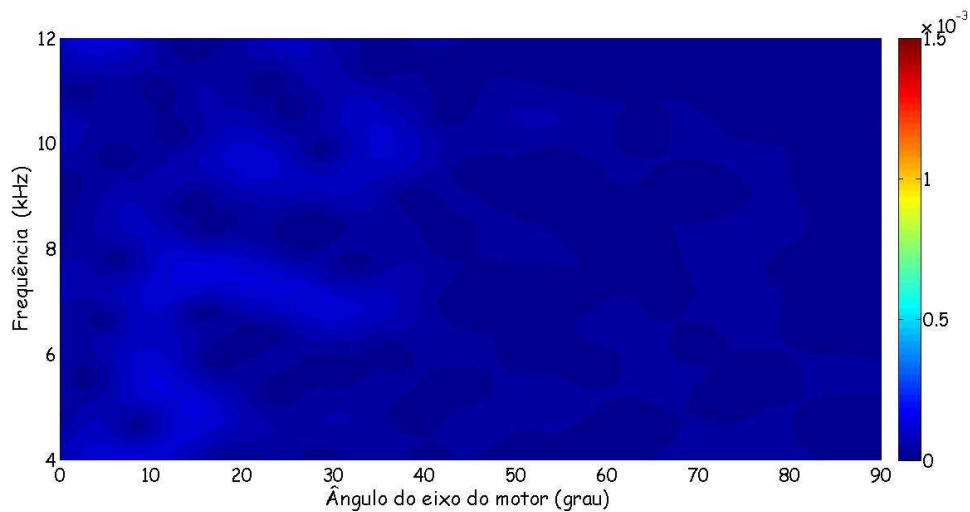


FIGURA 4.89 – Espectrograma: $\lambda = 1,5$ – DI Etanol – vela

O resultado acima confirma que a detonação foi bastante discreta não sendo detectada de maneira satisfatória pela vela instrumentada similarmente ao que aconteceu com o sensor de pressão cujo espectrograma é mostrado na FIG. 4.54.

Comparado ao sensor de pressão, pode-se verificar que a vela instrumentada não é capaz de detectar o principal modo acústico (1º modo circunferencial) em função do seu posicionamento central e, portanto, confirma que o sensor de pressão é o transdutor mais adequado à detecção do fenômeno da detonação.

4.5.2.2 Influência das diferentes estruturas de fluxo

Analogamente às outras configurações anteriormente discutidas, antes de se proceder às análises propriamente ditas, também foi realizada uma *FFT* de modo a entender o espectro de frequências presente no interior da câmara de combustão e detectado pela vela instrumentada. Para esta análise, foram utilizados respectivamente os seguintes experimentos: estrutura de fluxo *low swirl* (prova 23), estrutura de fluxo *medium swirl and tumble* (prova 16) e estrutura de fluxo *high swirl* (prova 2) conforme pode ser visto na TAB. 3.2.

A Figura 4.90 apresenta os resultados para a estrutura de fluxo *low swirl* já incluindo o detalhamento da faixa de frequência compreendida entre 4 e 12 kHz.

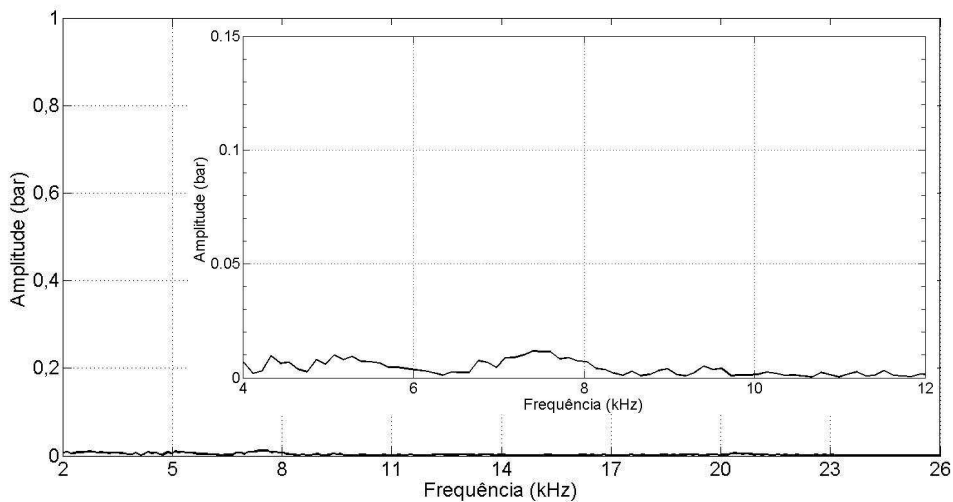


FIGURA 4.90 – Análise *FFT*: *low swirl* – *DI Etanol* – vela

A identificação dos picos é bastante dificultada pois as suas amplitudes são muito reduzidas similarmente aos resultados relativos à mesma condição com o sensor de pressão, conforme pode ser visualizado na FIG. 4.89. Ainda assim verifica-se picos discretos em torno de 5 kHz e 7,5 kHz.

A Figura 4.91 apresenta o espectrograma para a estrutura de fluxo *low swirl*.

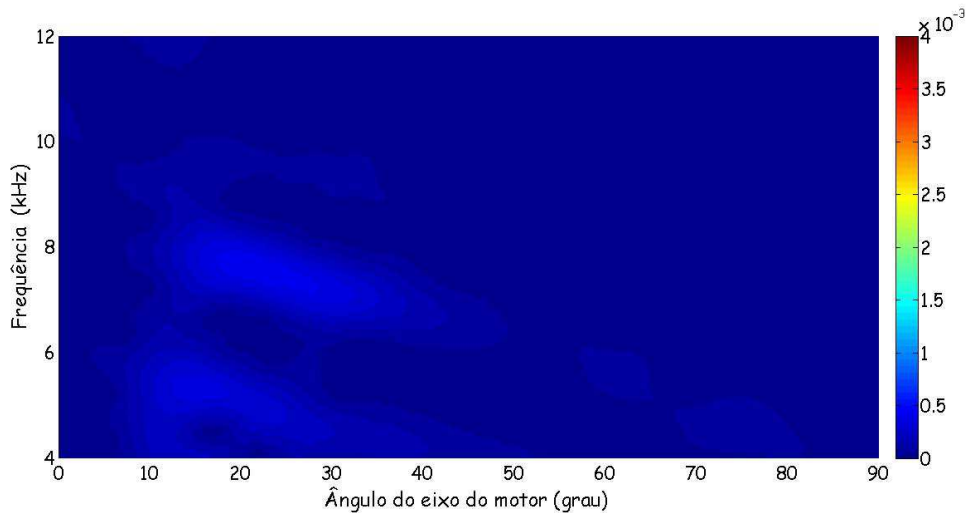


FIGURA 4.91 – Espectrograma: *low swirl* – DI Etanol – vela

Os dois picos de amplitude anteriormente citados são identificados porém de maneira discreta indicando que a detonação apresentou intensidade muito reduzida.

A Figura 4.92 apresenta os resultados para a estrutura de fluxo *medium swirl and tumble* detalhando a faixa de frequência entre 4 e 12 kHz.

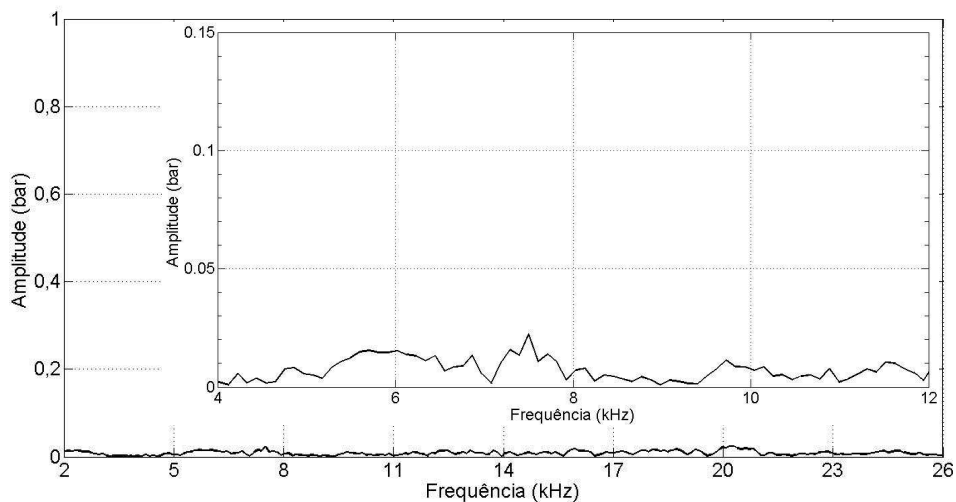


FIGURA 4.92 - Análise *FFT*: *medium swirl and tumble* - DI Etanol - vela

Identifica-se basicamente três diferentes picos de amplitude embora de intensidade bastante reduzida: o primeiro ligeiramente abaixo de 6 kHz, o segundo em torno de 7,5 kHz e o terceiro apresentando amplitudes abaixo e acima de 10 kHz.

A Figura 4.93 apresenta o espectrograma para a estrutura de fluxo *medium swirl and tumble*.

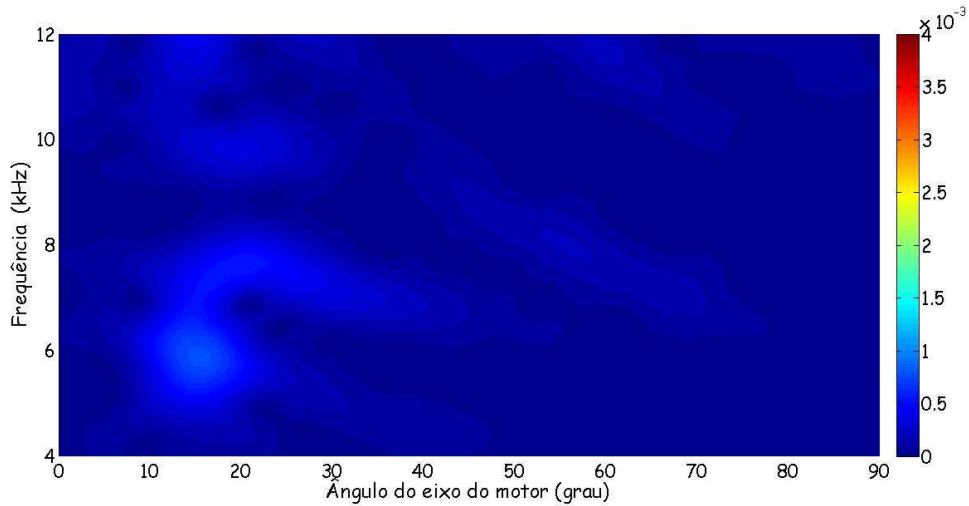


FIGURA 4.93 – Espectrograma: *medium swirl and tumble* – DI Etanol – vela

Também para esta configuração, os níveis de detonação foram bastante discretos analogamente à condição de estrutura de fluxo *low swirl*.

A Figura 4.94 apresenta os resultados para a estrutura de fluxo *high swirl* detalhando a faixa de frequência entre 4 e 12 kHz.

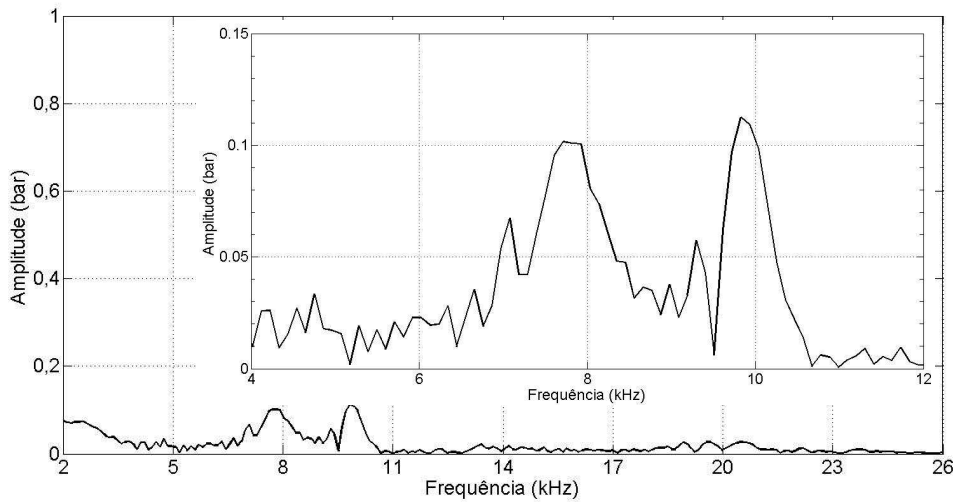


FIGURA 4.94 – Análise *FFT*: *high swirl* – DI Etanol – vela

Nota-se a presença de dois principais picos com amplitudes significativas: o primeiro em torno de 8 kHz e o segundo em torno de 10 kHz.

A Figura 4.95 apresenta o espectrograma para a estrutura de fluxo *high swirl*.

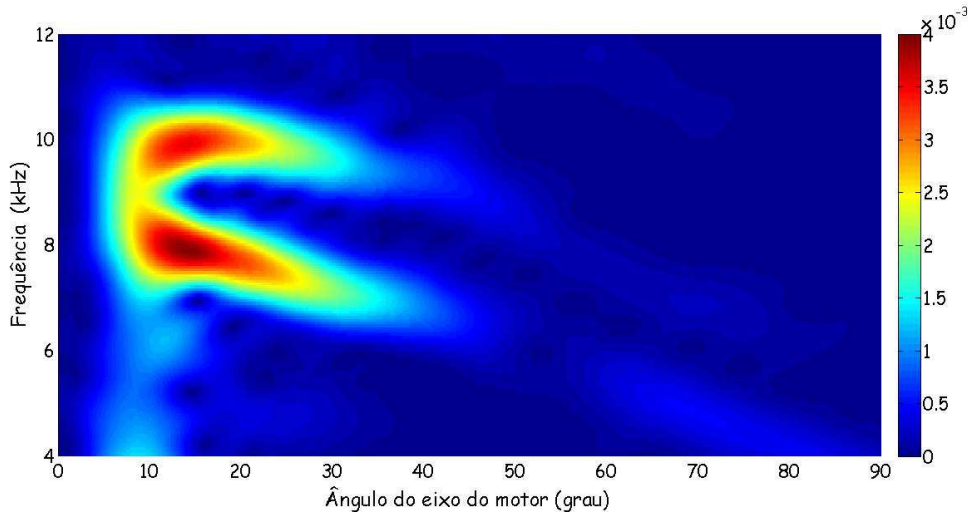


FIGURA 4.95 – Espectrograma: *high swirl* – *DI* Etanol – vela

Os picos anteriormente citados referem-se ao 1º modo radial (estendendo-se de 5 a 35º do ângulo do eixo do motor) e ao 1º modo combinado (estendendo-se de 5 a 30º). O 1º modo circunferencial não é detectado pela vela instrumentada e isto é devido ao seu posicionamento na câmara de combustão. Comparativamente às condições anteriores de estrutura de fluxo a diferença é bastante acentuada indicando que a turbulência presente na câmara de combustão influenciou a ocorrência da detonação. Entretanto, em relação aos valores de frequência pode-se verificar que não houve diferenças significativas entre as diversas configurações de estruturas de fluxo.

4.5.2.3 Influência dos valores da pressão de injeção

Uma vez avaliada a influência dos valores de lambda e a influência das diversas estruturas de fluxo no espectro de frequências dos modos acústicos presentes na câmara de combustão devido à ocorrência da detonação, foi realizada uma avaliação da influência do valor da pressão de injeção de combustível (100 e 140 bar) sendo mantido o valor de lambda igual a 1,3 e a estrutura de fluxo *low swirl*. A FIG. 4.96 apresenta a análise FFT do sinal de pressão oriunda da vela instrumentada detalhando também a faixa de frequência compreendida entre 4 e 12 kHz. As provas referentes a estas condições são: pressão de 100 bar (prova 23) e pressão de 140 bar (prova 25) conforme elencado na TAB. 3.2.

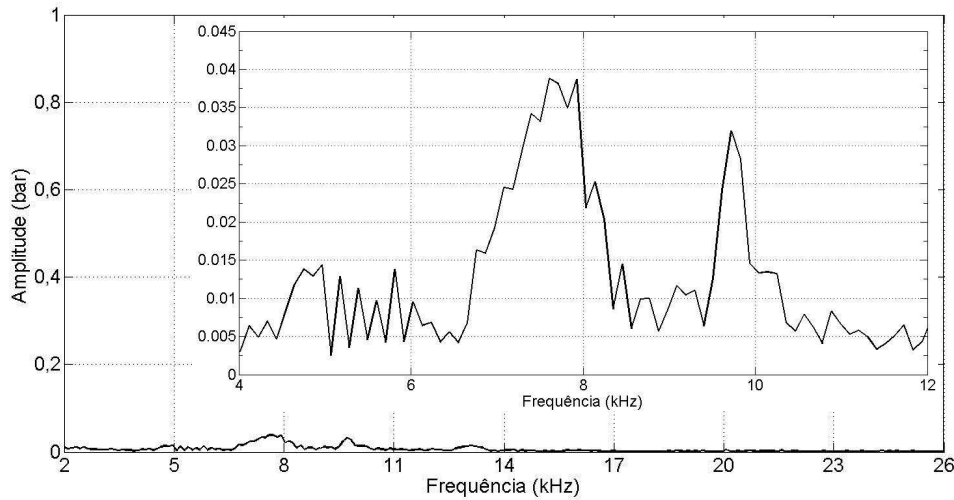


FIGURA 4.96 – Análise *FFT*: pressão injeção 100 bar – *DI* Etanol – vela

Identifica-se um pico em torno de 7,5 kHz, outro em torno de 9,5 kHz e um outro, de menor intensidade, em torno de 5 kHz.

A FIGURA 4.97 apresenta o espectrograma para esta pressão de injeção.

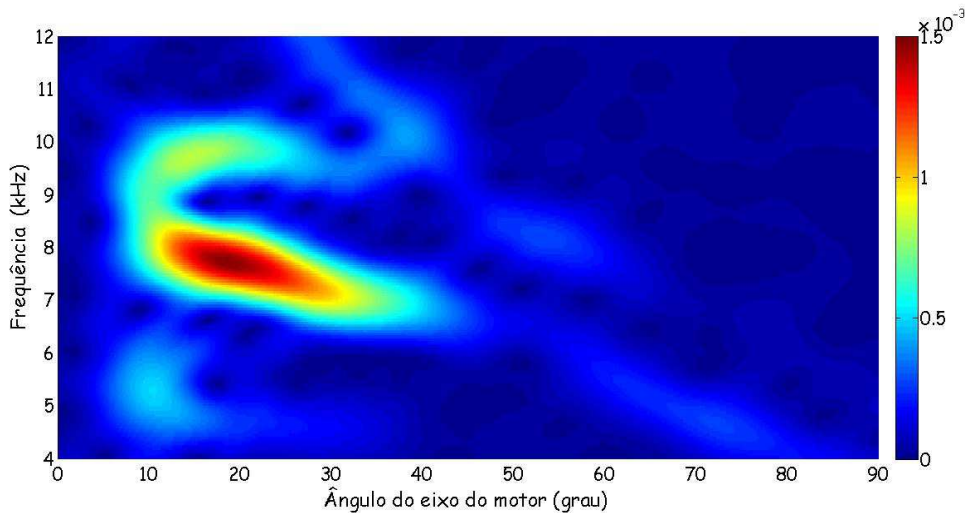


FIGURA 4.97 – Espectrograma: pressão injeção 100 bar – *DI* Etanol – vela

No intuito de melhor comparar os resultados a escala foi diminuída em relação às anteriores. Pode-se verificar a presença do 1º modo radial ligeiramente abaixo de 8 kHz (estendendo-se de 10 a 40º do ângulo do eixo do motor) e do 1º modo combinado ligeiramente abaixo de 10 kHz de menor intensidade.

A FIGURA 4.98 apresenta o espectrograma para o valor de pressão de injeção de 140 bar e a FIG. 4.99 apresenta o espectrograma para a mesma condição.

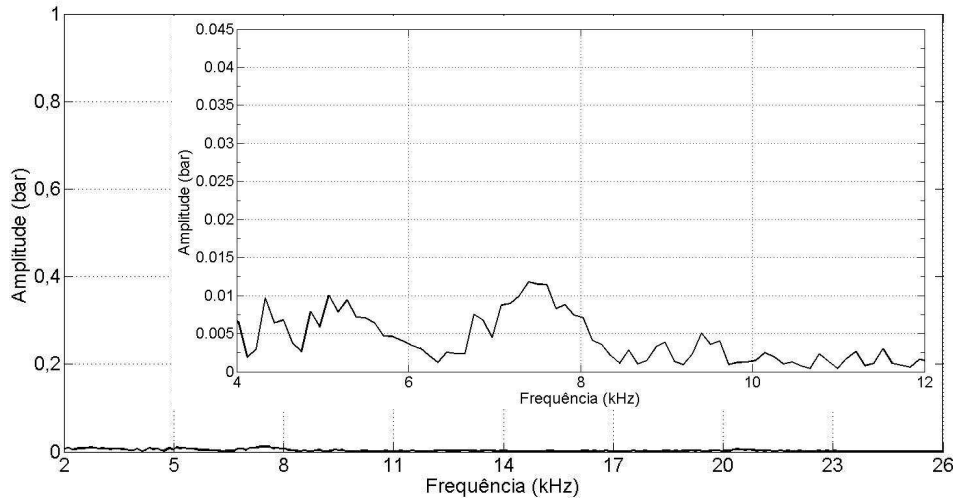


FIGURA 4.98 – Análise *FFT*: pressão injeção 140 bar – *DI* Etanol – vela

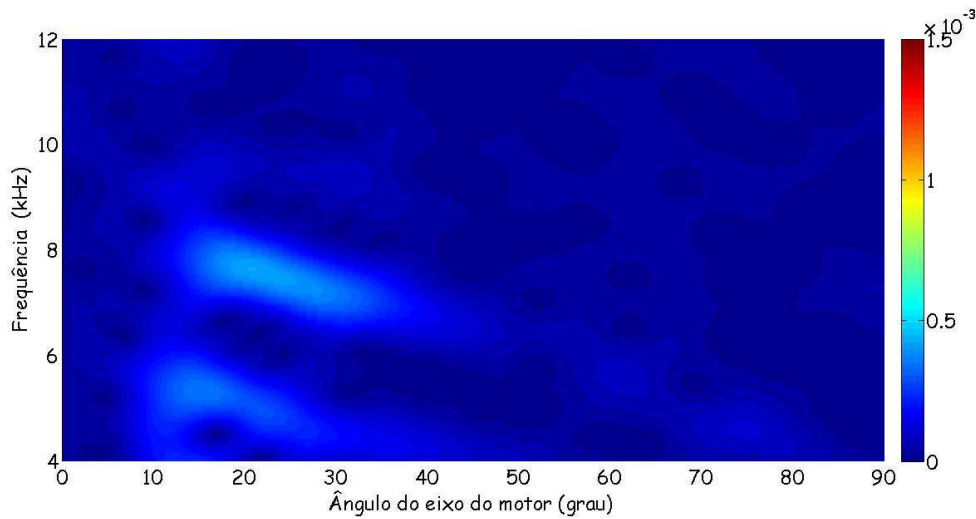


FIGURA 4.99 – Espectrograma: pressão injeção 140 bar – *DI* Etanol – vela

A intensidade da detonação para a pressão de 140 bar é muito inferior ao valor de 100 bar e pode ser visualizada pelas mais baixas intensidades dos modos acústicos detectados. Considerando-se que as condições de funcionamento do motor são praticamente idênticas com exceção da pressão de injeção, pode-se hipotizar que a maior pressão criou condições mais restritivas à ocorrência do referido fenômeno possivelmente pela melhor atomização do combustível.

4.5.3 Configuração de injeção DI utilizando CNG

Por motivos de indisponibilidade da vela instrumentada por ocasião da realização destes testes não foi possível utilizar a mesma nesta configuração.

4.5.4 Comparativo dos resultados da vela instrumentada e da simulação

Com o objetivo de verificar a correlação entre os resultados experimentais provenientes da vela instrumentada e aqueles provenientes da simulação computacional, tais resultados foram comparados no espectrograma mostrado na FIG. 4.100 para a configuração DI Etanol, valor de lambda igual a 1,3 e estrutura de fluxo *high swirl*.

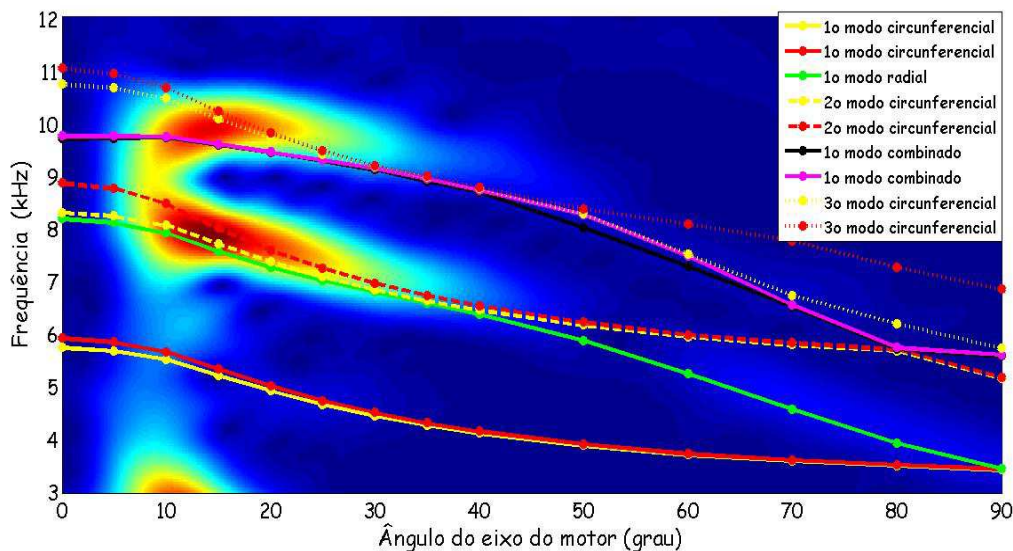


Figura 4.100 Comparativo de resultados: vela x simulação

Da FIG. 4.100, verifica-se boa correlação entre os resultados comparados. O 1º modo circunferencial não foi detectado pela vela instrumentada devido ao seu posicionamento coincidir com a linha nodal. Em torno de 8 kHz, verifica-se a contribuição das frequências emparelhadas do 2º modo circunferencial e do 1º modo radial com duração entre 5 e 35º do ângulo do eixo do motor. Por último, verifica-se em torno de 10 kHz a contribuição conjunta das frequências emparelhadas do 3º modo circunferencial e do 1º modo combinado com significativas intensidades entre 5 e 30º.

Resultados similares foram obtidos para as outras configurações avaliadas e foram proposadamente omitidas desta publicação com o objetivo de não torná-la excessivamente longa.

4.6 Determinação experimental utilizando acelerômetro (Etapa 5)

Conforme já citado anteriormente para todos os outros experimentos realizados com o sensor de pressão e a vela instrumentada, o mesmo tipo de procedimento de análise foi também adotado para os experimentos envolvendo este sensor.

Foram realizadas análises nas três configurações de sistema de injeção de combustível para diferentes valores de lambda e diversos tipos de estruturas de fluxo.

4.6.1 Configuração de injeção *PFI* utilizando *CNG*

4.6.1.1 Influência dos valores de lambda

Para tal análise utilizou-se os seguintes experimentos: $\lambda=1,0$ (prova 2), $\lambda=1,3$ (prova 4) e $\lambda=1,5$ (prova 6) conforme pode ser visto na TAB. 3.1.

A FIGURA 4.101 apresenta os resultados para $\lambda = 1,0$.

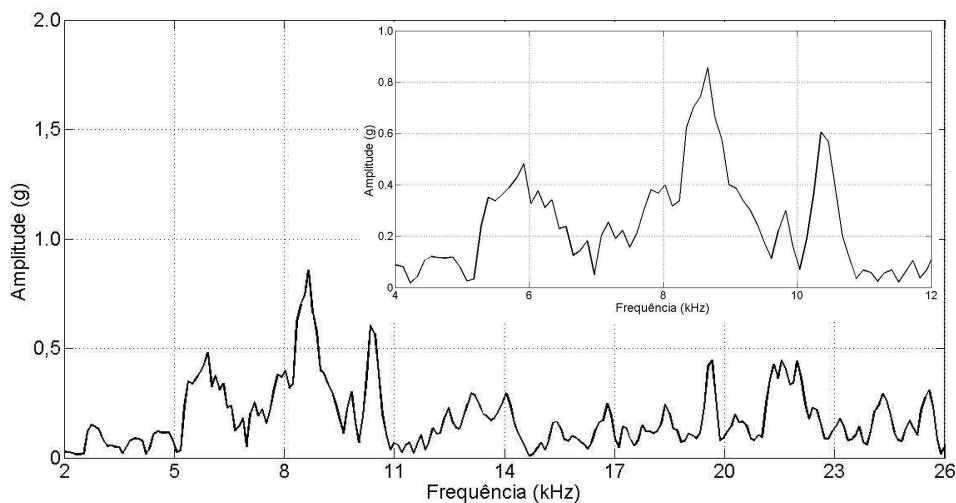


FIGURA 4.101 – Análise *FFT*: $\lambda = 1,0$ – *PFI CNG* – acelerômetro

Visualiza-se três principais picos de amplitude na faixa de frequência de interesse para a detecção da detonação. Verifica-se também alguns picos na faixa entre 20 e 26 kHz que podem estar relacionadas às ressonâncias de alguns componentes do motor ou à ressonância de montagem do transdutor (no caso, em torno de 25 kHz).

Os referidos picos estão localizados em torno de 6 kHz, 8,5 kHz e 10,5 kHz e seus respectivos comportamentos em relação ao ângulo do eixo do motor podem ser visualizados por meio da FIG. 4.102.

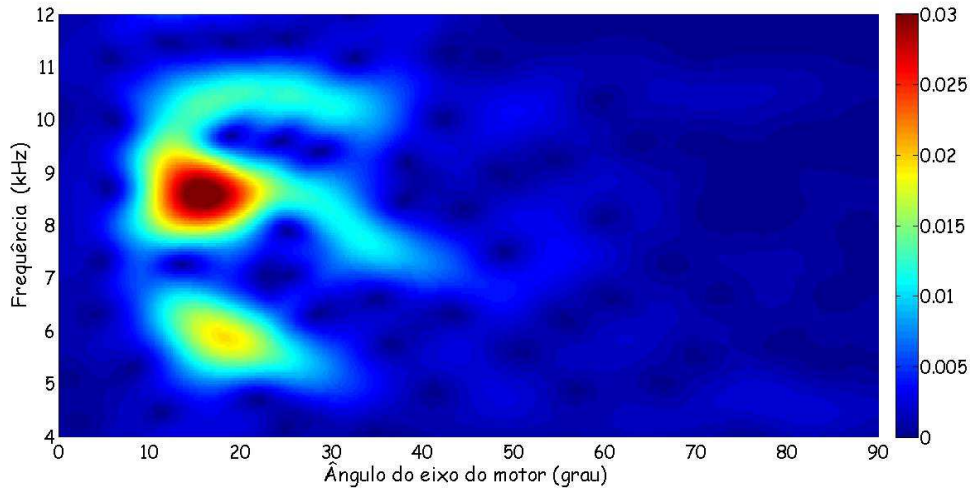


FIGURA 4.102 – Espectrograma: $\lambda = 1,0$ – PFI CNG - acelerômetro

Verifica-se que o principal componente detectado (maior conteúdo energético) está diretamente relacionado à ocorrência do 1º modo radial e, também, do 2º modo circunferencial no interior da câmara de combustão. O 1º modo circunferencial e o 1º modo combinado foram também detectados porém com menor intensidade.

A Figura 4.103 apresenta os resultados da análise *FFT* para $\lambda = 1,3$.

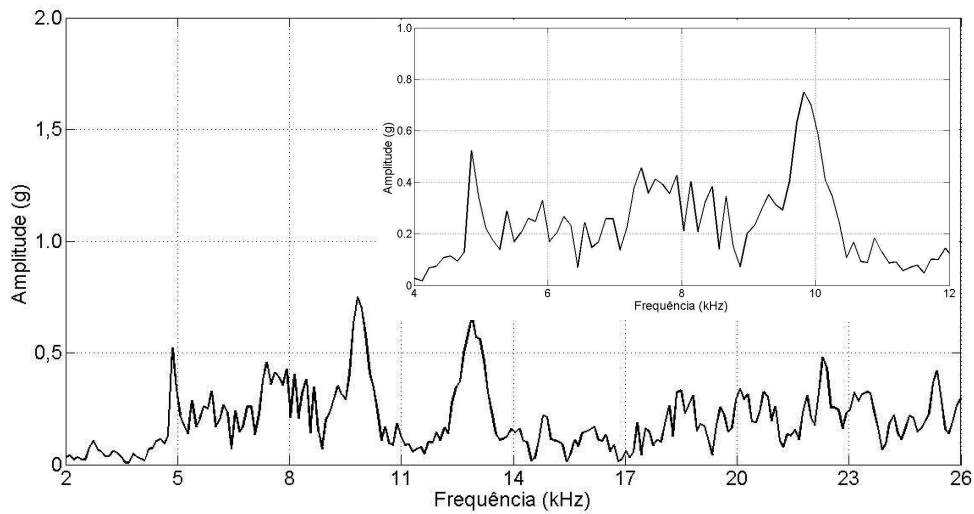


FIGURA 4.103 – Análise *FFT*: $\lambda = 1,3$ – PFI CNG – acelerômetro

Também neste caso, pode-se identificar pelo menos três picos de amplitude: em torno de 5 kHz (1º modo circunferencial), 8 kHz (combinação do 1º modo radial e do 2º modo circunferencial) e 10 kHz (1º modo combinado).

A FIG. 4.104 mostra o andamento dos mesmos em relação ao ângulo do eixo do motor.

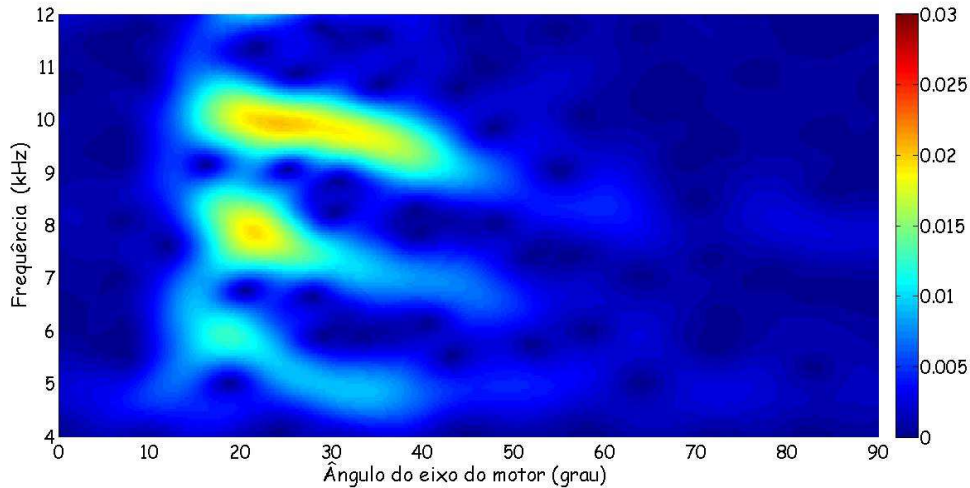


FIGURA 4.104 – Espectrograma: $\lambda = 1,3$ – PFI CNG – acelerômetro

Verifica-se, conforme esperado, um atraso no início de ocorrência destes picos de aproximadamente 5° do ângulo do eixo do motor. Ao contrário dos picos detectados pelo sensor de pressão e pela vela instrumentada, os picos relacionados ao 1º modo radial, 2º modo circunferencial e 2º modo combinado são detectados de maneira satisfatória enquanto o pico relacionado ao 1º modo circunferencial é detectado de modo discreto. Isto está diretamente relacionado à função de transferência do bloco do motor para cada uma das faixas de frequências.

A Figura 4.105 apresenta os resultados da análise *FFT* para $\lambda = 1,5$.

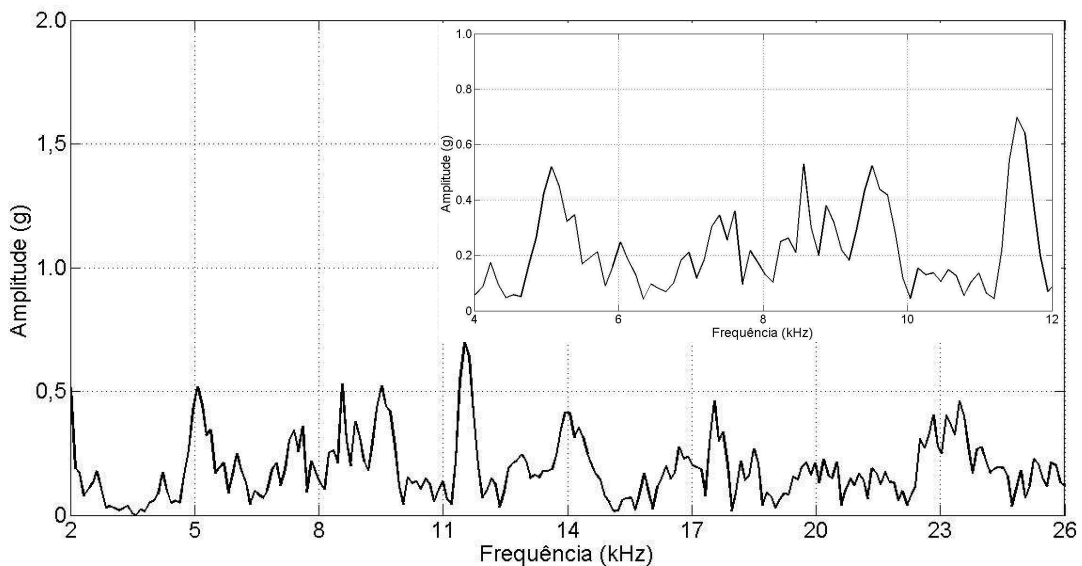


FIGURA 4.105 – Análise *FFT*: $\lambda = 1,5$ – PFI CNG – acelerômetro

Visualiza-se picos de amplitude em torno de 5 kHz, 7,5 kHz, 8,5 kHz, 9,5 kHz e 11,5 kHz.

Novamente, o comportamento dos mesmos em relação ao ângulo do eixo do motor pode ser visto na FIG. 4.106.

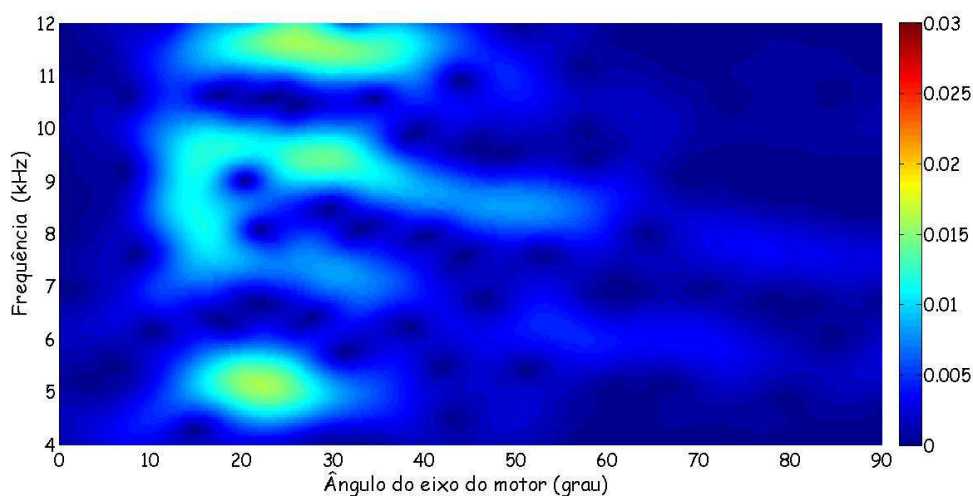


FIGURA 4.106 – Espectrograma: $\lambda = 1,5$ – PFI CNG - acelerômetro

Os picos em torno de 5 e 11,5 kHz aparentemente não têm relação com a ocorrência da detonação pois não apresentam o comportamento típico da mesma (eles não reduzem a frequência em função do ângulo do eixo do motor). O único pico satisfatoriamente detectado é o associado à combinação do 1º modo radial e do 2º modo circunferencial (9,5 kHz).

Embora se possa perceber uma redução nos valores de frequência para o 1º modo radial e o 2º modo circunferencial em função do aumento do valor de lambda, a comparação entre os resultados para os diversos valores de lambda é dificultada pois a detecção dos picos é bastante diferenciada para cada valor específico de lambda.

4.6.2 Configuração de injeção DI utilizando Etanol

4.6.2.1 Influência dos valores de lambda

Para esta análise, a estrutura de fluxo foi mantida na configuração *low swirl* e foram utilizados respectivamente os seguintes experimentos: $\lambda = 1,0$ (prova 22), $\lambda = 1,3$ (prova 23) e $\lambda = 1,5$ (prova 24) conforme pode ser visto na TAB. 3.2.

A FIGURA 4.107 apresenta os resultados da análise *FFT* para $\lambda = 1,0$.

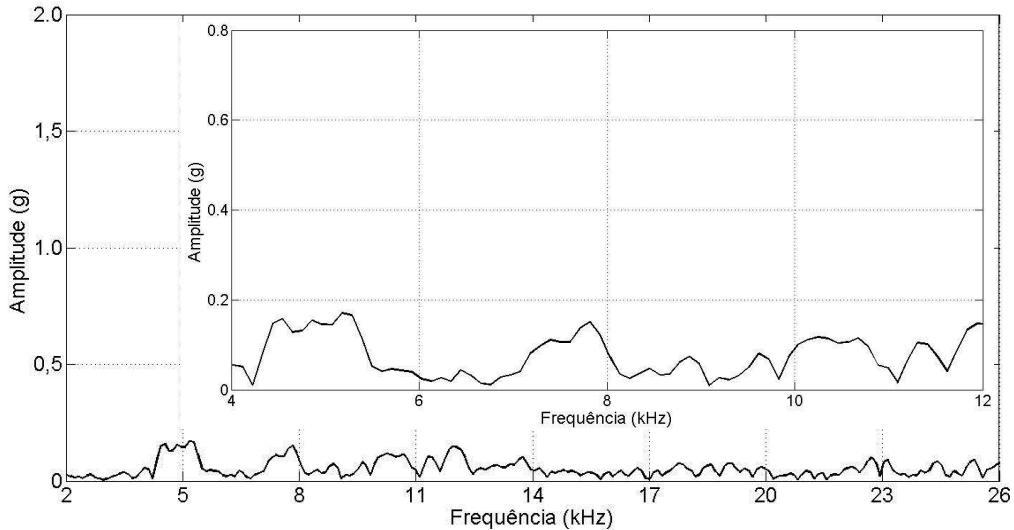


FIGURA 4.107 – Análise *FFT*: $\lambda = 1,0$ - *DI* Etanol – acelerômetro

Identifica-se picos em torno de 5 kHz, ligeiramente abaixo de 8 kHz e 10,5 kHz os quais, porém, apresentam reduzida intensidade.

Os picos de amplitude não são bem definidos ocorrendo em largas faixas de frequências. Para melhor entender o andamento dos referidos picos de amplitude em função do ângulo do eixo do motor a FIG. 4.108 mostra o seu espectrograma.

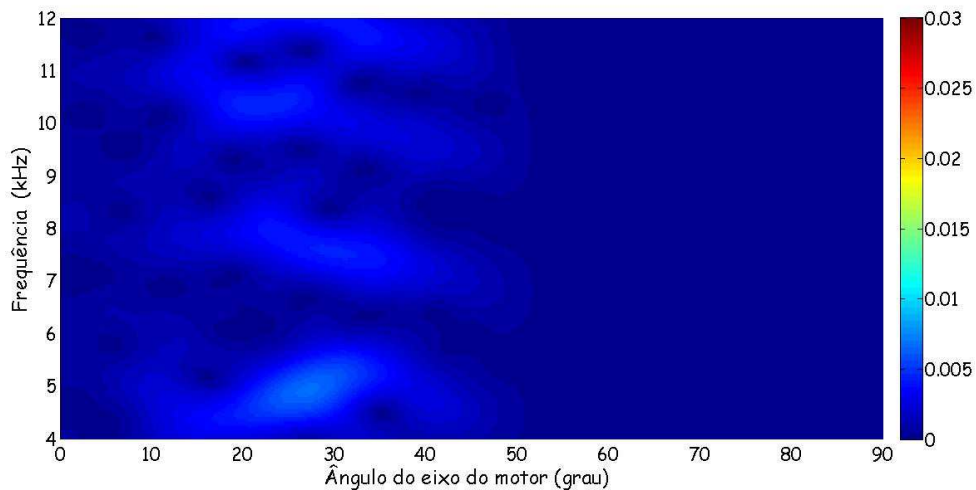


FIGURA 4.108 – Espectrograma: $\lambda = 1,0$ - *DI* Etanol – acelerômetro

Os respectivos sinais não são mais detectados a partir de 50° do ângulo do eixo do motor indicando a presença de significativo amortecimento no bloco do motor. Os modos acústicos são detectados de maneira bem discreta ao contrário da detecção satisfatória obtida a partir do sensor de pressão (1° e 2° modos circunferenciais) e a partir da vela instrumentada (1° modo radial).

A Figura 4.109 apresenta os resultados da análise *FFT* para $\lambda = 1,3$.

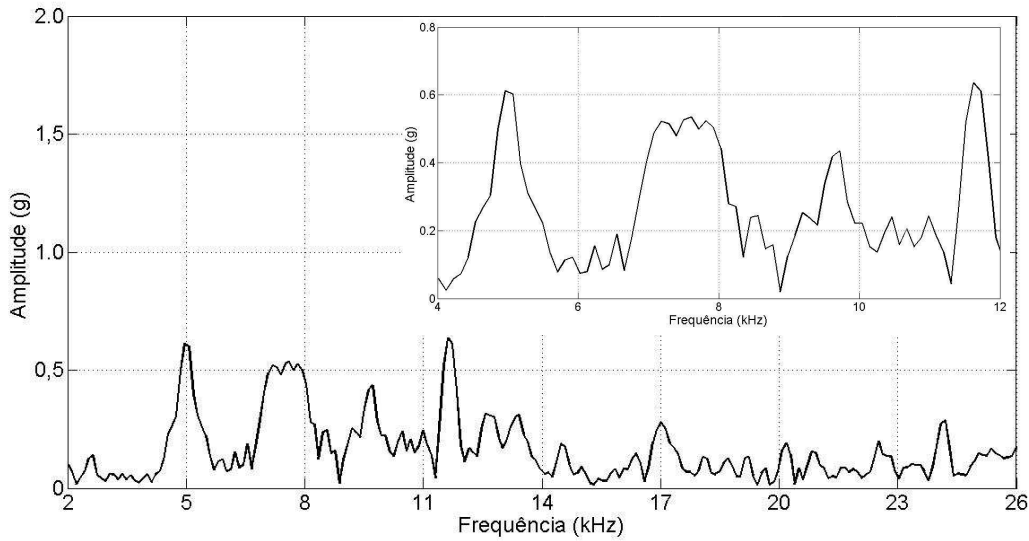


FIGURA 4.109 – Análise *FFT*: $\lambda = 1,3$ - *DI* Etanol – acelerômetro

Identifica-se picos em torno de 5 kHz, 7,5 kHz, 9,5 kHz e 11,5 kHz na faixa de frequência de interesse. Os picos de amplitude mostram características diversas: enquanto alguns são bem definidos verifica-se um pico que apresenta uma ampla faixa de frequência. O comportamento dos mesmos em função do ângulo do eixo do motor é apresentado na FIG. 4.110.

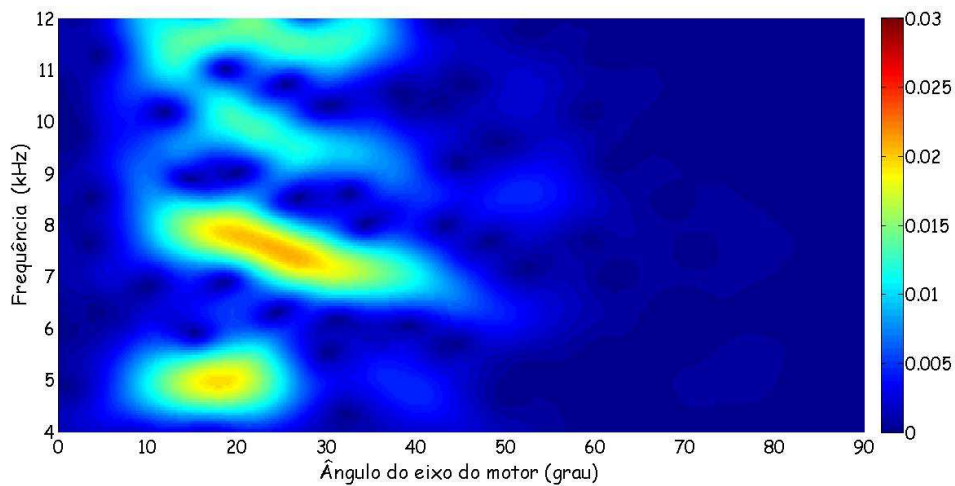


FIGURA 4.110 – Espectrograma: $\lambda = 1,3$ - *DI* Etanol – acelerômetro

Identifica-se que o pico em torno de 11,5 kHz não tem correlação com a ocorrência da detonação (frequência é fixa em relação ao ângulo do eixo do motor). Já o pico em torno de 7,5 kHz apresenta o padrão típico de ocorrência da detonação tendo

vido detectado de maneira satisfatória analogamente à detecção do mesmo pico obtida a partir da vela instrumentada (1º modo radial). O pico em torno de 5 kHz apresenta correlação com o pico detectado a partir do sensor de pressão (1º modo circunferencial). Por último, o pico em torno de 10 kHz foi detectado de maneira discreta (analogamente às detecções obtidas a partir do sensor de pressão e da vela).

A Figura 4.111 apresenta os resultados da análise *FFT* para $\lambda = 1,5$.

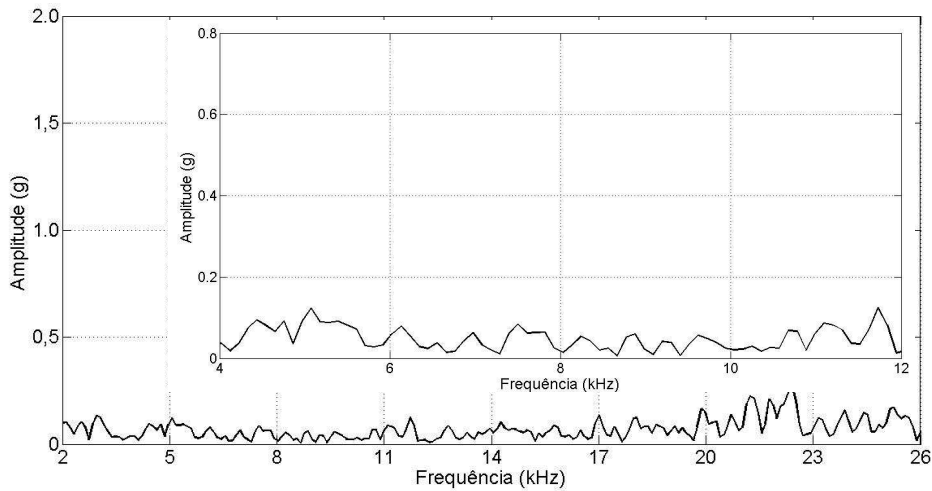


FIGURA 4.111 – Análise *FFT*: $\lambda = 1,5$ - *DI* Etanol – acelerômetro

Verifica-se que na faixa de frequência de interesse para a detecção da detonação os picos de amplitude são bem discretos dificultando a sua identificação. A faixa de frequência que se destaca é aquela compreendida entre 20 e 23 kHz possivelmente relacionada à ocorrência da ressonância de montagem do acelerômetro.

A FIG. 4.112 mostra o espectrograma da referida configuração.

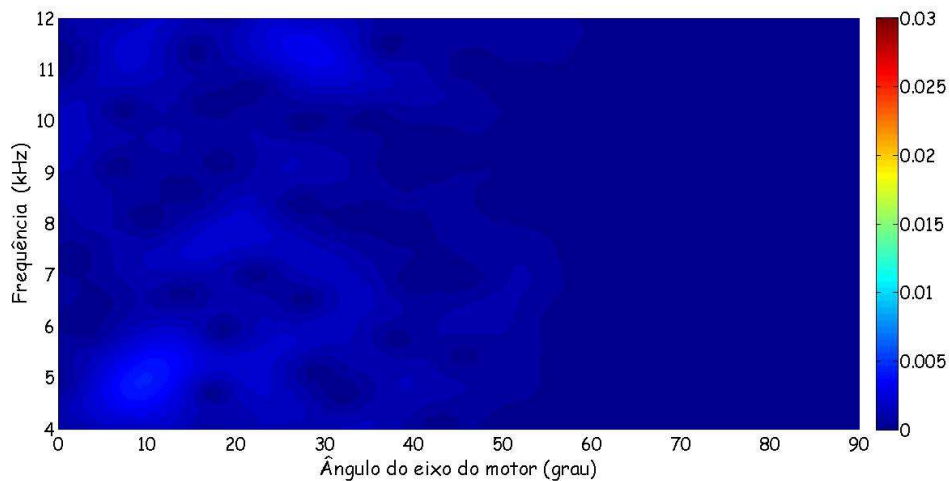


FIGURA 4.112 – Espectrograma: $\lambda = 1,5$ - *DI* Etanol – acelerômetro

O espectrograma mostra o exposto anteriormente: a dificuldade de se identificar os picos relacionados a algum modo acústico excitado pela ocorrência da detonação. A mesma situação foi identificada para os espectrogramas obtidos a partir do sensor de pressão (Figura 5.54) e da vela instrumentada (Figura 5.89).

4.6.2.2 Influência das diferentes estruturas de fluxo

Para esta análise foram utilizados respectivamente os seguintes experimentos: estrutura de fluxo *low swirl* (prova 23), estrutura de fluxo *medium swirl and tumble* (prova 16) e estrutura de fluxo *high swirl* (prova 2) conforme TAB. 3.2.

A FIGURA 4.113 apresenta os resultados da análise *FFT* para a estrutura de fluxo *low swirl*.

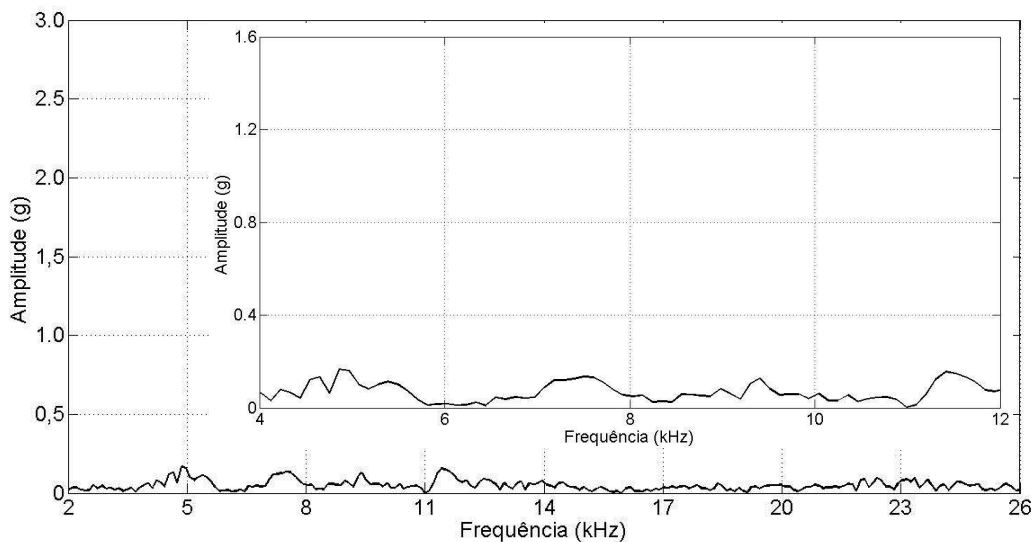


FIGURA 4.113 – Análise *FFT*: *low swirl* - *DI Etanol* – acelerômetro

Identifica-se picos em torno de 5 kHz, 7,5 kHz, 9,5 kHz e 11,5 kHz bastante discretos. O andamento dos mesmos em relação ao ângulo do eixo do motor pode ser visto na FIG. 4.114.

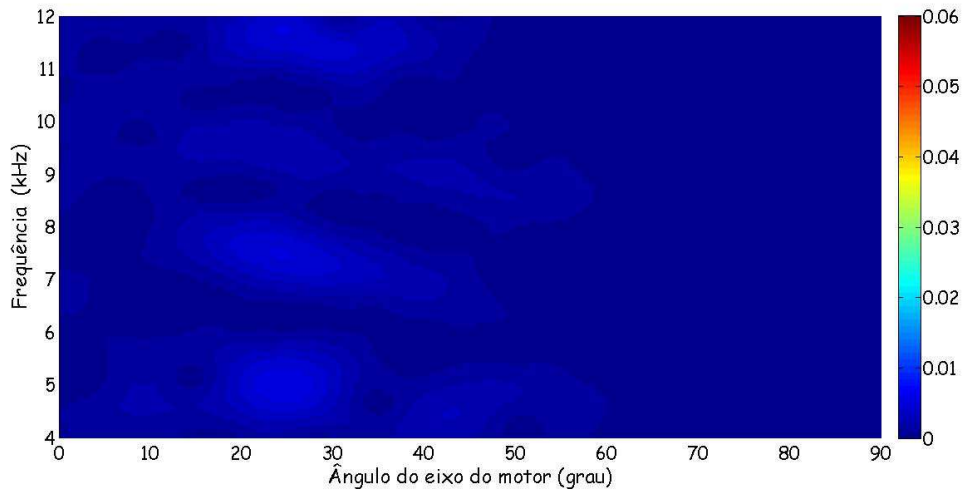


FIGURA 4.114 – Espectrograma: *low swirl* - *DI* Etanol - acelerômetro

Todos os picos mostram-se bastante discretos quanto à detecção da detonação pelo acelerômetro. Verifica-se que os picos em torno de 7,5 e 9,5 kHz apresentam o comportamento típico da detonação enquanto os outros não apresentam tão claramente tal padrão e podem não ter correlação com tal fenômeno.

A FIGURA 4.115 mostra a análise *FFT* para a estrutura de fluxo *medium swirl and tumble*.

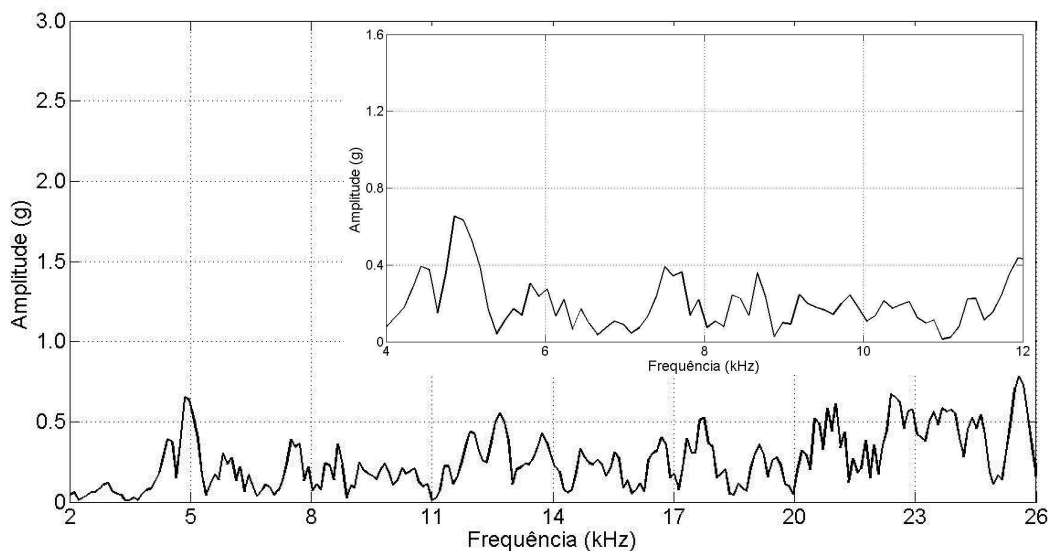


FIGURA 4.115 - Análise *FFT*: *medium swirl and tumble* - *DI* Etanol - acelerômetro

Identifica-se um pico principal em torno de 5 kHz e outros de menor importância em torno de 7,5 kHz e 12 kHz. Também visualiza-se um pico na faixa

compreendida entre 20 e 26 kHz que, conforme já citado anteriormente, pode estar relacionada a ressonância de componentes do motor e à montagem do acelerômetro.

Para verificar a correlação dos picos acima citados com o fenômeno da detonação, foi realizada uma análise *STFT* cujo resultado pode ser visto na FIG. 4.116.

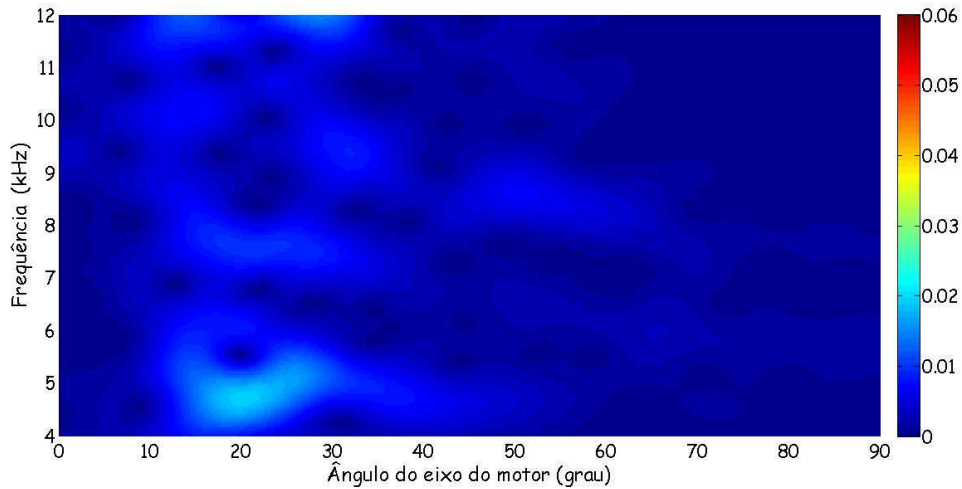


FIGURA 4.116 - Espectrograma: *medium swirl and tumble* - *DI* Etanol - acelerômetro

A identificação do andamento dos picos em função do ângulo do eixo do motor é bastante dificultada pelas suas intensidades reduzidas. Pode-se inferir uma correlação do pico em torno de 7,5 kHz com a ocorrência do 1º modo radial no interior da câmara de combustão. Os outros picos aparentemente não possuem uma correlação direta com a detonação.

A FIGURA 4.117 mostra a análise *FFT* para a estrutura de fluxo *high swirl*.

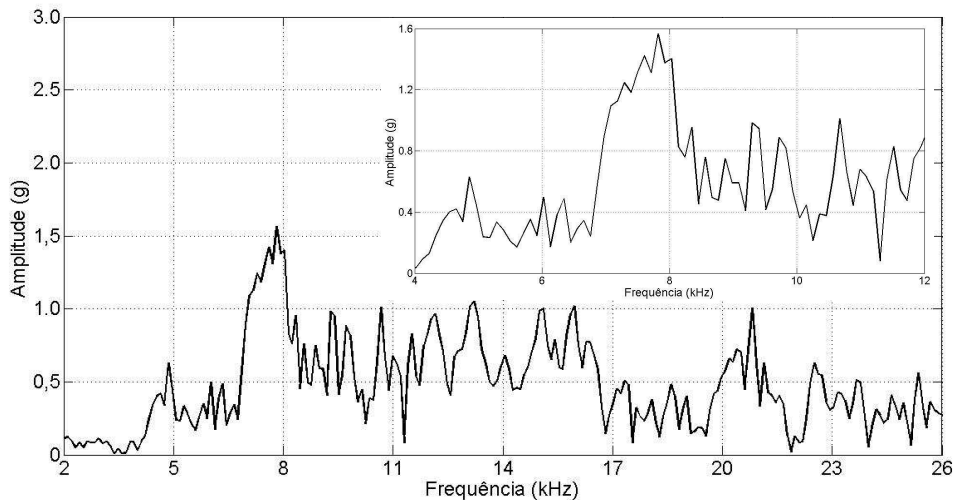


FIGURA 4.117 - Análise *FFT*: *high swirl* - *DI* Etanol – acelerômetro

Pode-se ver a predominância do pico em torno de 8 kHz além de outros picos em frequências mais altas. A FIG. 4.118 mostra o seu espectrograma.

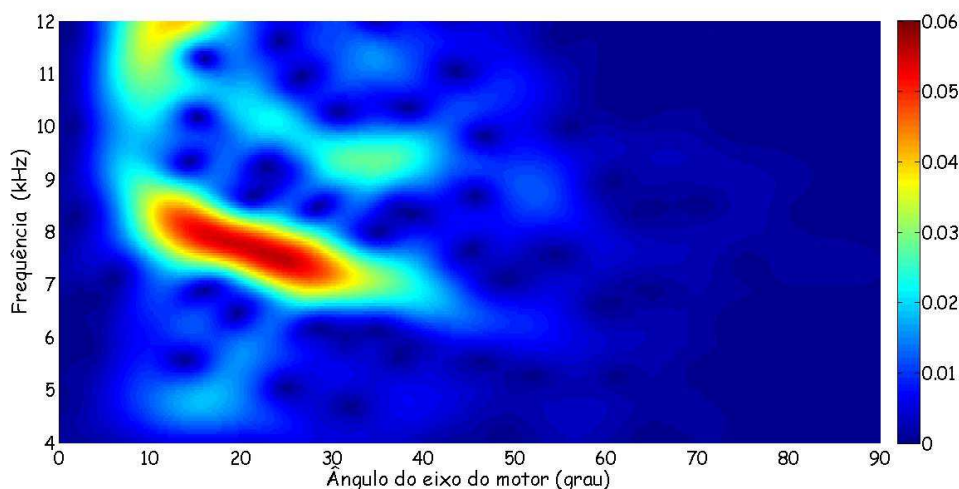


FIGURA 4.118 - Espectrograma: *high swirl* - DI Etanol – acelerômetro

Identifica-se que tal pico está diretamente relacionado à ocorrência da detonação no interior da câmara de combustão (contribuição do 1º modo radial e 2º modo circunferencial) enquanto os outros são de menor importância.

Conforme já anteriormente citado, na estrutura *high swirl* os modos acústicos foram claramente detectados enquanto nas outras estruturas a excitação dos referidos modos foi mais discreta. Uma possível explicação para tal constatação pode ser o fato de que, com elevada turbulência na câmara de combustão, aumenta a probabilidade de ocorrência de pontos de autoignição.

4.6.2.3 Influência dos valores da pressão de injeção

Uma vez verificada a influência dos valores de lambda e da estrutura de fluxo no conteúdo espectral de frequências detectado pelo acelerômetro, partiu-se para a análise da influência da pressão de injeção de combustível. O valor de lambda foi mantido igual a 1,3 e a estrutura de fluxo *low swirl*. A FIG. 4.119 apresenta a análise FFT do sinal proveniente do acelerômetro na faixa de frequência compreendida entre 4 e 12 kHz. As provas referentes a estas condições foram: pressão de 100 bar (prova 23) e pressão de 140 bar (prova 25) conforme elencado na TAB. 3.2.

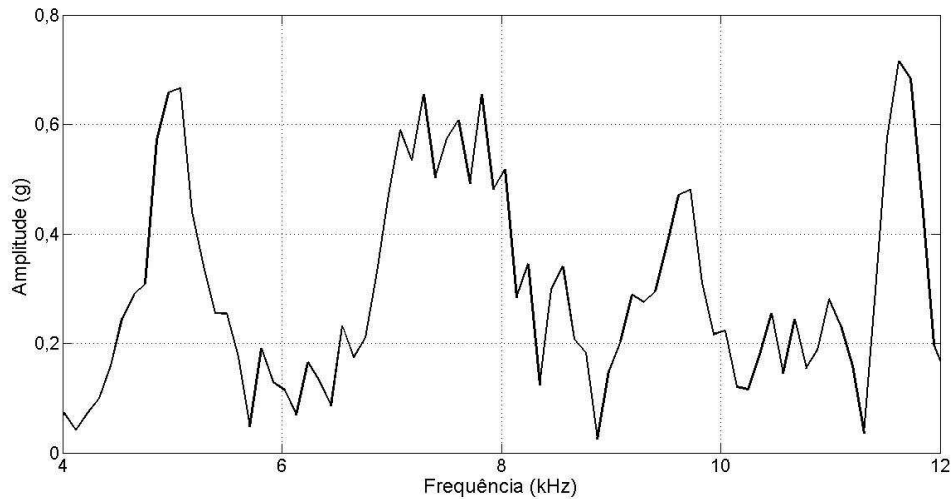


FIGURA 4.119 - Detalhe *FFT*: pressão injeção 100 bar - *DI* Etanol - acelerômetro

Os picos em torno de 5 kHz, 7,5 kHz, 9,5 kHz e 11,5 kHz são claramente identificáveis. No intuito de se verificar a correlação destes picos com a ocorrência da detonação, a FIG. 4.120 apresenta o espectrograma para esta configuração.

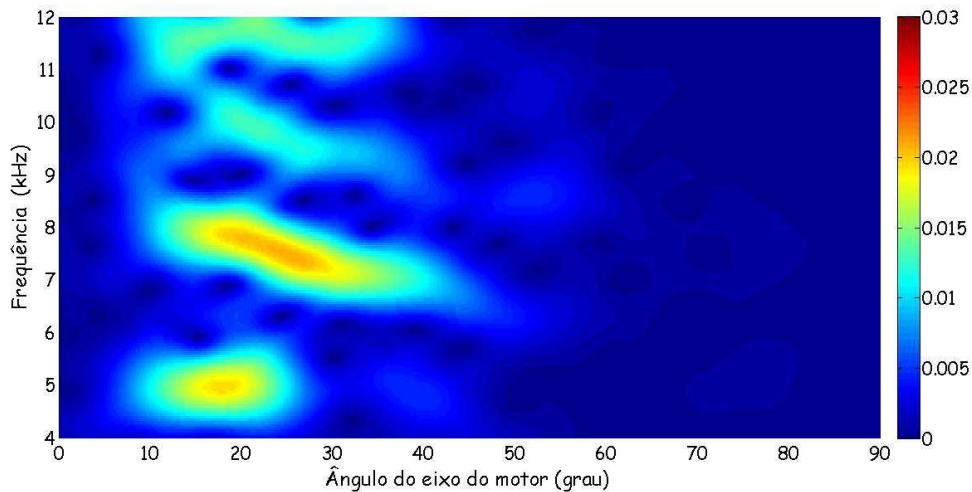


FIGURA 4.120 - Espectrograma: pressão injeção 100 bar - *DI* Etanol - acelerômetro

Conforme já citado anteriormente, identifica-se que o pico em torno de 11,5 kHz não tem correlação com a ocorrência da detonação (frequência é fixa em relação ao ângulo do eixo do motor). Já o pico em torno de 7,5 kHz apresenta o padrão típico de ocorrência da detonação tendo sido detectado de maneira satisfatória analogamente à detecção do mesmo pico obtida a partir da vela instrumentada (1º modo radial). O pico em torno de 5 kHz apresenta correlação com o pico detectado a partir do sensor de pressão (1º modo circunferencial). Por último, o pico em torno de 10 kHz foi detectado

de maneira discreta (analogamente às detecções obtidas a partir do sensor de pressão e da vela instrumentada).

A FIGURA 4.121 apresenta o resultado da análise *FFT* para a pressão de injeção de 140 bar.

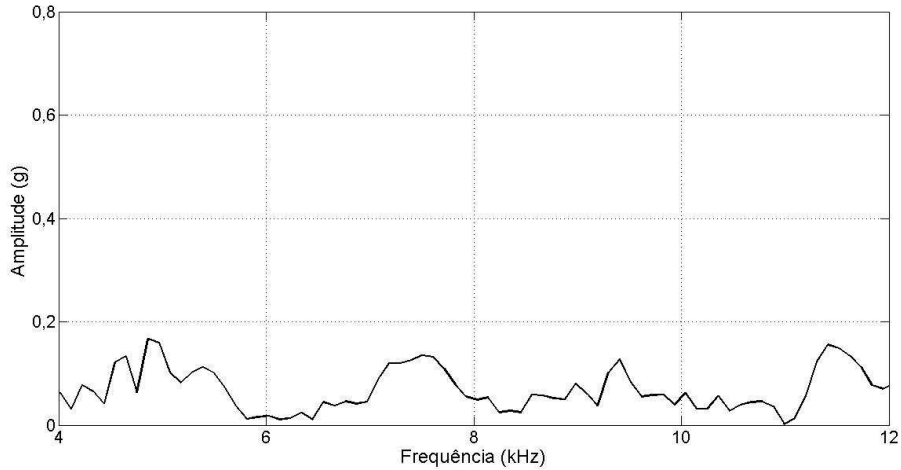


FIGURA 4.121 - Detalhe *FFT*: pressão injeção 140 bar - *DI* Etanol – acelerômetro

Nota-se picos de intensidade nitidamente menores para a pressão de injeção de 140 bar comparada à pressão de injeção de 100 bar indicando uma menor intensidade da detonação. A FIG. 4.122 apresenta o espectrograma para esta pressão de injeção.

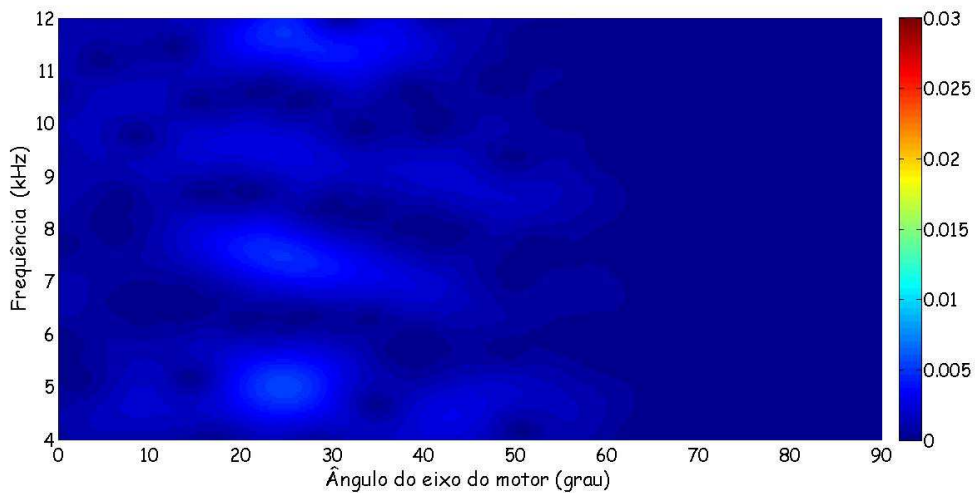


FIGURA 4.122 - Espectrograma: pressão injeção 140 bar - *DI* Etanol - acelerômetro

Identifica-se a correlação do pico em torno de 7,5 kHz com a ocorrência da detonação ainda que numa intensidade bem menor comparada à pressão de 100 bar. Embora as condições de funcionamento do motor sejam praticamente idênticas para os

dois valores de pressão de injeção, nota-se que os níveis de detonação são nitidamente inferiores para a pressão de 140 bar. Este fato pode estar associado à melhor atomização do combustível e, conseqüentemente, à melhor qualidade da queima a qual reduz a possibilidade de ocorrência da detonação e/ou reduz a sua intensidade. Uma vez que a excitação dentro da câmara de combustão (intensidade da detonação) foi menor, a transmissão foi também menor e, conseqüentemente, a detecção a partir do acelerômetro.

4.6.3 Configuração de injeção DI utilizando CNG

Também nesta configuração foram realizadas tanto a análise da influência dos valores de lambda quanto a análise das diferentes estruturas de fluxo.

4.6.3.1 Influência dos valores de lambda

Para esta análise foram utilizados, respectivamente, os seguintes experimentos: $\lambda=1,0$ (prova 2), $\lambda=1,3$ (prova 4) e $\lambda=1,5$ (prova 6) conforme pode-se ver na TAB. 3.3.

A FIGURA 4.123 apresenta os resultados para $\lambda = 1,0$ na faixa de frequência de interesse para a análise da detonação.

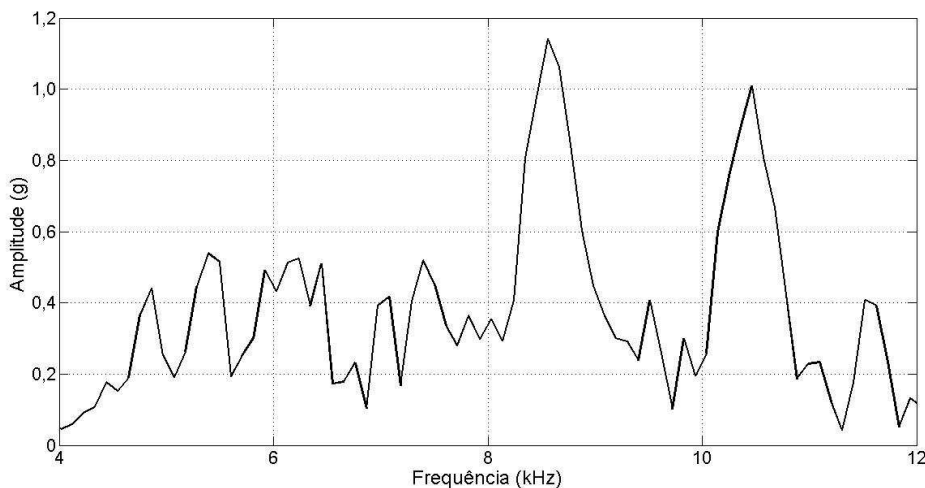


FIGURA 4.123 - Detalhe análise FFT: $\lambda = 1,0$ - DI CNG - acelerômetro

Os dois principais picos identificados situam-se em torno de 8,5 kHz e 10,5 kHz e o seu andamento em função do ângulo do eixo do motor pode ser visualizado por meio da FIG. 4.124.

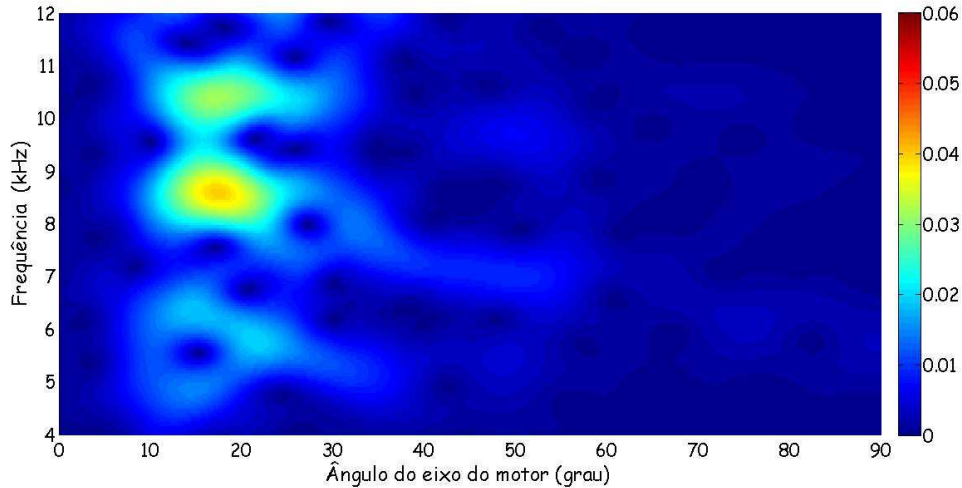


FIGURA 4.124 – Espectrograma: $\lambda = 1,0$ - *DI CNG* – acelerômetro

O pico em torno de 8,5 kHz cuja intensidade significativa ocorre entre 10 e 25° do ângulo do eixo do motor apresenta correlação com a ocorrência da detonação (1° modo radial e 2° modo circunferencial). Os outros apresentam correlação com o 1° modo circunferencial e o 1° modo combinado, respectivamente.

A FIGURA 4.125 apresenta os resultados da análise *FFT* para $\lambda = 1,3$.

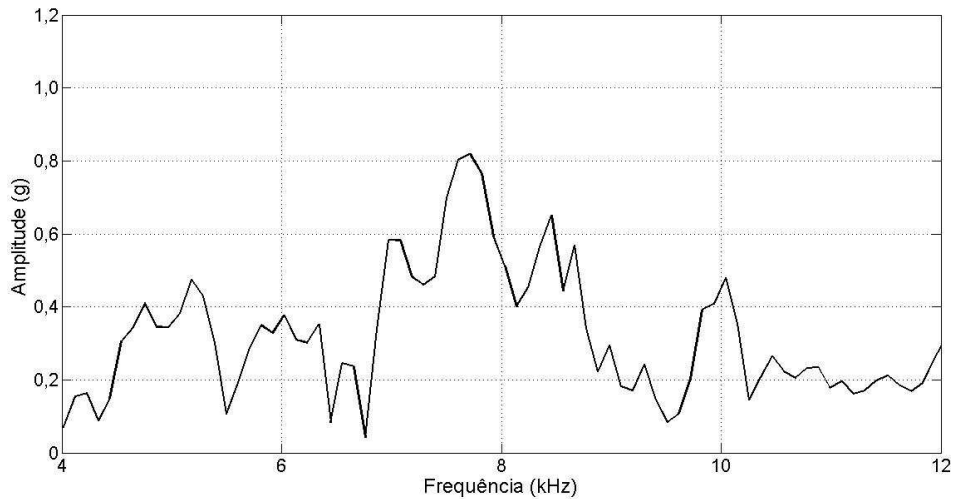


FIGURA 4.125 – Detalhe análise *FFT*: $\lambda = 1,3$ - *DI CNG* – acelerômetro

Ocorre um pico principal em torno de 7,5 kHz e dois picos de importância secundária em torno de 5 kHz e 10 kHz. A FIG. 4.126 mostra o andamento dos referidos picos em função do ângulo do eixo do motor.

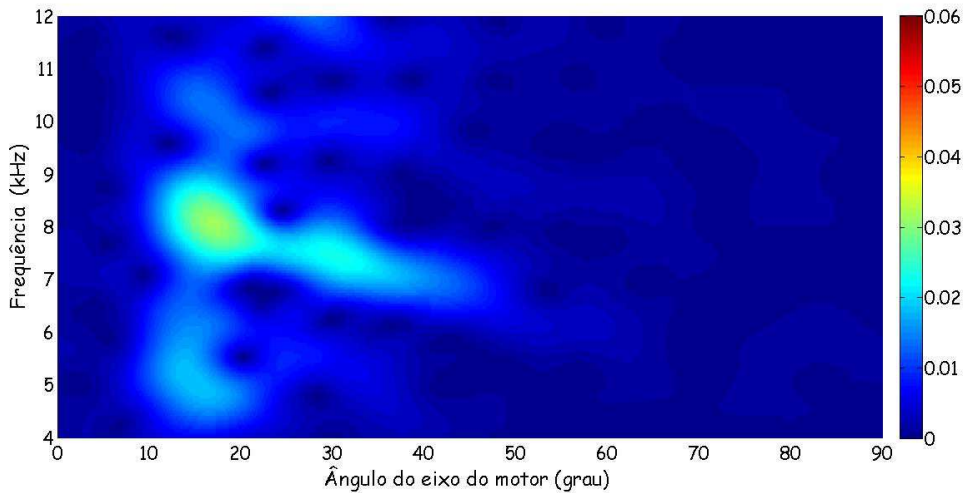


FIGURA 4.126 – Espectrograma: $\lambda = 1,3$ - *DI CNG* - acelerômetro

Nota-se que o pico em torno de 8 kHz apresenta o comportamento típico relacionado ao fenômeno da detonação (1º modo radial e 2º modo circunferencial) enquanto os outros picos, fracamente detectados, possuem importância secundária.

A FIGURA 4.127 apresenta os resultados da análise *FFT* para $\lambda = 1,5$.

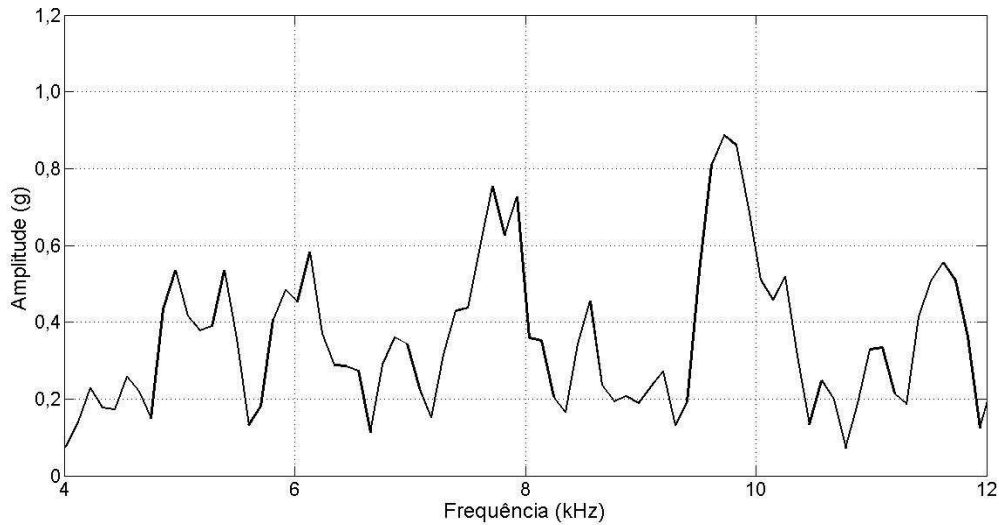


FIGURA 4.127 - Detalhe análise *FFT*: $\lambda = 1,5$ - *DI CNG* - acelerômetro

Identifica-se picos em torno de 5 kHz, 6 kHz, 8 kHz, 10 kHz e 11,5 kHz com relativa intensidade e a FIG. 4.128 apresenta a dependência dos mesmos com o ângulo do eixo do motor.

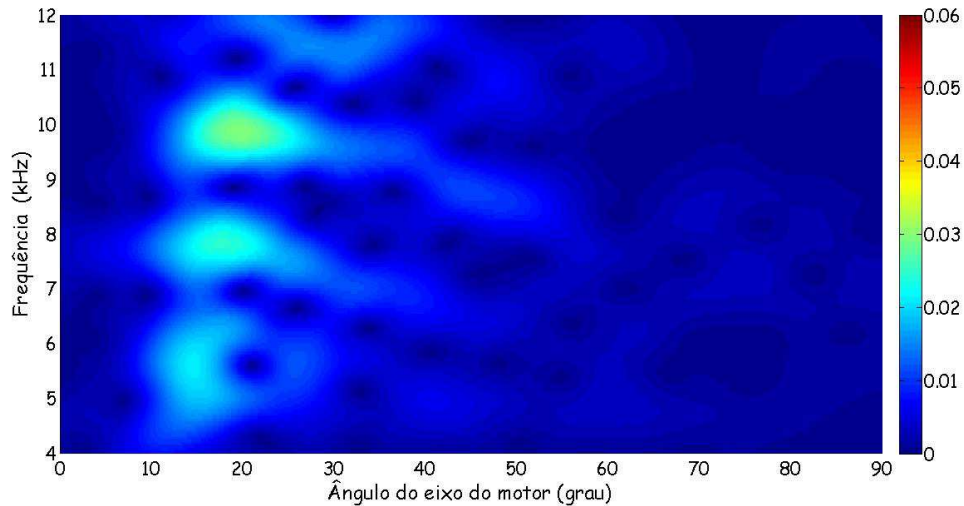


FIGURA 4.128 - Espectrograma: $\lambda = 1,5$ - *DI CNG* - acelerômetro

Os picos apresentam curta duração e aqueles que ocorrem ligeiramente abaixo de 8 kHz (relacionado ao 1° modo radial e ao 2° modo circunferencial) e em torno de 10 kHz (relacionado ao 1° modo combinado) apresentam correlação direta com a ocorrência da detonação no interior da câmara de combustão.

Percebe-se uma diminuição da intensidade das amplitudes relacionadas ao pico em torno de 8 kHz bem como uma redução dos valores de frequência. Tal fato está associado, conforme já citado para as outras configurações, à menor energia presente na câmara de combustão à medida que se empobrece a mistura ar/combustível.

4.6.3.2 Influência das diferentes estruturas de fluxo

Para esta análise, foram utilizados respectivamente os seguintes experimentos: estrutura de fluxo *low swirl* (prova 4), estrutura de fluxo *medium swirl and tumble* (prova 8) e estrutura de fluxo *high swirl* (prova 10) conforme TAB. 3.3.

A FIGURA 4.129 apresenta os resultados para a estrutura de fluxo *low swirl*.

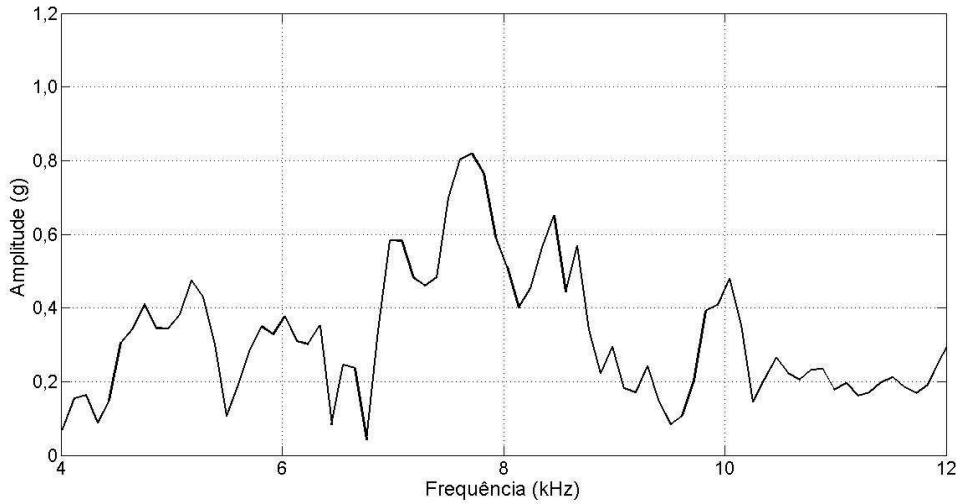


FIGURA 4.129 - Detalhe *FFT*: *low swirl - DI CNG* – acelerômetro

Identifica-se picos em torno de 5 kHz, 6 kHz, 7,5 kHz, 8,5 kHz e 10 kHz cujos andamentos em relação ao ângulo do eixo do motor pode ser visualizado na FIG. 4.130.

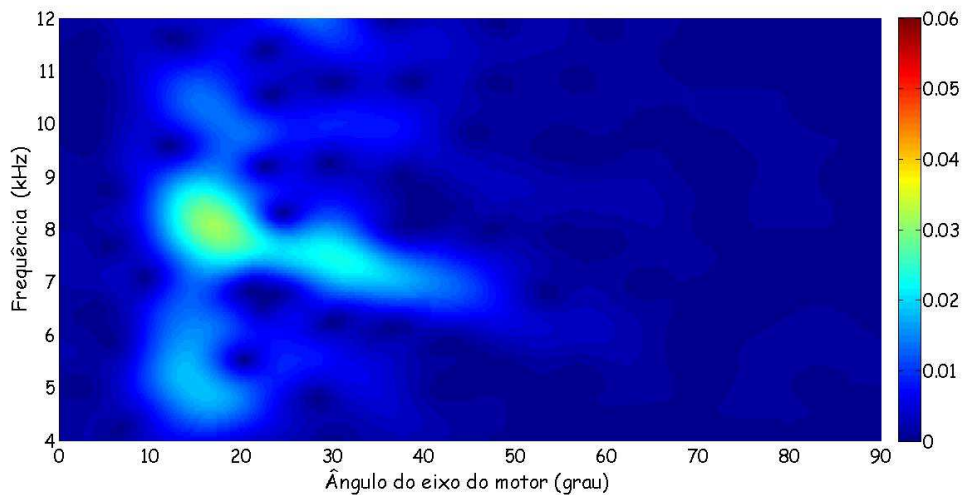


FIGURA 4.130 – Espectrograma: *low swirl - DI CNG* – acelerômetro

O pico em torno de 8 kHz mostra correlação com a ocorrência da detonação e estende-se de 10 a 40° do ângulo do eixo do motor. Os outros picos foram detectados de maneira bastante discreta e, conforme já citado, são de importância secundária.

A FIGURA 4.131 apresenta o resultado da análise *FFT* para a estrutura de fluxo *medium swirl and tumble*.

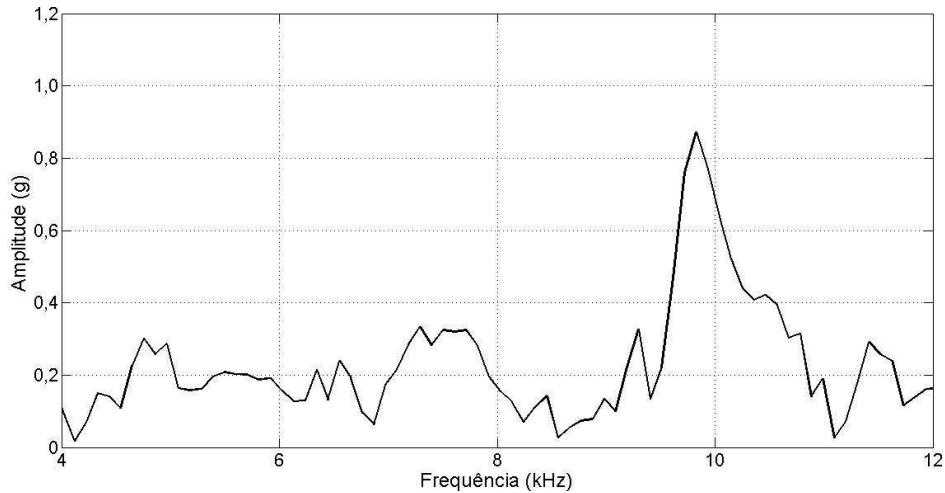


FIGURA 4.131 - Detalhe FFT: *medium swirl and tumble* - *DI CNG* - acelerômetro

Nota-se a presença de um pico em torno de 10 kHz bastante evidenciado enquanto outros picos menos importantes foram detectados em torno de 5 kHz, 7,5 kHz e 11,5 kHz. A FIG. 4.132 mostra o espectrograma referente a esta configuração.

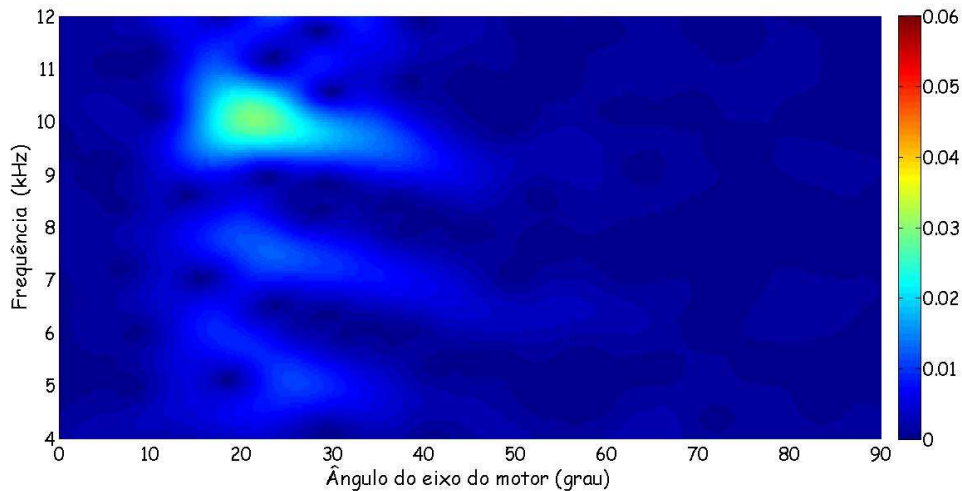


FIGURA 4.132 - Espectrograma: *medium swirl and tumble* - *DI CNG* - Acelerômetro

O pico em torno de 10 kHz mostra-se correlacionado à ocorrência do fenômeno da detonação (1º modo combinado) pois o seu padrão de comportamento apresenta um decréscimo da frequência em função do ângulo do eixo do motor. É um pico de curta duração (aproximadamente 10°) e apresenta um atraso no seu início (o mesmo é detectado somente a partir de 15°). Os outros picos são de importância secundária tendo sido discretamente detectados.

A FIGURA 4.133 mostra a análise FFT para a estrutura de fluxo *high swirl*.

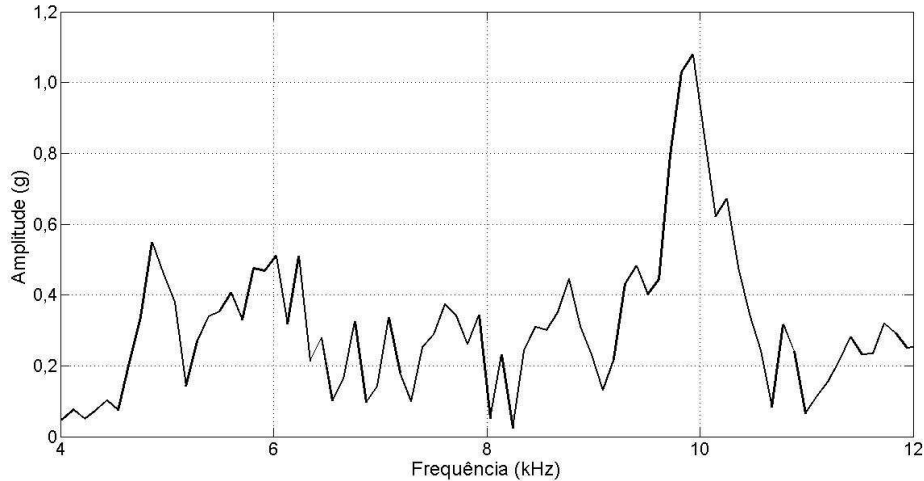


FIGURA 4.133 - Detalhe FFT: *high swirl - DI CNG* – acelerômetro

Identifica-se um pico mais acentuado em torno de 10 kHz e outros um pouco mais discretos em frequências menores.

A FIGURA 4.134 apresenta o espectrograma para esta configuração.

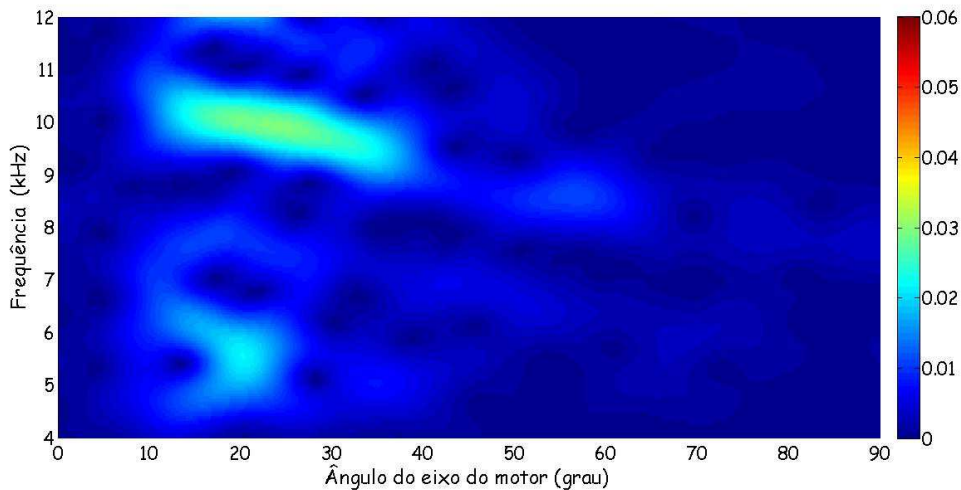


FIGURA 4.134 - Espectrograma: *high swirl - DI CNG* – acelerômetro

O pico em torno de 10 kHz mostra uma inequívoca correspondência com a ocorrência da detonação (correlação com o 1º modo combinado). A sua detecção ocorre a partir de 15° e sua duração está em torno de 25°. Os outros picos conforme já citado são de importância secundária.

De modo geral, não se verifica diferenças significativas entre as diversas estruturas de fluxo comparadas.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, desenvolveu-se e analisou-se um método para se avaliar o fenômeno da detonação em motores de combustão interna baseado na formação de ondas mecânicas decorrentes da ocorrência do referido fenômeno no interior da câmara de combustão.

Foram utilizadas as seguintes etapas neste desenvolvimento:

- Método analítico;
- Simulação computacional (geração de entrada de dados para outras etapas e obtenção de resultados sobre a detonação);
- Procedimento experimental (estratégia multi-sensor: sensor de pressão, vela instrumentada e acelerômetro).

A partir dos resultados obtidos é possível obter-se as seguintes conclusões:

A utilização do cálculo analítico para a determinação das frequências de ressonância presentes no interior da câmara de combustão (Etapa 1) devido à ocorrência da detonação, mostrou-se um método de aplicação limitada. Ele pode ser considerado tecnicamente aceitável somente para fornecer uma indicação primária da ordem de grandeza das frequências associadas aos modos acústicos presentes visto que a diferença obtida, considerando-se as diversas configurações avaliadas, pode chegar a 1,7 kHz, na região de maior importância. Tal diferença foi fortemente influenciada pela presença do *bow* no pistão o qual não permite que a câmara de combustão possa ser considerada um cilindro de bases retas quando o pistão encontra-se próximo ao ponto morto superior (posição de maior interesse no estudo da detonação). Em resumo, a limitação do referido método decorre da dificuldade de se incluir em um procedimento simplificado a geometria detalhada (real) da câmara de combustão.

A utilização da simulação computacional por meio do método de elementos finitos para a cálculo das frequências de ressonância presentes no interior da câmara de combustão (Etapa 2), a qual considera a geometria real da câmara de combustão, mostrou-se útil na visualização dos modos acústicos presentes na câmara de combustão. Isto permitiu entender quais os tipos de modos acústicos estão presentes durante a ocorrência da detonação bem como permitiu entender melhor o processo de detecção experimental dos respectivos modos a partir da utilização da vela instrumentada e do

sensor de pressão. Além disto, foi bastante útil na identificação do sensor mais adequado à detecção da detonação.

Os limites das faixas de frequências referentes aos principais modos acústicos presentes na câmara de combustão durante a ocorrência da detonação são, principalmente, determinados pelos valores de lambda (em detrimento ao tipo de estrutura de fluxo utilizado) já que os valores das temperaturas no interior do cilindro dependem diretamente deles. Além disto, os referidos limites ocorrem para a configuração DI Etanol e a sua identificação será útil no futuro estudo a ser desenvolvido relativo aos métodos de detecção da detonação.

A variação entre os valores máximos e mínimos obtidos a partir da simulação computacional considerando-se as diversas configurações de injeção de combustível (PFI e DI), os diferentes valores de lambda (1,0, 1,3 e 1,5) e os diferentes tipos de combustíveis (CNG e Etanol) foi de aproximadamente 850 Hz para o 1º modo circunferencial e de 1200 Hz para o 1º modo radial, para os valores de ângulo do eixo do motor com interesse prático quanto à ocorrência da detonação. Tais diferenças foram determinadas principalmente pela influência dos valores de lambda e aconteceram para a configuração de sistema de injeção DI.

A boa correlação entre os resultados simulados (utilizando-se o Método de Elementos Finitos) e aqueles experimentais considerando-se tanto a vela instrumentada como o sensor de pressão pode ser atribuída, em grande parte, à estratégia implementada neste trabalho de se considerar a temperatura máxima na câmara de combustão variável com o ângulo do eixo do motor. Tal procedimento mostrou-se satisfatório e permitiu a obtenção de resultados simulados muito próximos dos resultados reais.

Por todos estes aspectos anteriormente citados, fica evidente a importância da simulação computacional como suporte técnico nas pesquisas de detonação em motores de combustão interna.

Em relação à análise dos resultados referentes à detecção do fenômeno da detonação pelo sensor de pressão, verifica-se que houve uma boa correlação entre os resultados experimentais obtidos com o sensor de pressão e aqueles obtidos por meio da simulação computacional.

Para todas as condições avaliadas, verificou-se que a detonação ocorre com intensidade significativa principalmente entre 5 e 40° CA. Esta janela de ocorrência da

detonação será importante, futuramente, para o estudo a ser realizado relacionado aos métodos de detecção do referido fenômeno.

Outra consideração a respeito do posicionamento do sensor de pressão mostrou-se adequado para a detecção dos modos acústicos excitados devido à ocorrência da detonação. Os principais modos acústicos (circunferenciais) e, também os mais energéticos, foram satisfatoriamente detectados. Tal fato é de extrema importância como balizamento para a detecção da detonação nas mais diversas configurações passíveis de serem pesquisadas no motor bem como para a garantia da sua integridade física.

Em termos comparativos, o valor de λ exerce maior influência nos resultados das frequências dos modos acústicos que o tipo de estrutura de fluxo presente na câmara de combustão. Nas configurações avaliadas, nota-se uma diminuição nos valores de frequência em função do aumento de λ . Tais resultados já eram esperados visto que as temperaturas desenvolvidas no interior da câmara de combustão são menores com o aumento de λ .

Os níveis de detonação detectados pela vela instrumentada foram, comparativamente, bem menores que aqueles detectados pelo sensor de pressão. Além disto, os tipos de modos acústicos detectados foram também diferentes para os dois tipos de sensores. Tal fato está diretamente relacionado ao posicionamento dos mesmos no interior da câmara de combustão: o sensor de pressão está posicionado deslocado do ponto central da câmara e, conseqüentemente, está mais afastado das linhas modais dos principais modos acústicos.

A detecção experimental do fenômeno da detonação foi principalmente observada para valores de ângulo do eixo do motor compreendidos entre 0 e 40° sendo, de modo geral, válida também para a detecção por meio do sensor de pressão. Cabe ainda ressaltar a constatação prática de que as frequências dos modos acústicos são fortemente dependentes do referido ângulo: à medida que o mesmo aumenta (com o deslocamento do pistão e o conseqüente aumento do volume da câmara de combustão) ocorre uma redução das frequências, determinadas principalmente pela diminuição da temperatura.

Independentemente do tipo de sistema de injeção de combustível e do tipo de combustível utilizado, a influência das diversas estruturas de fluxo nos valores das frequências pode ser considerada discreta quando comparada à influência dos valores de λ tanto para o 1° modo circunferencial quanto para o 1° modo radial.

De modo geral, a eficiência da detecção dos modos acústicos no interior da câmara de combustão mostrou-se muito dependente do posicionamento do transdutor utilizado. A vela instrumentada e o sensor de pressão detectaram modos acústicos diferentes. Além disto, as suas intensidades e respectivas durações foram nitidamente diferentes em função do ângulo do eixo do motor. Os resultados obtidos da análise das ondas de pressão na faixa de frequência em torno de 6 kHz são, aparentemente, os mais indicados para se identificar o fenômeno da detonação visto que o 1º modo circunferencial (modo mais energético), ocorre em tal faixa de frequência. Deste modo, pode-se indicar a utilização do sensor de pressão, posicionado deslocado do ponto central, como o mais adequado sensor para a detecção da detonação.

A partir das diferentes análises realizadas, concluiu-se que a simulação computacional e os procedimentos experimentais são métodos complementares entre si no processo de avaliação da detonação e, sempre que possível, devem ser utilizados simultaneamente.

Em relação à detecção da detonação por meio do acelerômetro, conclui-se que a mesma não se mostrou tão eficiente quanto aquela obtida pelo sensor de pressão. Para valores de λ mais elevados (1,3 e 1,5) as intensidades detectadas não foram tão significativas. Em relação à influência das estruturas de fluxo na ocorrência da detonação, as maiores intensidades foram obtidas para a configuração *high swirl*.

Uma hipótese para que a detecção dos sinais de detonação não tenham sido tão satisfatória quanto se desejaria é o possível posicionamento inadequado do acelerômetro já que a sua instalação no motor foi realizada a partir do lay-out disponível, não tendo sido realizado qualquer tipo de estudo para a sua otimização.

Ainda em relação à detecção do fenômeno da detonação por meio da utilização do acelerômetro, o fato possivelmente mais importante, em relação à detecção com a utilização do sensor de pressão e da vela instrumentada, é que se está realizando uma avaliação indireta. O atraso verificado na detecção dos sinais (mediante em torno de 10º do ângulo do eixo do motor) não está somente ligado ao acoplamento entre o bloco do motor (paredes da câmara de combustão) e a onda fluídica. O principal fato é que o acelerômetro mede a vibração no bloco do motor o qual está sendo excitado pelas ondas acústicas. Portanto, ele responde como elemento estrutural sujeito a excitação e, a resposta detectada, não é igual à excitação.

Propostas para futuros trabalhos

O escopo das atividades de caracterização do fenômeno da detonação envolvendo a simulação computacional a partir do método de elementos finitos e a realização dos testes experimentais envolveu uma ampla gama de configurações tanto de estruturas de fluxo (*low swirl, medium swirl and tumble e high swirl*), valores de lambda (1,0, 1,3 e 1,5), sistemas de injeção de combustível (*PFI e DI*) e combustíveis (*CNG e Etanol*) tornando muito abrangente as condições de funcionamento do motor. Tal fato permitiu um levantamento muito completo, consistente e confiável gerando uma base de dados importante e significativa. Neste sentido, uma continuação natural e óbvia deste trabalho é o estudo mais detalhado e a consequente implementação de um critério de decisão quanto à ocorrência da detonação. Tal implementação passa pela escolha do melhor e mais seguro critério de decisão que possa atender aos mais diversos tipos de configurações de injeção avaliadas neste trabalho bem como dos vários tipos de combustíveis passíveis de serem utilizados.

Neste trabalho, a razão de compressão foi mantida constante no valor de 13:1. Pelo fato deste parâmetro influenciar diretamente a ocorrência da detonação e, conseqüentemente, a eficiência do motor, valores mais elevados devem ser avaliados de modo a estabelecer um limite para o funcionamento do motor e indicar a melhor relação de compressão específica para cada tipo de combustível, para cada tipo de estrutura de fluxo e, também, para cada tipo de configuração do sistema de injeção.

Como o direcionamento das pesquisas realizadas no referido motor são voltadas para a aplicação em geração de energia, as configurações avaliadas neste trabalho consideraram a rotação do motor fixa em 1800 rpm. No caso de outros tipos de aplicação, tais como na área automobilística, um estudo mais aprofundado deve ser realizado considerando-se outros valores de rotação visto que os limiares para a detecção da detonação variam em função da mesma.

Uma atividade a ser futuramente desenvolvida, complementar à desenvolvida neste trabalho, é a pesquisa de outros tipos de combustíveis, tais como a gasolina e a misturas de combustíveis, de modo a entender melhor a sua influência nos valores das frequências dos modos acústicos excitados como resultado da ocorrência da detonação.

O presente trabalho foi desenvolvido considerando-se fixa a configuração do pistão. Como o comportamento da mistura se altera com a geometria do pistão, torna-se

necessário a pesquisa da influência da geometria do referido componente no comportamento da detonação.

Uma outra abordagem interessante de ser realizada como complementação deste trabalho seria a determinação da função de transferência do bloco do motor. Isto permitiria uma maior compreensão das diferenças encontradas entre os resultados obtidos a partir da utilização da vela instrumentada e do sensor de pressão com aqueles obtidos a partir da utilização do acelerômetro. Além disto, como complementação do exposto acima, um estudo para a determinação do posicionamento ideal do acelerômetro no motor utilizando *FEA* (*Finite Element Analysis*) poderia ser realizado visando a obtenção de sinais confiáveis para a detecção da detonação e evitando o demorado e trabalhoso método experimental de tentativa e erro. Cabe ressaltar que o método de posicionamento de um acelerômetro externamente ao bloco do motor necessita de calibração específica e direcionada ao motor específico uma vez que o acoplamento fluido-estrutura presente influencia a resposta de forma complexa, fazendo com que os sinais coletados apresentem contaminação substancial no espectro da resposta observado.

Em função dos bons resultados obtidos, a mesma metodologia pode ser também aplicada para a caracterização do outro motor monocilindro de pesquisa disponível na empresa. É recomendável, entretanto, focar principalmente nas etapas que apresentaram os resultados mais satisfatórios (utilização de *FEM* e medições experimentais utilizando o sensor de pressão).

REFERÊNCIAS

Abaqus v6.8, Copyright 2002-2012 Dassault Systemes - All rights reserved
Vélizy-Villacoublay, FRANCE
<http://www.3ds.com>.

ALTENSCHMIDT, F.; GILDEIN, H.; KADEN, A.; PRILOP, H.; and SCHAUPP, U., **Analysis of Knocking Events Using Optical Measuring Equipment and CFD Simulation on a Supercharged Gasoline Engine with Piezo Injection Technology**. 8th International Symposium on Internal Combustion Diagnostics, 10/11 June 2008. Kurhaus Baden-Baden

Autoesporte. <http://g1.globo.com/carros/noticia/2013/07/producao-de-veiculos-flex-no-brasil-chega-20-milhoes-diz-anfavea.html>. Acessado em Julho/2013

AVL INDICOM V2.0 **Exploration Guide** February 2008 AT2644E, Rev.01

BENGISU., T., **Computing the Optimum Knock Sensor Locations**. SAE 2002 World Congress Detroit, Michigan March 04-07, 2002, Paper 2002-01-1187

BERTOLA, A.; STADLER, J.; WALTER, T.; WOLFER, P.; GOSSWEILER, C. and ROTHE, M., **Pressure Indication during Knocking Conditions**. 7th International Symposium on Internal Combustion Diagnostics, 18/19 May 2006. Kurhaus Baden-Baden ISBN 3-00-018208-x

BLUNSDON, C. A. and DENT, J. C., **The Simulation of Autoignition and Knock in a Spark Ignition Engine with Disk Geometry**. International Congress & Exposition Detroit, Michigan February 28-March 3, 1994 Paper 940524

BORG, J. M., SAIKALIS, G., OHO, S. and CHEOK, Ka C., **Knock Signal Analysis Using the Discrete Wavelet Transform**. SAE World Congress Detroit, Michigan April 03-06, 2006 Paper 2006-01-0226

BRAGA, G. T., **Desenvolvimento e Implementação de um Sistema de Identificação de Detonação em Motores de Combustão Interna de Ignição por Centelha**. Monografia de Projeto de Fim de Curso (PFC), ECA/UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Dezembro 2004

BRUNT, M. F. J., POND, C. R. and BIUNDO, J., **Gasoline Engine Knock Analysis using Cylinder Pressure Data**. SAE World Congress Detroit, Michigan April 23-26, 1998 Paper 980896

BURGDORF, K. and DENBRATT, I., **Comparison of Cylinder Pressure Based Knock Detection Methods**. International Fall Fuels & Lubricants Meeting & Exposition Tulsa, Oklahoma October 13-16, 1997 Paper 972932

CARSTENS-BEHRENS, S., URLAUB, M., BÖHME, JOHANN F., FÖRSTER, J. and RAICHLE, F., **FEM Approximation of Internal Combustion Chambers for Knock Investigations**. SAE 2002 World Congress Detroit, Michigan March 4-7, 2002 Paper 2002-01-0237

CAVINA, N., CORTI, E., MINELLI, G., MORO, D. and SOLIERI, L., **Knock Indexes Normalization Methodologies**. 2006 SAE World Congress Detroit, Michigan April 3-6, 2006, Paper 2006-01-2998

Concerto V4.00. Graz – Austria. 1990-2008. Software by AVL

CORTI, E. and MORO, D., **Knock Indexes Thresholds Setting Methodology**. 2007 SAE World Congress, Detroit, Michigan, April 16-19, 2007 Paper 2007-01-1508

CORTI, E. and FORTE, C., **Statistical Analysis of Indicating Parameters for Knock Detection Purposes**. 2009 SAE World Congress, Detroit, Michigan, Paper 2009-01-0237

CHUN, K. M. and KIM, K. W., **Measurement and Analysis of Knock in a SI Engine Using the Cylinder Pressure and Block Vibration Signals**. International Congress and Exposition, Detroit, Michigan February 28-March 3, 1994 Paper 940146

DRAPER, C. S., **Pressure Waves Accompanying Detonation in the Internal Combustion Engine**. Journal of the Aeronautical Sciences, Volume 5, Number 6, April 1938

ENG, J. A., **Characterization of Pressure Waves in HCCI Combustion**. SAE 2002 World Congress Detroit, Michigan March 04-07, 2002, Paper 2002-01-2859

FITTON, J. and NATES, R., **Knock Erosion in Spark-ignition Engines**. International Congress and Exposition, Detroit, Michigan February 26-29 1996 Paper 962102

FORBES, J. W., CARLSTROM, K. R. and GRAESSLEY, W. J., **Engine Knock Control Via Optimization of Sensor Location**. SAE 1995 World Congress Paper 951237

GRANDIN, B. and DENBRATT, I., **The Effect of Knock on Heat Transfer in SI Engines**. SAE 2002 World Congress Detroit, Michigan March 04-07, 2002, Paper 2002-01-0238

GT-Power v6.9, Copyright © 1996-2011 by Gamma Technologies Inc.
Westmont, Illinois USA
<http://www.gtisoft.com>

HAGHGOOIE, M., **Effects of Fuel Octane Number and Inlet Air Temperature on Knock Characteristics of a Single Cylinder Engine**. International Fuels and Lubricants Meeting and Exposition, Tulsa, Oklahoma October 22-25, 1990 Paper 902134

HETTINGER, A. and KULZER, A., **A New Method to Detect Knocking Zones.** 2009 SAE World Congress, Detroit, Michigan, Paper 2009-01-0698

HETTINGER, A., KULZER, A. and SPICHER, U., **Higher specific load – increasing knock risk Evaluation of measures for knock reduction using multiple pressure indication.** 2010 9th International Symposium on Combustion Diagnostics, 08/09 Jun 2010 – Kurhaus Baden-Baden

HEYWOOD, J.B., **Internal Combustion Engine Fundamentals,** McGraw Hill Inc., New York, 1998

HICKLING, R., FELDMAIER, D. A., CHEN, F. H. K. and MOREL, J. S., **Cavity resonances in engine combustion chambers and some applications.** J. Acoustical Society America 73 (4), April 1983

Hypermesh v10.0, Copyright 2012 Altair Engineering, Inc. All Rights Reserved.
Paraíso São Paulo, BRAZIL
<http://www.altair.com>

Indicom V2.0 Ver. 01. Graz – Áustria. February 2008. Software by AVL

KAELBLEIN, T., JEONG, Y. 1. and RHEE, K. T., **Knock Effects on Spark-ignition Engine Emission and Performance.** International Congress and Exposition, Detroit, Michigan February 26- March 2, 1990 Paper 900712

KONIG, G. and SHEPPARD, C. G. W., **End Gas Autoignition and Knock in a Spark Ignition Engine.** International Fuels and Lubricants Meeting and Exposition, Tulsa, Oklahoma October 22-25, 1990 Paper 902135

KULZER, A., LEJSEK, D., KIEFER, A. and HETTINGER, A., **Pressure Trace Analysis Methods to Analyze Combustion Features and Cyclic Variability of Different Gasoline Combustion Concepts.** 2009 SAE World Congress, Detroit, Michigan, Paper 2009-01-0501

LAFOSSAS, F.-A., CASTAGNÉ, M., DUMAS, J. P. and HENRIOT, S., **Development and Validation of a Knock Model in Spark Ignition Engines Using a CFD Code.** Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition San Diego, California USA October 21-24, 2002, Paper 2002-01-2701

LEE, J., HWANG, S., LIM, J., JEON, D. and CHO, Y., **A New Knock-Detection Method using Cylinder Pressure, Block Vibration and Sound Pressure Signals from a SI Engine.** SAE World Congress Detroit, Michigan April 23-26, 1998 Paper 981436

LEPPARD, W. R., **Individual-Cylinder Knock Occurrence and Intensity in Multicylinder Engines.** International Congress & Exposition Detroit, Michigan February 22-26, 1982 Paper 820074

MatLab 7.6 (Release 2008a). 1984-2008. Software by The Math Works, Inc.

MAZOYER, Th., FAYET., P., CASTAGNÉ, M. and DUMAS, T., **Development of a Multi-sensors Head Gasket for Knock Localization**. 2003 SAE World Congress, Detroit, Michigan, March 3-6, 2003 Paper 2003-01-1117

MERKER, G. P., SCHWARZ, C and TEICHMANN, R., **Combustion Engines Development Mixture Formation, Combustion, Emissions and Simulation**, Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2011

MILLO, F. and FERRARO, C.V., **Knock in S.I. Engines: A Comparison between Different Techniques for Detection and Control**. International Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exposition San Francisco, California October 19-22, 1998 Paper 982477

MITTAL, V., REVIER, B. M. and HEYWOOD, J. B., **Phenomena that Determine Knock Onset in Spark-Ignition Engines**. Fuels&Emissions Conference, Cape Town, South Africa, January 23-25, 2007, SAE International, Paper 2007-01-0007

NABER, J. D., BLOUGH, J. R., FRANHOWSKI, D., GOBLE, M. and SZPYTMAN, J. E., **Analysis of Combustion Knock Metrics in Spark-ignition Engines**. SAE World Congress Detroit, Michigan April 03-06, 2006 Paper 2006-01-0400

NATES, R. J. and YATES, A. D. B., **Knock Damage Mechanisms in Spark-Ignition Engines**. Fuels & Lubricants Meeting & Exposition Baltimore, Maryland October, 17-20, 1994 Paper 942064

PAN, J. and SHEPPARD, C. G. W., **A Theoretical and Experimental Study of the Modes of End Gas Autoignition Leading to Knock in S.I. Engines**. Fuels & Lubricants Meeting & Exposition Baltimore, Maryland October, 17-20, 1994 Paper 942060

PATTERSON, G. J. and DAVIS, R. S., **Geometric and Topological Considerations to Maximize Remotely Mounted Cylinder Pressure Transducer Data Quality**. SAE World Congress, Detroit, Michigan, 2009 Paper 2009-01-0644

PÉREZ, E. P., CARVALHO JR, J. A. and CARROCCI, L. R., **Substituição do Óleo Diesel por Álcool Etilico Hidratado na Queima Direta, uma Comparação**. Encontro de Energia no Meio Rural, 6, 2006, Campinas, São Paulo. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_artlex&pid=MSC0000000022006000200042&Ing=en&nrm=abn. Acessado em 17 de Julho de 2013.

PHILLIPP, H., HIRSCH, A., BAUMGARTENER, M., FERNITZ, G., BEIDL, C., PIOCK, W. and WINKLHOFER, E., **Localization of Knock Events in Direct Injection Gasoline Engines**. SAE 2001 World Congress Detroit, Michigan, March 5-8, 2001, SAE Paper 2001-01-1199

PróAlcool – Programa Brasileiro de Álcool. <http://www.biodieselbr.com/proalcool/proalcool/programa-etanol.htm>. Acessado em Julho/2013

PUZINAUSKAS, P. V., **Examination of Methods used to Characterize Engine Knock.** International Congress & Exposition Detroit, Michigan February 24-28, 1992, Paper 920808

PUZINAUSKAS, P. V., MATHIS, W. M. and DZIECIUCH., M. A., **Quantification and Modeling the Effects of Thermal Shock on Combustion Pressure Transducers.** International Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exposition San Antonio, Texas September 24-27, 2001, Paper 2001-01-3491

RANDOLPH, A.L., **Cylinder-Pressure-Based Combustion Analysis in Race Engines.** Fuels & Lubricants Meeting & Exposition Baltimore, Maryland October, 17-20, 1994 Paper 942487

RANDOLPH, A.L., **Cylinder-Pressure-Transducer Mounting Techniques to Maximize Data Accuracy.** International Congress and Exposition, Detroit, Michigan February 26- March 2, 1990 Paper 900171

ROTHER, M., SCHUBERT, A. and SPICHER, U., **Thermodynamic Approach for the Assessment of the Knock Behavior of SI-Engines under Full Load Conditions.** 7th International Symposium on Internal Combustion Diagnostics 18/19 May 2006 – Kurhaus Baden-Baden ISBN 3-00-018208-x

RUSS, S., **A Review of the Effect of Engine Operating Conditions on Borderline Knock.** International Congress and Exposition, Detroit, Michigan February 26-29 1996 Paper 960497

SAMIMY, B. and RIZZONI, G., **Engine Knock Analysis and Detection Using Time-Frequency Analysis.** International Congress and Exposition, Detroit, Michigan February 26-29 1996 Paper 960618

SCHELLING, H. and GEISSELBRECHT, M., **Measurement of Various Influencing Factors on Piston Load During Knocking Combustion.** Mahle Technical Information 2000, ISBN 621-242 S345m

SHI, Y., **Prediction of Knock Sensor Locations with Background Noise.** SAE World Congress Detroit, Michigan April 11-14, 2005, Paper 2005-01-2554

SCHMILLEN, K. P. AND RECHS, M., **Diferent Methods of Knock Detection and Knock Control.** International Congress and Exposition, Detroit, Michigan February 25-March 1, 1991 Paper 910858

SCHOLL, D., BARASH, T., RUSS, S. and STOCKHAUSEN, W., **Spectrogram Analysis of Accelerometer-Based Spark Knock detection Waveforms.** International Congress and Exposition, Detroit, Michigan February 24-27 1997 Paper 972020

SCHOLL, D., DAVIS, C., RUSS, S. and BARASH, T., **The Volume Acoustic Modes of Spark-Ignited Internal Combustion Chambers.** International Congress and Exposition, Detroit, Michigan February 23-26 1998 Paper 980893

SULAIMAN, A. R. and ABED, S. T., **Matlab-Based Design and Implementation of Time-Frequency Analyser.** Al-Rafidain Engineering Journal Vol.15 No.3 2007

SUN, Z., BLACKSHEAR, P. L. and KITTELSON, D. B., **Spark Ignition Engine Knock Detection Using In-Cylinder Optical Probes.** International Fall Fuels & Lubricants Meeting & Exposition San Antonio, Texas October 14-17, 1996

SYRIMIS, M., SHIGAHARA, K. and ASSANIS, D. N., **Correlation Between Knock Intensity and Heat Transfer Under Light and Heavy Knocking Conditions in a Spark Ignition Engine.** International Congress and Exposition, Detroit, Michigan February 26-29 1996 Paper 960495

TERAJI, A., KAKUHO, A., TSUDA, T. and HASHIZUME, Y. **A Study of the Knocking Mechanism in Terms of Flame Propagation Behavior Based on 3D Numerical Simulations.** 2009 SAE World Congress, Detroit, Michigan, Paper 2009-01-0699

VALTADOROS, T. H., WONG, V. W. and HEYWOOD, J. B., **Engine Knock Characteristics at the Audible Level.** International Congress and Exposition, Detroit, Michigan February 25-March 1, 1991 Paper 910567

XIAOFENG, G., STONE, R, HUDSON, C. and BRADBURY, I., **THE Detection and Quantification of Knock in Spark Ignition Engines.** Fuels & Lubricants Meeting & Exposition Philadelphia, Pennsylvania October, 18-21, 1993 Paper 932759

WITZE, P. O. and GREEN, R. M., **Determining the Location of End-Gas Autoignition Using Ionization Probes Installed in the Head Gasket.** Fuels & Lubricants Meeting & Exposition Baltimore, Maryland October, 18-21, 1993 Paper 932645

YOSHIMATSU, A., YOSHIMURA, H. and ABE, S., **Effects of Mixture Homogeneity in DISI Engines on Knock Characteristics.** 8th International Symposium on Combustion Diagnostics, Kurhaus Baden-Baden, Germany, June 10-11, 2008

YOSHIMURA, K., TOKUNAGA, Y., HASHIMOTO, D, and SAKURAI, H., **Knock and Misfire Detection using Ion Current Measurement for Ultra Lean Burn Medium Speed Gas Engine.** Society of Automotive Engineers of Japan JSAE 20077240 SAE 2007-01-2078




YUNLONG, B., ZHI, W., and AND JIANXIN, W., **Knocking Suppression using Stratified Stoichiometric Mixture in a DISI Engine.** SAE 2010 World Congress & Exhibition, Detroit, Michigan, USA Paper 2010-01-0597

ZHANG, Z. and TOMOTA, E., **A New Diagnostic Method of Knocking in a Spark-Ignition Engine Using the Wavelet Transform.** International Spring & Lubricants Meeting & Exhibition Paris, France June 19-22, 2000, Paper 2000-01-1801

ZHANG, Z. and TOMITA, E., **Diagnostic of Knocking by Wavelet Transform Method Utilizing Real Signal as Mother Wavelet.** International Spring & Lubricants Meeting & Exposition Baltimore, Maryland September 24-27, 2001, Paper 2001-01-3546

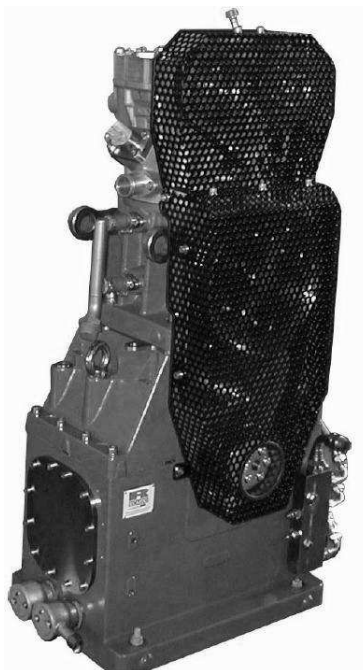
ANEXO A

Características técnicas dos sistemas de injeção de combustível.

Característica	Sistema <i>DI</i>		Sistema <i>PFI</i>
Modelo	High-pressure GDI IHP3-205	AA 57N	0 280 B00 586_09
Vazão de combustível (g/s)	19	11,7	30
Pressão de injeção (bar)	ajustável até 200	25	4, 5
Tipo de Combustível	Etanol	<i>CNG</i>	<i>CNG</i>
Visualização			

ANEXO B

Características técnicas do motor monocilindro de pesquisa.



Vista do Motor Monocilindro de Pesquisa

Tabela A.1 – Características Técnicas do motor monocilindro de pesquisa

<i>Característica Técnica</i>	<i>Especificação</i>
<i>Fabricante / Modelo</i>	Ricardo / Proteus II
<i>Tipo de Motor / Arranjo</i>	Monocilindro / Vertical
<i>Nº de tempos / Nº de válvulas</i>	4 / 4 (admissão: 2 e exaustão: 2)
<i>Tipos de Sistemas de Injeção</i>	<i>PFI e/ou DI</i>
<i>Combustível</i>	Etanol, CNG, Gasolina
<i>Tipo de aspiração</i>	Natural ou Sobrealimentado
<i>Deslocamento/Diâmetro do cilindro (mm)</i>	160,0 / 128,0
<i>Cilindrada (cm³)</i>	2056
<i>Razão de Compressão</i>	Variável: 13:1 a 19:1 (passo de 0,5)
<i>Regime de marcha lenta (rpm)</i>	800 ± 50
<i>Rotação Máxima (rpm)</i>	2200
<i>Potência Máxima (kW)</i>	90
<i>Pressão máxima no cilindro (bar)</i>	185

Fonte: Fabricante do motor

ANEXO C

Instalações e equipamentos utilizados

- Dinamômetro Ativo

Modelo: LI 250

Fabricante: TCA-Horiba

Potência: 250 kW

Rotação máxima: 10.000 rpm

- IndiModul 621 data acquisition unit with 8 measurement channels and FireWire connection to Desktop PC

Resolução de medição: 0,1° CA

Tensão de alimentação: 10,5 a 36 V CC (utilizado 24 V CC)

Faixa de temperatura: 0° C a +50° C

- AVL Angle Encoder 365 CC

Faixa de rotação: 50 a 20000 rpm

Temperatura permissível na face de montagem: - 40° C a + 100° C

Momento de inércia das massas rotativas: $3,8 \times 10^{-5}$ kgm²

Grau de proteção: IP54

- MicroIFEM Module

Tensão de alimentação: 9,5 a 36 V CC (utilizado 24 V CC)

Faixa de temperatura: - 40° C a + 60° C

Sinal de entrada: ± 10 V

Sinal de saída em tensão: - 11 a + 11 V sob carga

- TDC-Sensor 428

Tensão de alimentação: + 15 V, - 15 V, Terra


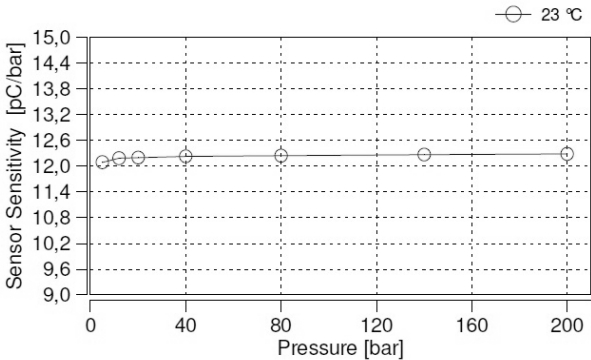
Faixa de temperatura: 0 a 80° C

Tensão de saída: ± 10 V

Corrente de saída: 10 mA

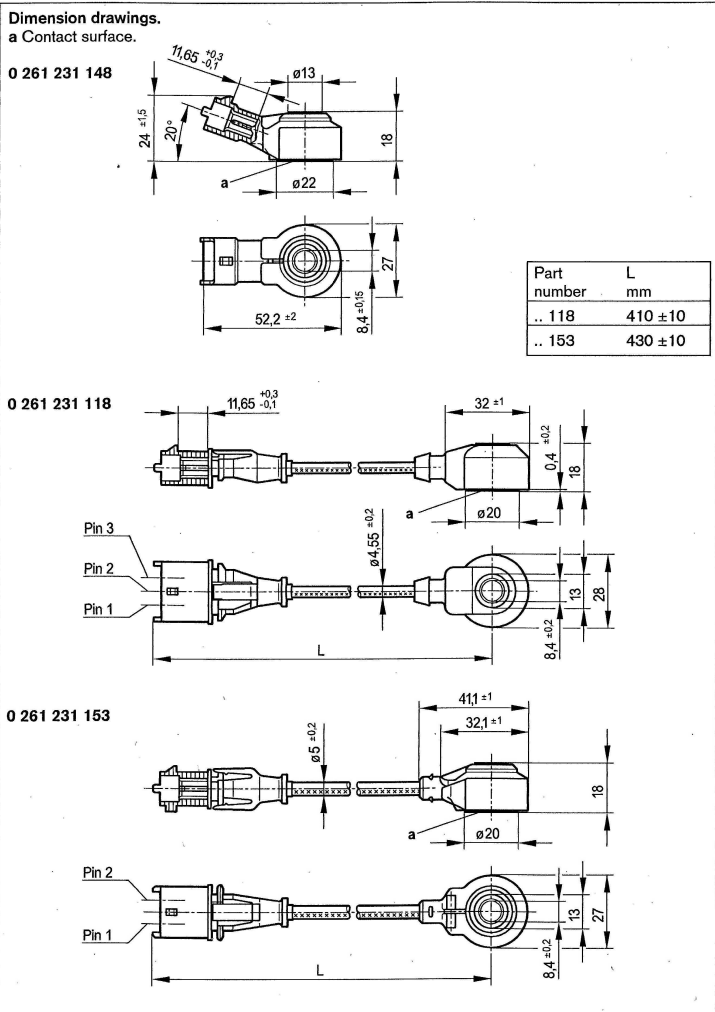
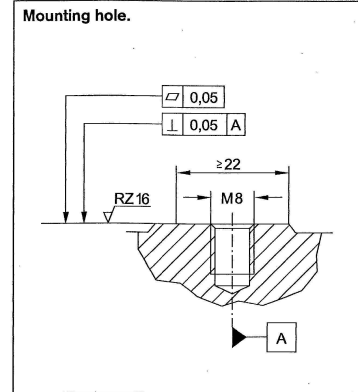
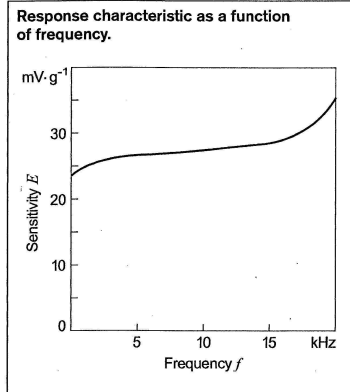
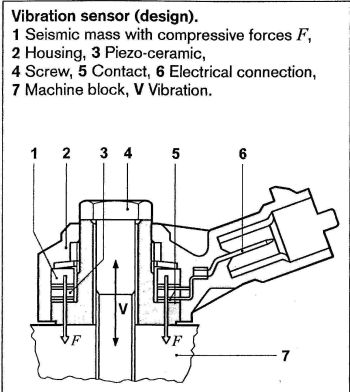
ANEXO D.2

Carta de calibração da vela instrumentada

Calibration Record / Kalibrierprotokoll		Date Datum		
Spark plug sensor Zündkerzensensor	ZI31_Y5S	2009/02/14		
Serial Number Seriennummer	9106 SID 0	Test Engineer Testingenieur	SZANTEJ	
Results/Ergebnisse		Measurement Procedure / Messverfahren		
Measuring Point Prüfpunkt	Sensitivity Empfindlichkeit at/bei 23 °C [pC/bar]	Continuous Calibration, Comparison Method Kontinuierliche Kalibrierung, Vergleichsverfahren		
[bar]		Methods / Methoden		
5	12,09	¹ Determined by Tolerance Range Method (best straight line with forced zero), DIN 16086. Ermittelt nach der Toleranzband-Methode (beste Gerade mit Zwangsnulldpunkt), DIN 16086.		
12	12,18			
20	12,20			
40	12,23			
80	12,24			
140	12,27			
200	12,28			
Calibrated Range Kalibrierter Bereich [bar]		Reference Equipment / Referenzgerät		
	Sensitivity/Linearity Empfindlichkeit/Linearität at/bei 23 °C [pC/bar] / [%FSO]	automatic Calibrationsystem / automatisches Kalibriersystem Typ PZ 350 / SN 001		
0 - 200	12,27 / ± 0,10	Measuring Equipment / Messgerät Indiset Advanced 631 / SN 6310281 Cal.protocol / Kal.protokoll: PM1196_24042008		
0 - 140	12,26 / ± 0,09	Charge Amplifier / Ladungsverstärker Microfem 4FP4 / SN 150 / channel/Kanal 1 Cal.protocol / Kal.protokoll: PM1091_1		
0 - 80	12,23 / ± 0,12	Measuring Software / Messsoftware Rampenkalibration_v3.4		
		Reference Sensor / Referenzsensor 0-35 bar Druck PCDR 4030 / SN 1909434 Module amplifier / Modulverstärker Typ: Burster 9243 SN 264375 Cal.protocol / Kal.protokoll: DKD-K-03701 F 20531		
		Reference Sensor / Referenzsensor 30-350 bar Druck PCDR 4030 / SN 1724124 Module amplifier / Modulverstärker Typ Burster 9243 SN 221122 Cal.protocol / Kal.protokoll: DKD-K-03701 F 20532		
Confirmation/Bestätigung		In order to ensure traceability to the national standard the reference sensors and the reference amplifier are examined in regular intervals by an independent calibration service.		
The sensor tested complies with the values specified in the data sheet. We confirm that the device was tested with the equipment and according to the procedures specified. Guaranteed accuracy of measurement for sensitivity better than 0.2%.		Um die Rückführbarkeit auf Nationale Normale zu gewährleisten werden die Referenzsensoren und Referenzverstärker in regelmäßigen Abständen von einem unabhängigen Kalibrierdienst überprüft.		
Der geprüfte Sensor erfüllt die im Datenblatt spezifizierten Werte. Wir bestätigen, dass die Prüfung mit den vorgeschriebenen Messmitteln und Verfahren durchgeführt wurde. Garantierte Messgenauigkeit für Empfindlichkeit besser als 0.2%.		ISO 9001 zertifiziert / certified		
According to test procedure / Nach Prüfvorschrift VK01.10/F0011		Bearb. Riedler Datum : 2008-04-08		
Z.Nr. VK01.10/F0012 Kal 3		Gepr. Baumgartner Datum : 2008-04-08		
Änd.St. PZE-0491		AVL Concerto / AVL		

ANEXO D.3

Carta de calibração do acelerômetro



Evaluation
 The sensor's signals can be evaluated using an electronic module. This is described on Pages 26/27.

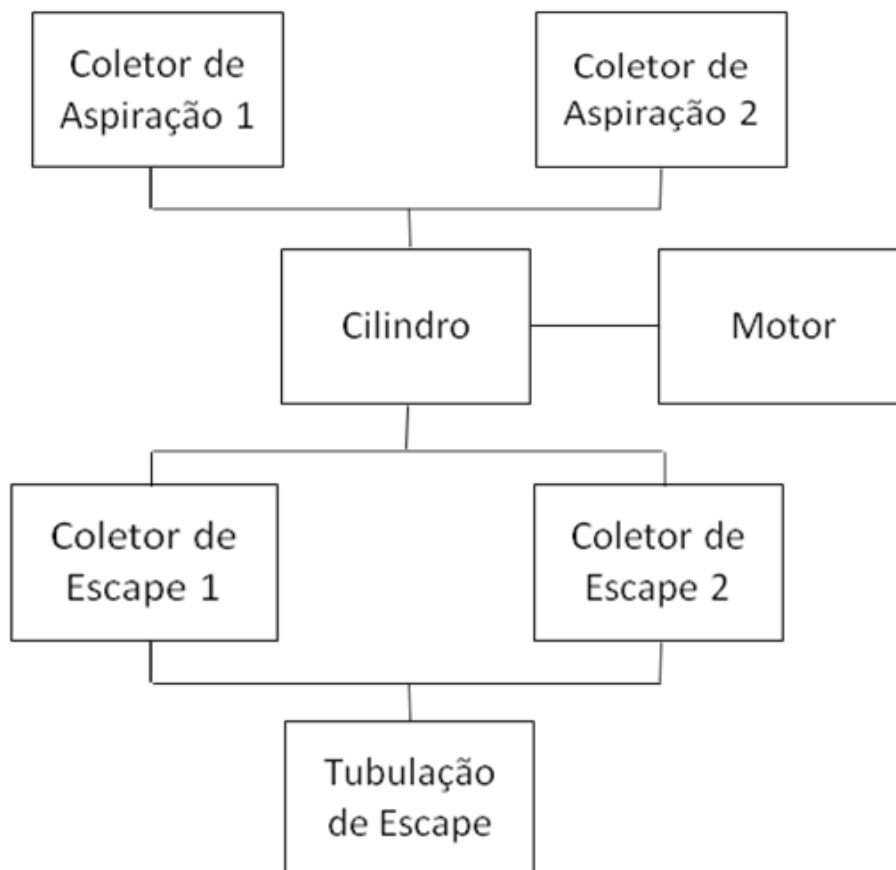
Installation instructions
 The sensor's metal surfaces must make direct contact. No washers of any type are to be used when fastening the sensors. The mounting-hole contact surface should be of high quality to ensure low-resonance sensor coupling at the measuring point. The sensor cable is to be laid such that there is no possibility of sympathetic oscillations being generated. The sensor must not come into contact with liquids for longer periods.

Explanation of symbols
 E Sensitivity
 f Frequency
 g Acceleration due to gravity

Connector-pin assignments
 Pin 1, 2 Measuring signal
 Pin 3 Shield, dummy

APÊNDICE A

Modelo GT-Power do motor monocilindro de pesquisa Ricardo.



Dados de entrada:

- diâmetro, comprimento e geometria dos coletores de aspiração
- diâmetro, comprimento e geometria dos coletores de escape
- diâmetro, comprimento e geometria da tubulação de escape
- comprimento da biela
- relação de compressão
- diâmetro e comprimento do cilindro
- diagrama de válvulas
- geometria do comando de válvulas
- geometria do eixo do motor
- tipo de combustão:
configuração do sistema de injeção de combustível: *DI* ou *PFI*

Dados medidos (impostos)

- pressão nos coletores de aspiração
- pressão nos coletores de escape
- pressão no interior da câmara de combustão

Dado estimado: - temperatura do cilindro (estimativa inicial 500° C)

APÊNDICE B

Coefficientes de *Swirl* e *Tumble* das estruturas de fluxo.

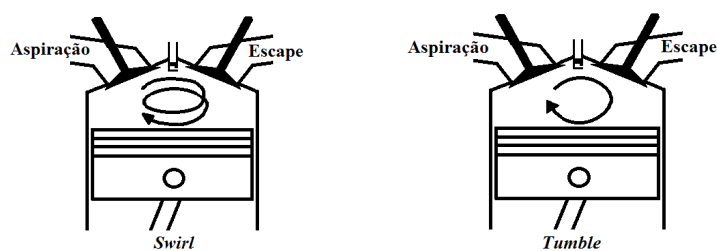
<i>Estrutura de Fluxo</i>	<i>Coefficiente de Swirl</i>	<i>Coefficiente de Tumble</i>
<i>Low Swirl</i>	0,0	3,2
<i>High swirl</i>	3,8	1,1
<i>Medium Swirl and Tumble</i>	1,0	2,2

Observação:

(1) Definição conforme Merker et al (2011):

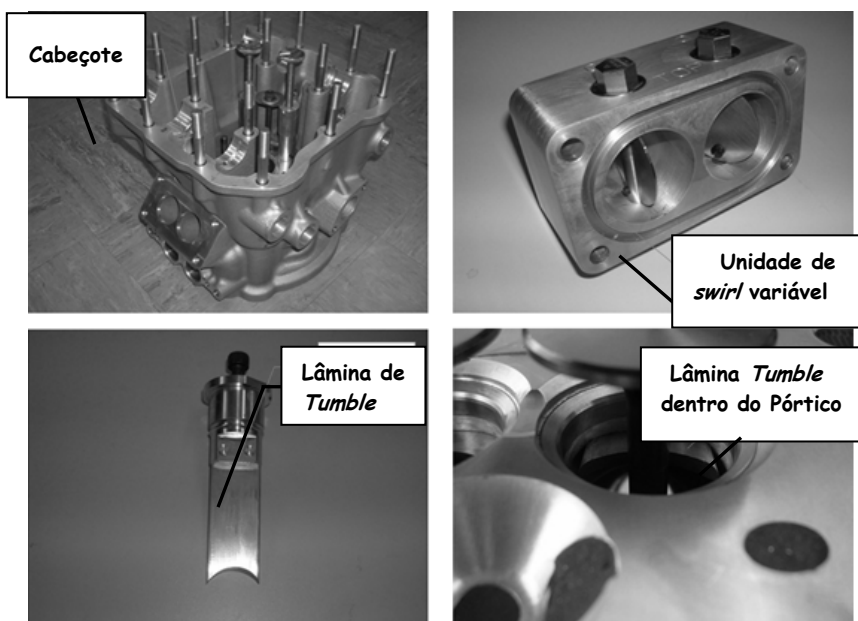
swirl: movimento giratório em torno do eixo do cilindro.

tumble: movimento de turbilhão em torno do eixo transversal do cilindro.



(2) Valores medidos conforme metodologia do fabricante do motor.

Dispositivo de regulagem de *Swirl* e *Tumble*



APÊNDICE C.1

Configuração: sistema *PFI* utilizando *CNG* e $\lambda = 1,0$.

<i>Ângulo do Eixo do Motor (grau)</i>	<i>Lambda</i>	<i>Tipo de Transdutor</i>	<i>Módulo de Bulk (MPa)</i>	<i>Densidade (kg/m³)</i>	<i>Deslocamento do Pistão (mm)</i>
0	1,0	Sensor de pressão	5,98	5,99	0,00
5			8,24	8,15	0,38
10			9,00	8,94	1,52
15			8,28	8,42	3,40
20			6,96	7,34	6,00
25			5,74	6,27	9,29
30			4,71	5,34	13,23
35			3,88	4,57	17,77
40			3,21	3,92	22,87
50			2,27	2,98	34,50
60			1,69	2,34	47,58
70			1,31	1,91	61,59
80			1,05	1,61	75,95
90			0,88	1,40	90,15
0		Vela instrumentada	5,84	5,86	0,00
5			7,89	7,82	0,38
10			8,55	8,53	1,52
15			7,96	8,12	3,40
20			6,81	7,17	6,00
25			5,64	6,16	9,29
30			4,65	5,27	13,23
35			3,84	4,51	17,77
40			3,20	3,89	22,87
50			2,28	2,96	34,50
60			1,70	2,34	47,58
70			1,32	1,91	61,59
80	1,07		1,61	75,95	
90	0,89		1,40	90,15	

APÊNDICE C.2

Configuração: sistema *PFI* utilizando *CNG* e $\lambda = 1,3$.

<i>Ângulo do Eixo do Motor (grau)</i>	<i>Lambda</i>	<i>Tipo de Transdutor</i>	<i>Módulo de Bulk (MPa)</i>	<i>Densidade (kg/m³)</i>	<i>Deslocamento do Pistão (mm)</i>
0	1,3	Sensor de pressão	8,03	8,89	0,00
5			9,63	10,59	0,38
10			10,08	11,18	1,52
15			9,82	11,09	3,40
20			8,37	9,81	6,00
25			6,90	8,44	9,29
30			5,66	7,22	13,23
35			4,65	6,19	17,77
40			3,85	5,33	22,87
50			2,71	4,04	34,50
60		2,00	3,18	47,58	
70		1,56	2,61	61,59	
80		1,26	2,20	75,95	
90		1,06	1,92	90,15	
0		Vela instrumentada	7,88	8,74	0,00
5			9,34	10,31	0,38
10			9,70	10,81	1,52
15			9,48	10,74	3,40
20			8,11	9,53	6,00
25			6,69	8,20	9,29
30	5,50		7,02	13,23	
35	4,51		6,01	17,77	
40	3,74		5,18	22,87	
50	2,66		3,96	34,50	
60	2,00	3,15	47,58		
70	1,57	2,59	61,59		
80	1,28	2,20	75,95		
90	1,07	1,91	90,15		

APÊNDICE C.3

Configuração: sistema *PFI* utilizando *CNG* e $\lambda = 1,5$.

<i>Ângulo do Eixo do Motor (grau)</i>	<i>Lambda</i>	<i>Tipo de Transdutor</i>	<i>Módulo de Bulk (MPa)</i>	<i>Densidade (kg/m³)</i>	<i>Deslocamento do Pistão (mm)</i>
0	1,5	Sensor de pressão	12,04	14,03	0,00
5			14,09	16,33	0,38
10			14,45	16,93	1,52
15			13,68	16,39	3,40
20			11,82	14,67	6,00
25			9,78	12,68	9,29
30			7,97	10,81	13,23
35			6,50	9,22	17,77
40			5,35	7,91	22,87
50			3,74	5,99	34,50
60			2,74	4,70	47,58
70			2,11	3,83	61,59
80			1,69	3,22	75,95
90			1,40	2,78	90,15
0		Vela instrumentada	11,46	13,46	0,00
5			13,26	15,50	0,38
10			13,51	15,97	1,52
15			12,68	15,33	3,40
20			10,90	13,66	6,00
25			9,09	11,86	9,29
30			7,46	10,16	13,23
35			6,14	8,72	17,77
40			5,10	7,53	22,87
50			3,62	5,74	34,50
60	2,69		4,54	47,58	
70	2,10		3,73	61,59	
80	1,69		3,15	75,95	
90	1,41		2,73	90,15	

APÊNDICE C.4

Configuração: sistema *DI* utilizando etanol e $\lambda = 1,0$.

<i>Ângulo do Eixo do Motor (grau)</i>	<i>Lambda</i>	<i>Tipo de Transdutor</i>	<i>Módulo de Bulk (MPa)</i>	<i>Densidade (kg/m³)</i>	<i>Deslocamento do Pistão (mm)</i>
0	1,0	Sensor de pressão	5,17	5,90	0,00
5			7,66	8,81	0,38
10			10,82	12,36	1,52
15			10,84	12,49	3,40
20			9,52	11,25	6,00
25			7,94	9,71	9,29
30			6,55	8,31	13,23
35			5,46	7,15	17,77
40			4,56	6,18	22,87
50			3,29	4,73	34,50
60			2,51	3,77	47,58
70			1,98	3,11	61,59
80			1,62	2,63	75,95
90			1,38	2,29	90,15
0			Vela instrumentada	5,42	6,18
5		7,90		9,08	0,38
10		11,23		12,77	1,52
15		11,26		12,87	3,40
20		10,03		11,69	6,00
25		8,40		10,11	9,29
30		6,94		8,66	13,23
35		5,78		7,45	17,77
40		4,81		6,43	22,87
50		3,43		4,89	34,50
60		2,57		3,87	47,58
70		2,01		3,17	61,59
80		1,62		2,67	75,95
90	1,36	2,32		90,15	

APÊNDICE C.5

Configuração: sistema *DI* utilizando etanol e $\lambda = 1,3$.

<i>Ângulo do Eixo do Motor (grau)</i>	<i>Lambda</i>	<i>Tipo de Transdutor</i>	<i>Módulo de Bulk (MPa)</i>	<i>Densidade (kg/m³)</i>	<i>Deslocamento do Pistão (mm)</i>
0	1,3	Sensor de pressão	8,57	10,58	0,00
5			11,93	14,64	0,38
10			13,15	16,19	1,52
15			12,29	15,44	3,40
20			10,58	13,75	6,00
25			8,77	11,86	9,29
30			7,21	10,16	13,23
35			5,94	8,71	17,77
40			4,92	7,50	22,87
50			3,52	5,72	34,50
60			2,65	4,54	47,58
70			2,10	3,75	61,59
80			1,72	3,18	75,95
90			1,46	2,77	90,15
0		Vela instrumentada	8,58	10,58	0,00
5			11,96	14,66	0,38
10			13,23	16,25	1,52
15			12,44	15,57	3,40
20			10,80	13,93	6,00
25			8,95	12,02	9,29
30			7,42	10,34	13,23
35			6,15	8,90	17,77
40			5,11	7,67	22,87
50			3,64	5,85	34,50
60	2,73		4,63	47,58	
70	2,14		3,81	61,59	
80	1,74		3,22	75,95	
90	1,46		2,80	90,15	

APÊNDICE C.6

Configuração: sistema *DI* utilizando etanol e $\lambda = 1,5$.

<i>Ângulo do Eixo do Motor (grau)</i>	<i>Lambda</i>	<i>Tipo de Transdutor</i>	<i>Módulo de Bulk (MPa)</i>	<i>Densidade (kg/m³)</i>	<i>Deslocamento do Pistão (mm)</i>
0	1,5	Sensor de pressão	11,11	14,33	0,00
5			13,89	17,84	0,38
10			14,50	18,75	1,52
15			13,43	17,73	3,40
20			11,65	15,86	6,00
25			9,71	13,74	9,29
30			8,03	11,81	13,23
35			6,61	10,12	17,77
40			5,45	8,70	22,87
50			3,88	6,63	34,50
60			2,90	5,25	47,58
70			2,26	4,30	61,59
80			1,84	3,64	75,95
90			1,54	3,16	90,15
0		Vela instrumentada	11,16	14,37	0,00
5			14,00	17,94	0,38
10			14,67	18,91	1,52
15			13,61	17,90	3,40
20			11,84	16,03	6,00
25			9,89	13,91	9,29
30			8,18	11,96	13,23
35			6,75	10,26	17,77
40			5,59	8,84	22,87
50			3,98	6,74	34,50
60	2,94		5,31	47,58	
70	2,28		4,34	61,59	
80	1,84		3,66	75,95	
90	1,53		3,17	90,15	

APÊNDICE C.7

Configuração: sistema *DI* etanol, $\lambda = 1,3$, *low swirl*.

Ângulo do Eixo do Motor (°)	Estrut. de Fluxo	Tipo de Transdutor	Módulo de Bulk (MPa)	Densidade (kg/m ³)	Deslocamento do Pistão (mm)
0	<i>low swirl</i>	Sensor de pressão	7,80	9,67	0,00
5			10,27	12,73	0,38
10			12,01	14,92	1,52
15			11,93	14,99	3,40
20			10,79	13,84	6,00
25			9,20	12,17	9,29
30			7,76	10,59	13,23
35			6,48	9,15	17,77
40			5,38	7,89	22,87
50			3,80	5,99	34,50
60			2,82	4,73	47,58
70			2,20	3,87	61,59
80			1,78	3,27	75,95
90			1,50	2,84	90,15
0			Vela instrumentada	9,01	11,07
5		12,13		14,84	0,38
10		13,23		16,25	1,52
15		12,79		15,89	3,40
20		11,15		14,25	6,00
25		9,39		12,42	9,29
30		7,80		10,70	13,23
35		6,45		9,18	17,77
40		5,34		7,91	22,87
50		3,81		6,03	34,50
60		2,82		4,75	47,58
70		2,19		3,89	61,59
80		1,77		3,28	75,95
90	1,48	2,84		90,15	

APÊNDICE C.8

Configuração: sistema *DI* etanol, $\lambda = 1,3$, *medium swirl and tumble*.

<i>Ângulo do Eixo do Motor (°)</i>	<i>Estrut. de Fluxo</i>	<i>Tipo de Transdutor</i>	<i>Módulo de Bulk (MPa)</i>	<i>Densidade (kg/m³)</i>	<i>Deslocamento do Pistão (mm)</i>
0	<i>medium swirl and tumble</i>	Sensor de pressão	7,73	9,42	0,00
5			10,09	12,31	0,38
10			11,24	13,81	1,52
15			11,10	13,83	3,40
20			9,79	12,55	6,00
25			8,14	10,86	9,29
30			6,65	9,27	13,23
35			5,45	7,93	17,77
40			4,51	6,82	22,87
50			3,24	5,23	34,50
60			2,49	4,20	47,58
70			2,00	3,48	61,59
80			1,64	2,96	75,95
90			1,38	2,58	90,15
0		Vela instrumentada	7,99	9,71	0,00
5			10,61	12,89	0,38
10			11,96	14,57	1,52
15			12,00	14,70	3,40
20			10,65	13,37	6,00
25			8,80	11,52	9,29
30			7,24	9,88	13,23
35			5,96	8,47	17,77
40			4,93	7,29	22,87
50			3,51	5,56	34,50
60	2,63		4,40	47,58	
70	2,05		3,61	61,59	
80	1,66		3,05	75,95	
90	1,38		2,64	90,15	

APÊNDICE C.9

Configuração: sistema *DI* etanol, $\lambda = 1,3$, *high swirl*.

<i>Ângulo do Eixo do Motor (grau)</i>	<i>Estrut. de Fluxo</i>	<i>Tipo de Transdutor</i>	<i>Módulo de Bulk (MPa)</i>	<i>Densidade (kg/m³)</i>	<i>Deslocamento do Pistão (mm)</i>	
0	<i>high swirl</i>	Sensor de pressão	9,24	11,29	0,00	
5			11,85	14,45	0,38	
10			13,08	15,97	1,52	
15			11,61	14,64	3,40	
20			9,71	12,76	6,00	
25			8,03	10,99	9,29	
30			6,64	9,45	13,23	
35			5,55	8,16	17,77	
40			4,66	7,08	22,87	
50			3,40	5,46	34,50	
60			2,57	4,34	47,58	
70			2,04	3,59	61,59	
80			1,70	3,07	75,95	
90			1,44	2,67	90,15	
0		<i>high swirl</i>	Vela instrumentada	9,38	11,43	0,00
5				12,14	14,75	0,38
10				13,54	16,41	1,52
15				11,97	14,99	3,40
20				10,14	13,19	6,00
25				8,44	11,41	9,29
30	7,04			9,85	13,23	
35	5,84			8,48	17,77	
40	4,88			7,33	22,87	
50	3,50			5,60	34,50	
60	2,60			4,43	47,58	
70	2,06			3,65	61,59	
80	1,69			3,09	75,95	
90	1,43			2,70	90,15	

APÊNDICE C.10

Configuração: sistema *DI CNG*, $\lambda = 1,0$, *low swirl*.

<i>Ângulo do Eixo do Motor (grau)</i>	<i>Lambda</i>	<i>Tipo de Transdutor</i>	<i>Módulo de Bulk (MPa)</i>	<i>Densidade (kg/m³)</i>	<i>Deslocamento do Pistão (mm)</i>
0	1,0	Sensor de pressão	6,84	6,84	0,00
5			8,88	8,80	0,38
10			9,53	9,50	1,52
15			9,05	9,20	3,40
20			7,75	8,12	6,00
25			6,44	6,99	9,29
30			5,36	6,01	13,23
35			4,47	5,19	17,77
40			3,75	4,50	22,87
50			2,75	3,48	34,50
60			2,08	2,78	47,58
70			1,63	2,28	61,59
80			1,32	1,93	75,95
90			1,12	1,68	90,15

APÊNDICE C.11

Configuração: sistema *DI CNG*, $\lambda = 1,3$, *low swirl*.

<i>Ângulo do Eixo do Motor (grau)</i>	<i>Lambda</i>	<i>Tipo de Transdutor</i>	<i>Módulo de Bulk (MPa)</i>	<i>Densidade (kg/m³)</i>	<i>Deslocamento do Pistão (mm)</i>
0	1,3	Sensor de pressão	9,18	10,17	0,00
5			11,57	12,67	0,38
10			12,08	13,35	1,52
15			11,36	12,85	3,40
20			9,73	11,41	6,00
25			8,03	9,81	9,29
30			6,65	8,45	13,23
35			5,51	7,28	17,77
40			4,59	6,30	22,87
50			3,30	4,84	34,50
60			2,47	3,84	47,58
70			1,93	3,15	61,59
80			1,55	2,66	75,95
90			1,30	2,31	90,15

APÊNDICE C.12

Configuração: sistema *DI* CNG, $\lambda = 1,5$, *low swirl*.

<i>Ângulo do Eixo do Motor (grau)</i>	<i>Lambda</i>	<i>Tipo de Transdutor</i>	<i>Módulo de Bulk (MPa)</i>	<i>Densidade (kg/m³)</i>	<i>Deslocamento do Pistão (mm)</i>
0	1,5	Sensor de pressão	12,68	14,67	0,00
5			15,52	17,76	0,38
10			16,10	18,61	1,52
15			14,89	17,66	3,40
20			12,56	15,50	6,00
25			10,26	13,24	9,29
30			8,36	11,28	13,23
35			6,84	9,63	17,77
40			5,65	8,29	22,87
50			4,01	6,31	34,50
60			3,00	5,01	47,58
70			2,35	4,13	61,59
80			1,91	3,49	75,95
90			1,60	3,04	90,15

APÊNDICE C.13

Configuração: sistema *DI CNG*, $\lambda = 1,3$, *medium swirl and tumble*.

<i>Ângulo do Eixo do Motor (grau)</i>	<i>Estrut. de Fluxo</i>	<i>Tipo de Transdutor</i>	<i>Módulo de Bulk (MPa)</i>	<i>Densidade (kg/m³)</i>	<i>Deslocamento do Pistão (mm)</i>
0	<i>medium swirl and tumble</i>	Sensor de pressão	5,85	6,42	0,00
5			7,22	7,86	0,38
10			7,79	8,54	1,52
15			7,51	8,39	3,40
20			6,51	7,53	6,00
25			5,40	6,50	9,29
30			4,43	5,56	13,23
35			3,64	4,77	17,77
40			3,03	4,12	22,87
50			2,15	3,14	34,50
60			1,59	2,48	47,58
70			1,24	2,03	61,59
80			1,00	1,72	75,95
90	0,84	1,49	90,15		

APÊNDICE C.14

Configuração: sistema *DI CNG*, $\lambda = 1,3$, *high swirl*.

<i>Ângulo do Eixo do Motor (grau)</i>	<i>Estrut. de Fluxo</i>	<i>Tipo de Transdutor</i>	<i>Módulo de Bulk (MPa)</i>	<i>Densidade (kg/m³)</i>	<i>Deslocamento do Pistão (mm)</i>
0	<i>high swirl</i>	Sensor de pressão	8,75	9,42	0,00
5			10,44	11,18	0,38
10			10,72	11,61	1,52
15			9,69	10,79	3,40
20			8,13	9,41	6,00
25			6,67	8,06	9,29
30			5,50	6,91	13,23
35			4,54	5,93	17,77
40			3,77	5,12	22,87
50			2,69	3,91	34,50
60			2,02	3,10	47,58
70			1,59	2,56	61,59
80			1,30	2,18	75,95
90			1,10	1,89	90,15