

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**IDENTIFICAÇÃO DE FONTES DE RUÍDO EXTERNO
DE UM VEÍCULO UTILIZANDO A TÉCNICA DE
INTENSIDADE SONORA**

Dissertação de Mestrado submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Wagner Duarte Machado

Florianópolis, Agosto de 2003

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**IDENTIFICAÇÃO DE FONTES DE RUÍDO EXTERNO
DE UM VEÍCULO UTILIZANDO A TÉCNICA DE
INTENSIDADE SONORA**

Wagner Duarte Machado

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
Sendo aprovada em sua forma final.**

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

José Antônio Belline da Cunha Neto – Coordenador do curso

BANCA EXAMINADORA

Roberto Jordan – Dr. Eng.

Lauro César Nicolazzi – Dr. Eng.

César José Deschamps – Ph.D.

“Ó profundidade das riquezas, tanto da sabedoria como da ciência de Deus! Quão insondáveis são os seus juízos, e quão inescrutáveis, os seus caminhos! Quem, pois, conheceu a mente do Senhor? Ou quem foi o seu conselheiro? Ou quem primeiro deu a ele para que lhe venha a ser restituído? Porque dele, e por meio dele, e para ele são todas as coisas. A ele, pois, a glória eternamente. Amém!”

**Ao Senhor Jesus Cristo, fonte de todo o
Conhecimento, e razão de todas as coisas.**

**A minha esposa Valéria e a minha filha Stephanie,
Pelos momentos preciosos de convívio que foram
privados durante a realização deste trabalho.**

Agradecimentos

À Deus por me sustentar e me dar condições de realizar este trabalho.

Ao professor Samir N. Y. Gerges pela sua ajuda e orientação no desenvolvimento deste trabalho e disponibilidade ao longo do curso.

À Fiat Automóveis e ao Setor de Experimentação Veículos e, em especial aos Engenheiros Marco Fabio Inglese e Luiz Fernando B. Máximo, pelo apoio e estrutura fornecidos durante a etapa experimental.

Aos professores do curso de mestrado que contribuíram para a minha formação.

À Dra. Silvana Arrivabeni Rizzioli pela estrutura fornecida durante o período letivo e pelas constantes palavras que transmitiram confiança e incentivo.

Ao engenheiro Marco Pinheiro (Campo de Provas FIRESTONE) pela cortesia em disponibilizar os pneus *sleek*

Ao amigo João Batista Carvalho pela grande ajuda nos momentos decisivos na execução dos testes experimentais.

Aos colaboradores do setor de Acústica e Vibração Jeferson, Gilmar, Edvar, Donizete e Evando, pela dedicação na preparação e precisão na condução dos testes experimentais.

Sumário

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	viii
Simbologia	ix
Resumo	xi
Abstract	xii
Capítulo 1 INTRODUÇÃO	1
Capítulo 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Ruído Externo Veicular e a Situação Legislativa no Brasil.....	7
2.1.1 Limites de ruído na condição estática.....	8
2.1.2 Limites de ruído na condição dinâmica.....	10
2.2 Principais Fontes de Ruído Externo.....	14
2.2.1 Ruído proveniente do motor.....	14
2.2.2 Ruído proveniente do sistema de aspiração.....	17
2.2.3 Ruído proveniente do sistema de exaustão.....	19
2.2.4 Ruído proveniente dos pneus.....	23
2.3 Técnicas de Identificação de Fontes de Ruído Externo.....	24
2.3.1 Medições de ruído externo utilizando o sistema telemetrado..	25
2.3.2 Método por abafamento de fontes.....	26
2.3.3 Técnica de intensidade sonora.....	27
2.3.4 Técnica de holografia acústica.....	30
Capítulo 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA INTENSIDADE SONORA..	32
3.1 Princípios de Medição de Intensidade Sonora.....	32
3.2 Medição de Intensidade Sonora.....	34
3.3 Campos Sonoros..	37

3.4	Erros inerentes a Técnica de Medição de Intensidade Sonora.....	39
3.4.1	Erro de diferença finita.....	39
3.4.2	Erro de diferença de fase.....	41
3.4.3	Erro de estimativa de espectro.....	48
3.4.4	Erro de pesquisa de difração.....	48
3.4.5	Erro de direcionamento da sonda.....	48
3.5	Calibração.....	49
Capítulo 4	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	51
4.1	Metodologia das Provas.....	51
4.2	Especificações Técnicas do veículo.....	52
4.3	Aplicação da Técnica de Intensidade Sonora.....	53
4.3.1	Determinação dos parâmetros de prova.....	53
4.3.2	Medição de Intensidade sonora.....	55
4.3.3	Calibração do equipamento de medição.....	57
4.3.4	Validação das medições de intensidade sonora.....	58
4.4	Aplicação da Técnica de Abafamento das fontes.....	59
4.4.1	Procedimento utilizado para abafamento das fontes.....	59
4.4.2	Quantificação das fontes de ruído externo.....	65
4.5	Aparato Técnico Experimental.....	66
Capítulo 5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
5.1	Apresentação dos Resultados.....	67
5.2	Resultados Obtidos nas Medições de Intensidade Sonora.....	67
5.2.1	Parâmetros de prova de intensidade sonora.....	67
5.2.2	Validação das medições de intensidade sonora.....	69
5.2.3	Análise dos mapas de intensidade sonora.....	71
5.2.4	Análise espectral de intensidade sonora.....	80
5.2.5	Classificação das fontes sonoras.....	83
5.3	Resultados Obtidos Através da Metodologia <i>Quiet-car</i>	85
5.3.1	Níveis de ruído externo.....	85
5.3.2	Classificação das fontes sonoras.....	96
5.4	Correlação dos Resultados Obtidos nas Duas Metodologias.....	98
5.4.1	Confronto dos <i>ranking</i>	98

5.4.2	Confronto dos espectros.....	99
5.4.2	Direcionalidade do fluxo de intensidade sonora.....	102
Capítulo 6	APLICAÇÃO PRÁTICA	105
6.1	Avaliação do comportamento acústico do veículo após a modificação da principal fonte identificada.....	105
6.1.1	Descrição das modificações do sistema de escape.....	105
6.1.2	Níveis de ruído externo.....	106
6.1.3	Resultado final.....	109
Capítulo 7	CONCLUSÕES.....	110
Bibliografia.....		113

Lista de Figuras

Figura 1.1	Fluxograma das atividades realizadas neste trabalho.....	4
Figura 2.1	Procedimento para medição de ruído externo na condição estática.....	8
Figura 2.2	Procedimento para medição de ruído externo na condição dinâmica.....	11
Figura 2.3	Componentes internos fixos e móveis do motor	16
Figura 2.4	Componentes internos da caixa de câmbio.....	17
Figura 2.5	Sistema de aspiração.....	18
Figura 2.6	Câmara de <i>Helmholtz</i>	19
Figura 2.7	Configuração básica do sistema de escape.....	20
Figura 2.8	Configurações dos abafadores.....	21
Figura 2.9	Princípio do controle ativo.....	22
Figura 2.10	Catalisador.....	23
Figura 2.11	Aspectos construtivos do pneu.....	24
Figura 2.12	Gráficos de medição de ruído externo por telemetria.....	26
Figura 2.13	Esquema de abafamento das fontes de ruído.....	27
Figura 2.14	Grade de referência para medição de intensidade sonora.....	28

Figura 2.15	Mapa de intensidade sonora.....	28
Figura 2.16	Sistema de holografia acústica.....	30
Figura 2.17	Simulação computacional do campo vetorial em medição de holografia acústica.....	31
Figura 3.1	Energia transportada através da área dA na direção r	32
Figura 3.2	Sonda de intensidade sonora.....	35
Figura 3.3	Câmara anecóica.....	37
Figura 3.4	Câmara reverberante.....	38
Figura 3.5	Parcelas ativa e reativa do campo sonoro.....	39
Figura 3.6	Aproximação do gradiente de pressão em baixas freqüências.....	40
Figura 3.7	Aproximação do gradiente de pressão em altas freqüências.....	40
Figura 3.8	Análise dos erros em altas freqüências em função dos espaçadores.....	41
Figura 3.9	Erro de diferença de fase subestimado em baixas freqüências.....	43
Figura 3.10	Erro de diferença de fase superestimado em baixas freqüências.....	43
Figura 3.11	Deslocamento angular do eixo mínimo.....	44

Figura 3.12	Acoplador para calibração da sonda de intensidade sonora....	45
Figura 3.13	Erro na estimativa de intensidade.....	47
Figura 3.14	Capacitação dinâmica da instrumentação.....	47
Figura 3.15	Calibração da pressão sonora.....	49
Figura 3.16	Verificação da velocidade de partícula.....	50
Figura 3.17	Medição da pressão – intensidade residual.....	50
Figura 4.1	Sistema telemetrado para medição de ruído externo.....	54
Figura 4.2	Medição de intensidade sonora.....	57
Figura 4.3	Esquema do volume utilizado na atenuação do ruído de aspiração.....	60
Figura 4.4	Posicionamento do volume na entrada da aspiração de ar.....	61
Figura 4.5	Esquema do volume utilizado na atenuação do ruído de boca de escape.....	62
Figura 4.6	Posicionamento do volume nas proximidades da saída dos gases de escape.....	62
Figura 4.7	Pneu <i>sleek</i>	63
Figura 4.8	Isolamento da parte inferior.....	64
Figura 4.9	Isolamento das laterais.....	64
Figura 4.10	Isolamento da parte central.....	65

Figura 4.11	Isolamento da parte traseira.....	65
Figura 4.12	Medição de ruído das fontes.....	66
Figura 4.13	Analísadores de dados.....	66
Figura 5.1	Curvas dos níveis de ruído externo em 2ª marcha.....	68
Figura 5.2	Curvas dos níveis de ruído externo em 3ª marcha.....	68
Figura 5.3	Índice de pressão – intensidade residual.....	70
Figura 5.4	Índice de pressão – intensidade.....	70
Figura 5.5	Capacitação dinâmica da instrumentação.....	71
Figura 5.6	Mapas de intensidade sonora – freqüências de 100 a 5000Hz.....	73
Figura 5.7	Mapas de intensidade sonora – freqüências de 125 a 160 Hz.....	74
Figura 5.8	Mapas de intensidade sonora - freqüências de 250 a 315 Hz.....	75
Figura 5.9	Mapas de intensidade sonora - freqüências de 400 a 500 Hz.....	76
Figura 5.10	Mapas de intensidade sonora - freqüências de 1000 a 2000 Hz.....	77
Figura 5.11	Mapas de intensidade sonora - freqüências de 500 a 630 Hz.....	78

Figura 5.12	Mapas de vetores do pneu medido isoladamente.....	80
Figura 5.13	Pontos de referência para obtenção dos espectros de intensidade sonora.....	81
Figura 5.14	Espectros de intensidade sonora de cada fonte.....	81
Figura 5.15	Confronto dos espectros obtidos pelo pneu individualmente e na condição de plena carga.....	83
Figura 5.16	Áreas utilizadas para cálculo da potência sonora de cada fonte.....	83
Figura 5.17	Área do pneu utilizada para cálculo da potência sonora.....	84
Figura 5.18	Classificação das fontes sonoras – metodologia de intensidade sonora.....	84
Figura 5.19	Níveis de ruído de passagem medidos no veículo sem o abafamento das fontes.....	86
Figura 5.20	Níveis de ruído de passagem medidos no veículo com a boca de escape individualizada.....	87
Figura 5.21	Níveis de ruído de passagem medidos no veículo com o sistema de aspiração individualizado.....	88
Figura 5.22	Níveis de ruído de passagem medidos no veículo com o conjunto motopropulsor individualizado.....	89
Figura 5.23	Níveis de ruído de passagem medidos no veículo com a parede do sistema de escape individualizado.....	90

Figura 5.24	Níveis de ruído de passagem medidos no veículo com os pneus individualizados.....	91
Figura 5.25	Confronto das curvas de ruído entre as fontes individuais – 2ª marcha (LE)	92
Figura 5.26	Confronto das curvas de ruído entre as fontes individuais – 2ª marcha (LD)	93
Figura 5.27	Confronto das curvas de ruído entre as fontes individuais – 3ª marcha (LE)	93
Figura 5.28	Confronto das curvas de ruído entre as fontes individuais – 3ª marcha (LD)	94
Figura 5.29	Confronto entre as curvas de ruído medidas no veículo na condição base e as curvas de ruído originadas da soma das fontes individuais.....	95
Figura 5.30	Classificação das fontes sonoras pela média dos valores máximos – metodologia <i>quiet car</i>	96
Figura 5.31	Classificação das fontes sonoras em 2ª e 3ª marchas isoladamente – metodologia <i>quiet car</i>	97
Figura 5.32	Confronto entre os <i>rankings</i> obtidos pelas duas metodologias..	98
Figura 5.33	Confronto entre os <i>ranking</i> obtidos pelas duas metodologias, considerando a boca e parede de escape como uma fonte única.....	99
Figura 5.34	Comparativo entre os espectros obtidos das medições da boca de escape.....	100

Figura 5.35	Comparativo entre espectros obtidos das medições do sistema de aspiração.....	100
Figura 5.36	Comparativo entre espectros obtidos das medições do conjunto motopropulsor.....	101
Figura 5.37	Comparativo entre espectros obtidos das medições da parede de escape.....	101
Figura 5.38	Comparativo entre espectros obtidos das medições dos pneus.....	102
Figura 5.39	Vista superior do mapa de vetores sobreposto indicando a direção do fluxo de intensidade sonora correlacionado com a curva de ruído.....	103
Figura 5.40	Vista lateral do mapa de vetores sobreposto indicando a direção do fluxo de intensidade sonora.....	104
Figura 6.1	Modificações do sistema de escape.....	106
Figura 6.2	Níveis de ruído externo em 2ª marcha após modificação do sistema de escape.....	107
Figura 6.3	Níveis de ruído externo em 3ª marcha após modificação do sistema de escape.....	107
Figura 6.4	Confronto dos níveis de ruído externo entre condição inicial e após modificação do sistema de escape.....	108
Figura 6.5	Resultados de ruído de passagem conforme Resolução CONAMA.....	109

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Limites de ruído nas proximidades do escapamento.....	9
Tabela 2.2	Limites de ruído de passagem que vigoraram a partir de 1971.....	11
Tabela 2.3	Limites de ruído de passagem que vigoraram a partir de 1994.....	12
Tabela 2.4	Novos limites que passaram a vigorar a partir de 2002.....	13
Tabela 3.1	Erro de direcionamento da sonda para vários ângulos.....	48
Tabela 4.1	Especificações técnicas do veículo.....	52
Tabela 4.2	Dados para execução da prova de ruído de passagem.....	54
Tabela 4.3	Condições ambientais do teste de ruído externo.....	55
Tabela 4.4	Dados dimensionais dos pneus utilizados para provas de ruído de passagem.....	63
Tabela 4.5	Dados para execução da prova de ruído de passagem.....	64
Tabela 5.1	Parâmetros de prova para medição de intensidade sonora sobre rolo.....	67
Tabela 5.2	Dispersões de prova de ruído de passagem.....	69
Tabela 5.3	Níveis máximos de ruído medidos em cada fonte.....	92

Simbologia

B	largura de banda
c	velocidade do som no meio
CV	Potência em cavalo vapor
E	energia sonora
\vec{I}	vetor Intensidade sonora
I_r	Intensidade na direção r
I_{ref}	intensidade sonora de referencia ($1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$)
F	força
F_o	freqüência de corte
G_{AB}	densidade espectral cruzada dos sinais de pressão dos dois microfones, A e B
Hz	hertz
K	número de ondas
KW	potência em kilowatt
L_d	capacidade dinâmica
L_{erro}	erro de estimativa de espectro
L_l	nível de intensidade sonora
L_{lo}	nível de intensidade residual
L_p	nível de pressão
L_ϕ	índice de erro de fase
$I_{r,inst}$	intensidade sonora instantânea
p	pressão sonora
pa	pressão sonora em pascal
p_a	pressão atmosférica

P_A	pressão sonora do microfone A
P_B	pressão sonora do microfone B
P_t	pressão total
r	direção de propagação
rms	raiz média quadrática
t	tempo
T	tempo médio efetivo
u	velocidade de partícula
Δr	distância do espaçador entre microfones
Δp	diferença de pressão
δ_{PI_0}	índice de pressão – intensidade residual
δ_{PI}	índice de pressão – intensidade
φ	erro de fase
ρc	impedância do meio
ρ_0	densidade do meio
λ	comprimento de onda
ω	velocidade angular
ψ	ângulo de direcionamento de sonda

Resumo

O presente trabalho de pesquisa tem como objetivo avaliar a viabilidade de se utilizar a técnica de intensidade sonora como uma metodologia alternativa de identificação de fontes de ruído externo de um veículo automotor. A metodologia consiste em medir o fluxo de intensidade sonora irradiado em toda a superfície lateral do veículo, montado sobre rolo dinamométrico no interior de uma câmara semi-anecóica. Como complemento será realizada uma correlação entre os dados medidos em campo próximo às fontes por meio desta técnica, e os dados medidos em campo distante por meio da técnica de abafamentos das fontes, denominada *quiet car*.

O trabalho é composto de uma etapa de estudo teórico, uma etapa experimental, e finalmente uma etapa de análise dos resultados.

O estudo teórico baseia-se em uma revisão bibliográfica sobre a situação legislativa referente aos limites de ruído externo, algumas considerações sobre as fontes de ruído e as principais técnicas de identificações destas fontes. Serão abordados também nesta etapa os princípios teóricos da técnica de medição de intensidade sonora.

Na etapa experimental serão descritos os procedimentos utilizados para realização dos testes, nas duas metodologias utilizadas.

Na terceira etapa, serão analisados e discutidos os resultados obtidos pelas duas metodologias separadamente, e posteriormente em conjunto, de forma a obter uma correlação entre as duas condições de medições, alcançando assim o objetivo principal deste trabalho.

Abstract

The present research work has as objective evaluates the viability of using the technique of sound intensity as an alternative methodology of identification of sources of external noise of a self-driven vehicle. The methodology consists of measuring the flow of sound intensity irradiated in the whole lateral surface of the vehicle, mounted on the roll test bench inside in an anechoic room. As complement will be accomplished a correlation among the measured data in close field to the sources through this technique, and the measured data in distant field through the technique of stiffness of the sources, denominated quiet car.

The work is composed of a stage of theoretical study, an experimental stage, and finally a stage of analysis of the results.

The theoretical study bases on a bibliographical revision about the legislative situation regarding the limits of external noise, some considerations on the noise sources and the main techniques of identifications of these sources. They will also be approached in this stage the theoretical beginnings of the technique of measurement of resonant intensity.

In the experimental stage the procedures will be described used for accomplishment of the tests, in the two used methodologies.

In the third stage, they will be analyzed and discussed the results obtained by the two methodologies separately, and later together in way to obtain a correlation among the two conditions of measurements, reaching like this the main objective of this work.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A redução dos níveis de ruído externo emitidos tanto por veículos de passageiros como por veículos comerciais tem se tornado fator de interesse cada vez maior por parte das montadoras. Os motivos desta preocupação, sem se considerar a ordem de importância, são os seguintes:

1. As legislações ambientais, especialmente a europeia, estão cada vez mais rigorosas no que diz respeito aos limites dos níveis de ruído externo impostos para veículos automotores;
2. O acelerado progresso tecnológico no ramo automobilístico, que coloca no mercado um número cada vez maior de veículos em circulação, fazendo com que os mesmos se tornem as principais fontes de ruído nos centros urbanos, local de maior concentração e emissão de ruído;
3. A tendência atual de se fabricar veículos cada vez mais potentes, tanto nas categorias leves de passeio como nas categorias comerciais;
4. Aumento do risco de danos à saúde física e mental, e particularmente danos à audição, em pessoas que são expostas por longos períodos ao ruído de trânsito;
5. O conforto acústico proporcionado pelo veículo se tornou nos últimos anos fator decisivo na escolha de um veículo, em meio a uma concorrência cada vez mais acirrada.

Atentas aos danos que o ruído veicular pode acarretar à sociedade, as legislações governamentais impõem limites cada vez mais severos. Sendo assim, já em fase de idealização, os veículos são projetados de forma que emitam níveis de ruído externo o mais baixos possível. Entretanto, somente sobre o produto acabado é que se pode mensurar de forma segura, por meio de provas experimentais, o seu comportamento acústico externo.

A necessidade de uma ação imediata para redução dos níveis de ruído surge quando, durante testes preliminares de ruído externo realizados sobre o veículo, ainda em fase protótipo, são constatados níveis acima dos limites estabelecidos. Entretanto, o procedimento padrão de ensaio de ruído de passagem determinado pela legislação informa, a princípio, apenas o valor genérico do ruído externo do veículo. Logo, para redução destes níveis com a máxima eficiência, é necessário obter informações detalhadas sobre as fontes individuais e suas influências no nível de ruído global. Isto inclui informações sobre a localização das fontes sonoras individualmente e seus respectivos níveis de emissão sonora. Para tal, a utilização de uma técnica eficaz e segura é um fator fundamental para a montadora, para que se possam tomar medidas práticas para redução dos níveis de ruído em tempo hábil, de forma que o veículo possa ser produzido atendendo à legislação em questão.

Esta dissertação busca pesquisar a viabilidade de se utilizar uma metodologia alternativa para identificar e quantificar as fontes de ruído externo de um veículo utilizando a técnica de intensidade sonora. A metodologia consiste em medir o fluxo da energia sonora irradiada na superfície lateral do veículo, montado sobre rolos dinamométrico no interior de uma câmara semi-aneecóica, de forma a reproduzir condições bastante próximas das realizadas em pista. Os parâmetros de prova serão obtidos preliminarmente através de medição de ruído externo na condição dinâmica em pista utilizando o sistema telemetrado, o qual fornece informações sobre a velocidade, rotação, a lateral e a posição em que ocorre o maior nível de ruído. Com base nos mapas de iso-intensidade proporcionados pela técnica intensidade sonora, os quais determinam as regiões de maiores níveis de energia sonora, será elaborado um *ranking* das fontes de ruído externo. Entretanto, as questões que procuram-se responder são:

1. A intensidade sonora é um parâmetro adequado para identificação de fontes de ruído externo de um veículo?
2. A identificação das fontes de ruído externo através de medições em um campo próximo às respectivas fontes, característica peculiar da técnica de intensidade sonora, representa a mesma condição de medição em campo distante, conforme o procedimento de prova de ruído de passagem?

Para responder estas questões, será estabelecida uma correlação entre a técnica proposta e a técnica de enclausuramento das fontes de ruído, denominada *quiet car*, através da qual será possível quantificar individualmente as fontes de ruído externo através de medições em campo distante. Da mesma forma, será elaborado um ranking das principais fontes, com base nos resultados apresentados em 2ª e 3ª marcha. A correlação será obtida pelo confronto dos resultados em comum obtidos pelas duas técnicas.

Em uma etapa posterior, será avaliado o efeito causado pela intervenção de melhoria na principal fonte identificada, onde serão confrontados os níveis de ruído de passagem obtidos nesta condição e os respectivos níveis obtidos na condição base.

O fluxograma que será demonstrado na Fig. 1.1 representa de forma mais clara esta estratégia de trabalho.

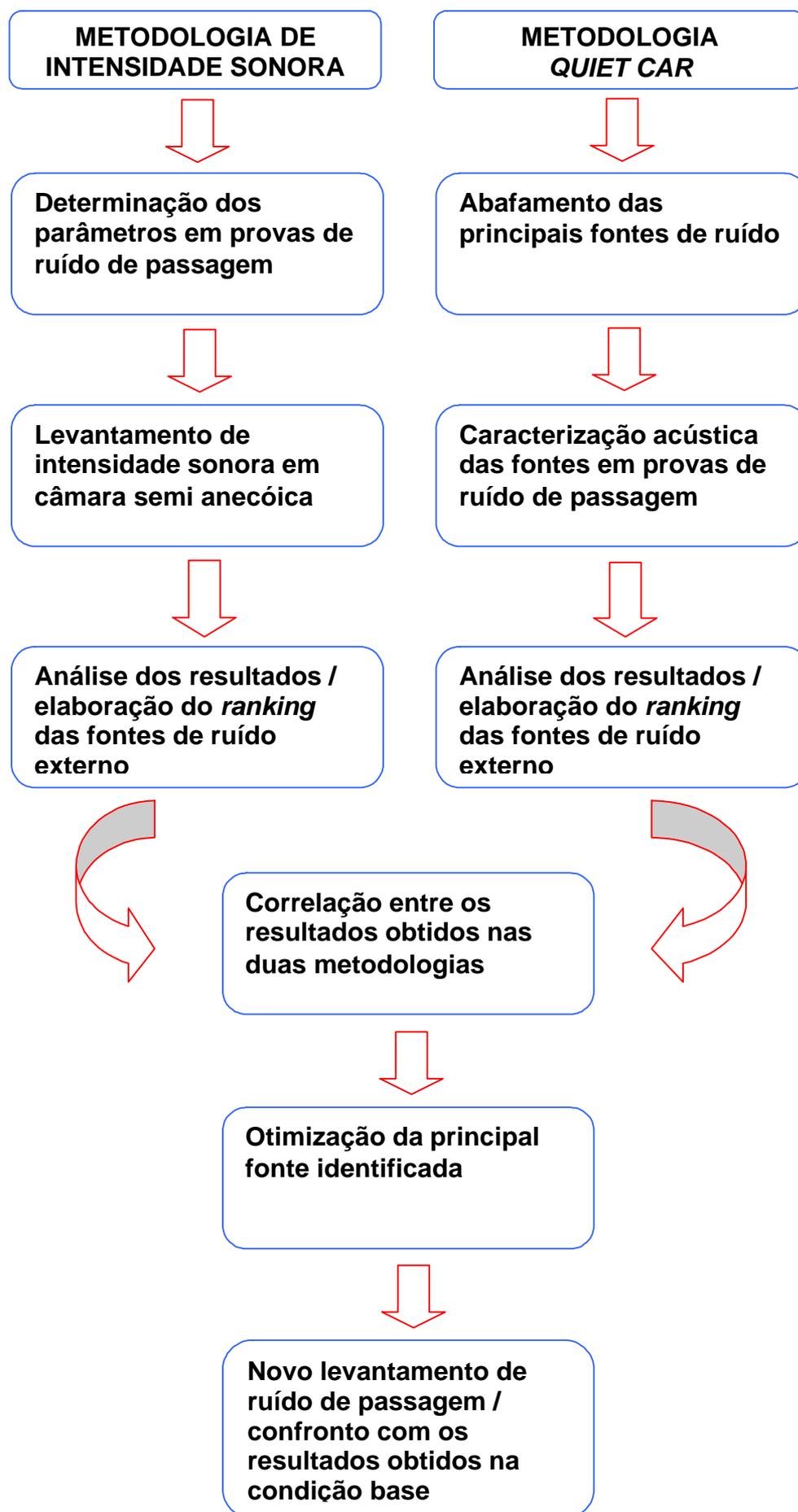


Figura 1.1 Fluxograma das atividades realizadas neste trabalho

Pretende-se com isto obter as seguintes contribuições:

- Redução do tempo de desenvolvimento de um novo projeto, quando houver a necessidade de uma pesquisa de fontes de ruído externo;
- Redução do número de provas realizadas em estrada, com conseqüente redução de riscos e custos de deslocamentos;
- Menor custo durante o desenvolvimento do veículo, uma vez que a técnica dispensa o uso de aparatos utilizados para individualização das fontes;

Finalmente, pretende-se que este estudo possa servir de base e incentivo para que outras aplicações da técnica de intensidade sonora sejam desenvolvidas no ramo automobilístico, buscando sempre um aprimoramento contínuo de seu conteúdo técnico.

Deste modo, os assuntos explanados acima serão abordados detalhadamente neste trabalho da seguinte forma:

Capítulo 2: apresenta um histórico sobre a evolução dos limites de ruído externo impostos pela legislação brasileira desde sua instituição, bem como o procedimento experimental para determinação dos níveis de ruído. Apresenta também algumas considerações sobre as principais fontes de ruído externo de um veículo automotor e uma revisão bibliográfica sobre as principais metodologias empregadas para identificação de fontes de ruído em um veículo, destacando a intensidade sonora como a metodologia mais eficaz e prática para esta finalidade.

Capítulo 3: aborda os princípios fundamentais da técnica de intensidade sonora, a influência do campo sonoro na medição, erros inerentes a esta técnica e a calibração do sistema de medição.

Capítulo 4: aborda as duas metodologias utilizadas para identificação de fontes de ruído externo, bem como os respectivos procedimentos experimentais, detalhando as características técnicas dos instrumentos e aparelhos utilizados.

Capítulo 5: apresenta e discute os resultados obtidos nas provas e verifica a correlação entre as duas metodologias empregadas, por meio de confronto dos resultados.

Capítulo 6: avalia a performance acústica obtida com a otimização da principal fonte identificada, mostrando assim a importância de um trabalho de identificação de fontes e o emprego de uma metodologia prática e confiável.

Capítulo 7: expõe as conclusões, mostrando que a intensidade sonora é um parâmetro confiável para identificação de fontes de ruído externo. Neste capítulo são também apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ruído Externo Veicular e a Situação Legislativa no Brasil

O ruído externo veicular é regulamentado em países praticamente do mundo inteiro pelos seus respectivos órgãos legislativos, os quais estabelecem limites para controle do ruído emitido por veículos em circulação, bem como o procedimento de ensaios experimentais sobre veículos para determinação dos níveis de ruído, nas condições estática e dinâmica¹, seguindo padrões internacionais.

No Brasil, o ruído externo veicular atualmente é regulamentado pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, através da Resolução 01/93 [01]. As montadoras são obrigadas a comprovar o atendimento de seus veículos, tanto nacionais como importados, aos limites de ruídos estabelecidos pela legislação vigente, mediante a apresentação prévia do relatório de Auto Certificação de Ruído Externo² que apresenta os resultados dos ensaios realizados conforme procedimentos estabelecidos pela legislação em questão, tanto na condição estática como dinâmica. O processo de homologação é feito mediante a obtenção, junto ao IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente, da Licença para Uso da Configuração do Veículo – LCVM [02].

¹ Conforme Art. 2º da Resolução CONAMA 01/93, os ensaios para medição dos níveis de ruído para fins desta Resolução, deverão ser feitos de acordo com as normas brasileiras NBR 8433 – Ruído emitido de veículos automotores em aceleração, e NBR 9714 – Ruído de veículos automotores na condição parado, no que se refere à medição de ruído nas proximidades do escapamento.

² Conforme § 3º do Art. 5º da Resolução CONAMA 01/93, os relatórios de verificação de protótipo de todas as famílias e respectivas configurações mestre, devem conter o anexo A desta Resolução e ser enviados ao IBAMA, antes da data de início de produção e / ou vigência dos respectivos limites máximos de ruído.

2.1.1 Limites de Ruído na Condição Estática

O ensaio para medição de ruído na condição estática é conduzido conforme procedimento descrito pela norma NBR 9714 [03]. De acordo com esta norma³, a medição é realizada, conforme a Fig. 2.1, com o microfone posicionado na altura do orifício de saída dos gases, porém a não menos de 0,2 m da superfície do solo. A membrana do microfone deve ser orientada formando um ângulo de 45° em relação à linha longitudinal do tubo de saída dos gases, paralela ao plano horizontal da pista, a 0,5 m de distância da boca de escape. O motor deve funcionar a uma rotação constante correspondente a $\frac{3}{4}$ da velocidade angular de sua potência máxima. Estabilizado o regime, o pedal do acelerador deve ser retirado rapidamente para posição de regime mínimo (marcha lenta). O nível sonoro deve ser medido durante todo tempo de funcionamento do motor que compreenda um breve período do regime estabilizado e durante todo período de desaceleração, tomando como resultado válido o valor máximo registrado pelo instrumento de medição sonora. O resultado final é obtido pela média de 03 medições válidas⁴.

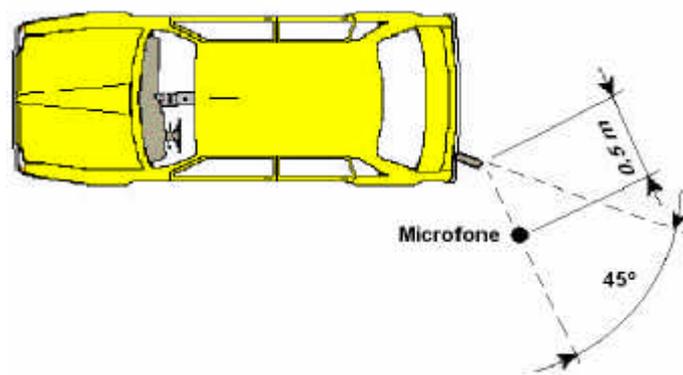


Figura 2.1 Procedimento para medição de ruído externo na condição estática

Atualmente não existe limite determinado pela legislação ambiental para ruído emitido na condição estática. O nível de ruído medido nas proximidades da boca de escapamento, preliminarmente à fase produtiva do veículo, é o valor de referência do veículo novo no processo de verificação. Este valor, acrescido

³ Procedimento de prova para veículos, cuja saída dos gases encontra-se na parte traseira do veículo. Outras configurações do sistema de escape são tratadas particularmente na referida norma.

⁴ São consideradas válidas medições cuja variação entre elas não seja superior a 2,0 dB(A)

de 3,0 dB(A), é que determina o limite máximo de ruído nesta condição. Tais níveis são divulgados no manual do proprietário do veículo, e são utilizados pelo órgão ambiental para controle dos veículos em circulação [01].

Entretanto, em função da necessidade de estabelecer critérios específicos para fiscalização das emissões sonoras dos veículos em circulação, a Resolução CONAMA Nº 252 de 07 de janeiro de 1999 [04] resolve estabelecer limites máximos de ruído nas proximidades do escapamento, para fins de inspeção obrigatória e fiscalização de veículos em uso⁵, conforme a Tab. 2.1⁶

Tabela 2.1 Limites de ruído nas proximidades do escapamento

Descrição		Posição do motor	Nível de ruído dB(A)
Veículo de passageiros até nove lugares e veículo de uso misto derivado de automóvel		Dianteiro	95
		Traseiro	103
Veículos de passageiros com mais de nove lugares, veículo de carga ou de tração, veículo de uso misto não derivado de automóvel	PBT até 2.000 kg	Dianteiro	95
		Traseiro	103
	PBT acima de 2.000 kg e até 3.500 kg	Dianteiro	95
		Traseiro	103
Veículo de passageiros ou de uso misto com PBT maior que 3.500 kg	Potência máxima abaixo de 150 kw (204 CV)	Dianteiro	92
		Traseiro e entre eixos	98
	Potência máxima igual ou superior a 150 kw (204 CV)	Dianteiro	92
		Traseiro e entre eixos	98
Veículo de carga ou de tração com PBT maior que 3.500 kg	Potência máxima abaixo de 75 kw (102 CV)	Todas	101
	Potência máxima entre 75 (102 CV) e 150 kw (204 CV)		
	Potência máxima igual ou superior a 150 kw (204 CV)		
Motocicletas, motonetas, ciclomotores, bicicleta motor auxiliar e veículos		Todas	99

⁵ Conforme Art. 1º § 3º desta Resolução, os valores limites estabelecidos nesta Resolução serão utilizados como referência para fins de inspeção obrigatória e fiscalização de veículos em uso a partir da implantação do Programa de Inspeção Obrigatória, em sua fase inicial.

⁶ Conforme Art. 1º § 3º desta Resolução, tais limites são válidos para os modelos de ciclo Otto, que não atendam aos limites máximos de ruído em aceleração estabelecidos nas Resoluções CONAMA 1 e 8 de 1993 e para os modelos de veículos do ciclo Diesel produzidos até 31 de dezembro de 1998.

2.1.2 Limites de ruído na condição dinâmica

O procedimento para medição de ruído de passagem, realizado conforme descrito pela Norma NBR 8433 [05], derivado da ISO 362, reproduz uma condição de uso do veículo em aceleração. De acordo com esta norma, o veículo é medido com os microfones posicionados nos lados direito e esquerdo a 1,2 m de altura do solo e 7,5 m de distância do centro da pista de testes, conforme a Fig 2.2. O veículo aproxima-se da linha inicial AA' a uma velocidade constante correspondente a $\frac{3}{4}$ da velocidade angular de potência máxima do motor limitada de 50 km/h. No momento em que a extremidade dianteira do veículo atinge a linha AA', aciona-se completamente o pedal do acelerador mantendo o veículo a plena carga durante todo o percurso CC' de 20m de comprimento, até que a extremidade traseira ultrapasse a linha final BB' da pista de testes. O ensaio é realizado sucessivamente na segunda e terceira marcha, quando aplicado em veículos de uso misto, veículos de carga ou tração de quatro rodas, dotados de caixa de mudança mecânica com mais de quatro marchas, excluindo a marcha ré, e com PBT até 3500 kg⁷. O nível sonoro máximo expresso em dB(A)⁸ deve ser medido durante a passagem do veículo entre as linhas AA' e BB', conforme a Fig 2.2. O resultado final é obtido pela média entre os valores máximos medidos em 2ª e 3ª marchas consecutivamente.

⁷ Veículos com menos de quatro marchas, ou dotados de câmbio automático são tratados particularmente pela referida norma.

⁸ O decibel (dB) é definido [06] como sendo uma escala logarítmica gerada a partir de uma escala numérica linear. Deste modo é possível comprimir a larga faixa da escala linear para uma pequena faixa, facilitando assim a leitura e interpretação dos resultados. A curva é ponderada (A) por meio de um filtro introduzido eletronicamente no medidor, que traduz os valores medidos para níveis que aproximam das condições de sensibilidade humana.

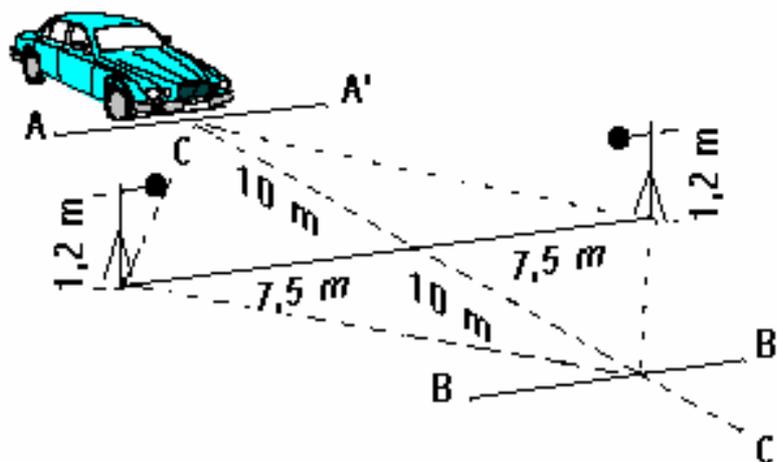


Figura 2.2 Procedimento para medição de ruído externo na condição dinâmica

Nesta condição foram estabelecidos limites máximos de ruído para controle de veículos novos. A Resolução CONTRAN 448/71 [07], publicada em 17 de novembro de 1971, estabelece níveis máximos de ruído regulamentando assim o antigo Código Nacional de Trânsito – CNT, conforme a Tab. 2.2.

Tabela 2.2 Limites de ruído de passagem que vigoraram a partir de 1971

Categoria		Limite a partir de 1971 dB(A)
I	Veículos de passageiros e de uso misto (exceto ônibus), motonetas, motocicletas e bicicletas com motor auxiliar.	84
II	Veículos de carga, ônibus, máquinas de tração agrícolas, máquinas industriais de trabalho e demais veículos.	Potência máxima até 185 CV 89
		Potência máxima acima de 185 CV 92

Através deste documento iniciou-se no Brasil o controle dos níveis de ruído emitido por veículos automotores, devido ao crescente índice de infrações ao então vigente Código Nacional de Trânsito, quanto ao uso indevido de buzina, aparelhos de alarme ou aos veículos que produziam sons ou ruídos que perturbavam o sossego público [08].

Através da Resolução CONAMA 01/93, publicada em 15/02/1993, foi restringida a determinação imposta pela Resolução CONTRAN 448/71 definindo novos limites máximos de ruído, conforme a Tab. 2.3, a qual passou a vigorar a partir de 1º de janeiro de 1994⁹. A norma permite, de acordo com cada categoria de veículo, o desconto de 1 a 2 dB(A) no valor final medido como tolerância de medição.

Novos procedimentos, como controle de produção do veículo, foram implantados visando um maior comprometimento do fabricante no controle dos níveis de ruído emitido pelos seus produtos.

Tabela 2.3 Limites de ruído de passagem que vigoraram a partir de 1994

Categoria	Descrição		Limite a partir de 1994 dB(A)		
			Otto	Diesel	
				Injeção Direta	Injeção Indireta
A	Veículo de passageiros até nove lugares e veículo de uso misto derivado de automóvel		77	78	77
B	Veículo de passageiros com mais de nove lugares, veículo de carga ou de tração, veículo de uso misto não derivado de automóvel	PBT até 2.000 kg	78	79	78
		PBT acima de 2.000 kg e até 3.500 kg	79	80	79
C	Veículo de passageiros ou de uso misto com PBT maior que 3.500 kg	Potência máxima abaixo de 150 kw (204 CV)	80	80	80
		Potência máxima igual ou superior a 150 kw (204 CV)	83	83	83
D	Veículo de carga ou de tração com PBT maior que 3.500 kg	Potência máxima abaixo de 75 kw (102 CV)	81	81	81
		Potência máxima entre 75 e 150 kw (102 a 204 CV)	83	83	83
		Potência máxima igual ou superior a 150 kw (204 CV)	84	84	84

⁹ A Resolução MERCOSUL 128/96 segue as mesmas exigências da Resolução CONAMA 01/93 adotando inclusive as Normas NBR 8433 e NBR 9714

Os limites até o momento não apresentavam grandes riscos para as montadoras, em função da relativa folga dos níveis de ruído emitidos pelos veículos em relação aos respectivos limites. Entretanto, acompanhando a tendência europeia CEE [09], passaram a ser exigidos níveis de ruído ainda mais rigorosos, regulamentada pela Resolução CONAMA Nº 272 de 14 de setembro de 2000 [10], a qual prevê a partir de 1º de janeiro de 2002 novos limites, conforme Tab. 2.4.

Tabela 2.4 *Novos limites que passaram a vigorar a partir de 2002*

Categoria	Descrição		Limite a partir de 2002 dB(A)		
			Otto	Diesel	
				Injeção Direta	Injeção Indireta
A	Veículos de passageiros até nove lugares		74	75	74
B	Veículo de passageiros com mais de nove lugares, veículo de carga ou de tração, veículo de uso misto	PBT até 2.000 kg	76	77	76
		PBT entre 2.000 kg e 3.500 kg	77	78	77
C	Veículo de passageiros ou de uso misto com PBT maior que 3.500 kg	Potência máxima abaixo de 150 kw (204 CV)	78	78	78
		Potência máxima igual ou superior a 150 kw (204 CV)	80	80	80
D	Veículo de carga ou de tração com PBT maior que 3.500 kg	Potência máxima abaixo de 75 kw (102 CV)	77	77	77
		Potência máxima entre 75 e 150 kw (102 e 204 CV)	78	78	78
		Potência máxima igual ou superior a 150 kw (204 CV)	80	80	80

Tais limites, ainda em fase de implantação, entrarão em vigor para 100% da produção após cumprida o seguinte cronograma [10]:

Veículos automotores da categoria “a”:

- No mínimo quarenta por cento dos veículos nacionais e importados, produzidos a partir de 1º de janeiro de 2002;
- No mínimo oitenta por cento dos veículos, nacionais e importados, produzidos a partir de 1º de janeiro de 2004;
- Cem por cento dos veículos, nacionais e importados, produzidos a partir de 1º de janeiro de 2006.

Veículos automotores das categorias “b”, “c” e “d” :

- No mínimo quarenta por cento dos veículos nacionais e importados, produzidos a partir de 1º de janeiro de 2005;
- Cem por cento dos veículos nacionais e importados, produzidos a partir de 1º de janeiro de 2006.

2.2 Principais Fontes de Ruído Externo

O veículo automotor é um sistema extremamente complexo, em se tratando de fontes geradoras de ruído externo. Isto porque o ruído externo global emitido pelo veículo é o resultado da contribuição de várias fontes que atuam de forma simultânea, transmitidas de suas origens via aérea [11]. Estas características dificultam, na maioria das vezes, a análise de cada fonte em relação às questões legislativas, no sentido de se conhecer a contribuição de cada uma no ruído externo global.

De modo geral, considerando-se os mais importantes sistemas presentes em um veículo, as principais fontes de ruído externo podem ser classificadas como:

- Ruído proveniente do conjunto motopropulsor;
- Ruído proveniente do sistema de aspiração;
- Ruído proveniente do sistema de exaustão;
- Ruído proveniente dos pneus.

2.2.1 Ruído Proveniente do Motor

O motor, devido as suas características construtivas e funcionais, conforme a Fig. 2.3, é sem dúvida alguma a principal fonte de ruído do veículo, pois, é através do motor que o ruído de outras fontes, direta ou indiretamente é

gerado. O ruído total proveniente do motor pode ser dividido, basicamente em duas grandes contribuições bem distintas:

- Ruído devido à combustão;
- Ruído devido às forças mecânicas.

Ruído devido ao processo de combustão

Neste caso, o ruído é gerado devido à reação de explosão da mistura ar combustível sob alta pressão no interior da câmara, provocada pela adição de calor em cada um dos cilindros¹⁰. O tipo de combustível do motor tem influência direta estabelecendo características particulares para este tipo de ruído. Normalmente, nos motores a diesel, o ruído global desta fonte tem uma influência maior do ruído de combustão do que em motores a gasolina, devido à sua elevada taxa de compressão.

Ruído devido às forças mecânicas

Para este tipo de ruído, que é considerado de menor influência no ruído global desta fonte em relação ao ruído gerado pelas explosões dos gases, as contribuições mais importantes são os pistões e as válvulas. O ruído proveniente dos pistões é causado pelos impactos dos mesmos nas paredes dos cilindros devido ao seu movimento transversal ou inclinado. Já o ruído proveniente das válvulas pode ser causado pelo contato metálico instantâneo entre os componentes do sistema de abertura e fechamento das válvulas, movido pela força impulsiva gerada pela geometria excêntrica do eixo comando.

¹⁰ Em veículos de ciclo Otto, a adição de calor é feita pela centelha elétrica da vela de ignição. Já no caso de ciclo diesel, a reação ocorre devida a alta pressão no interior da câmara gerada pela elevada taxa de compressão deste tipo de motor.

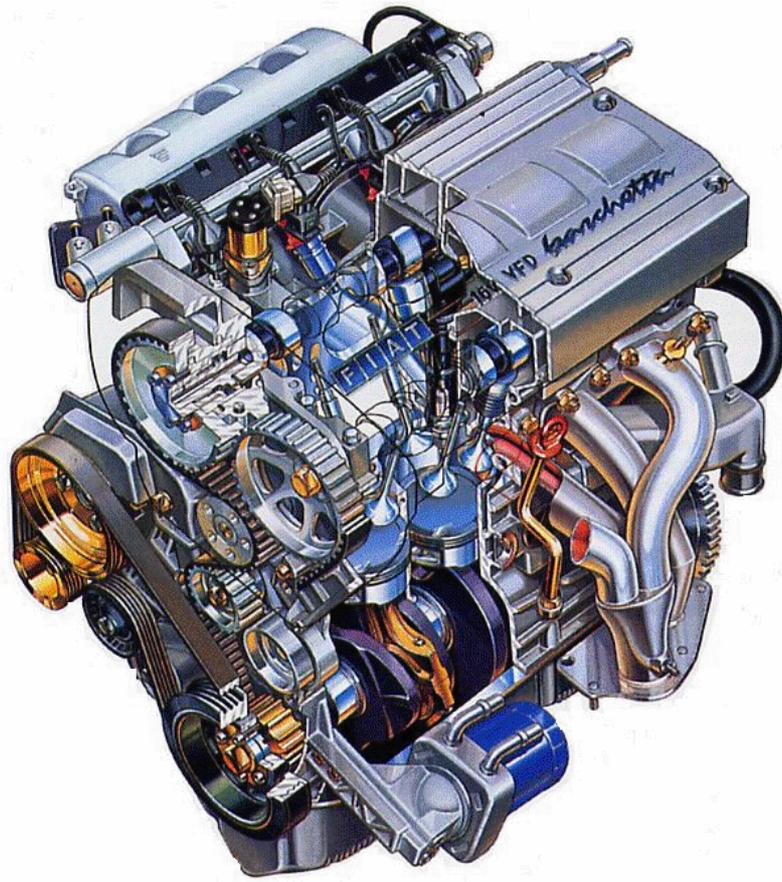


Figura 2.3 Componentes internos fixos e móveis do motor

Em se tratando de ruído externo, a transmissão via aérea é que será considerada. A superfície de radiação do motor é um fator de extrema influência no ruído externo. Logo, o posicionamento do motor (transversal ou longitudinal) passa a ser um fator importante a ser considerado em fase de projeto. Outro componente com grau de importância neste aspecto é o carter, devido à sua exposição no vão inferior do motor. Crocker [12], em seu trabalho de identificação de fontes de ruído em um motor Cummins NTN – 350, a 1500 rpm, aponta o carter como a principal fonte de ruído do motor. Logo, tal componente requer um tratamento acústico específico como, por exemplo, adotando material em alumínio fundido, de menor transparência acústica, em substituição à chapa de aço estampada normalmente empregada. Blaser [13] mediu a potência sonora irradiada pelo carter, aplicando sobre o mesmo dois tipos diferentes de tratamento acústico. Neste estudo, Blaser obteve resultados satisfatórios recobrando o carter externamente com outro metal estampado. Outros tipos de tratamentos acústicos também podem ser adotados no motor

para redução do ruído emitido por esta fonte, como a utilização de barreiras acústicas na parte inferior do conjunto motopropulsor e material fonoabsorvente na tampa do motor e na parede corta fogo.

A caixa de câmbio conectada ao motor (ver Fig. 2.4) também é uma contribuição considerável para esta fonte. O principal ruído deste componente é gerado pelos impactos dos dentes das engrenagens. Logo, o perfil e a inclinação dos dentes são fatores importantes na geração deste ruído. A relação de marchas é outro fator de fundamental importante a ser considerado, pois é através da mesma que serão determinadas as rotações do motor nas provas de ruído de passagem em 2ª e 3ª marchas respectivamente. Testes experimentais comprovam que veículos que adotam câmbios com relações mais longas, apresentam menores níveis de ruído de passagem.

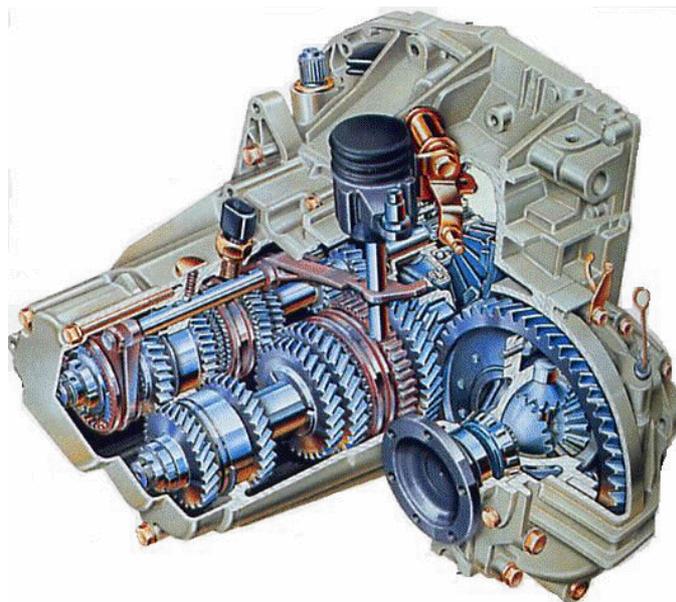


Figura 2.4 Componentes internos da caixa de câmbio

2.2.2 Ruído proveniente do sistema de aspiração

O sistema de aspiração (ver Fig. 2.5) é composto basicamente por uma entrada de ar, caixa de filtro de ar, mangueiras de envio do ar para o corpo borboleta e coletor de admissão, todos construídos de forma a minimizar ao máximo tanto a turbulência gerada internamente, como a irradiação de ruído através das paredes [14]. Alguns sistemas possuem também um ou mais ressoadores, montados com o intuito de atenuar o ruído de aspiração.

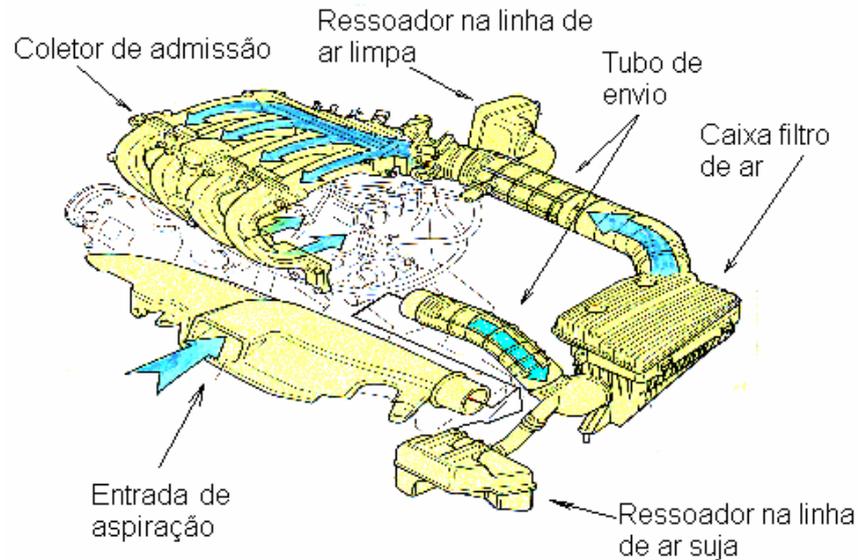


Figura 2.5 Sistema de aspiração

O sistema de aspiração, além de filtrar as impurezas contidas no ar e otimizar o fluxo e a temperatura do ar aspirado, possui também a importante função de atenuar ao máximo o ruído do ar aspirado.

O ruído de aspiração é caracterizado pela geração de ondas sonoras estacionárias a partir da oscilação da coluna de gás (misturas ar / combustível) nos dutos do sistema de aspiração, provocadas pelas aberturas e fechamentos intermitentes das válvulas de admissão [11].

O ruído de aspiração pode ser propagado tanto pela boca de entrada de ar, denominado ruído de boca de aspiração, como pela radiação das ondas sonoras através das paredes do filtro de ar ou dos dutos do sistema de aspiração, denominado ruído de parede de aspiração [14]. O ruído de parede, gerado pela baixa rigidez estrutural do sistema, pode ser atenuado através de nervuras adotadas em toda a estrutura.

Já em casos de ruído excessivo de boca de aspiração, é empregado um ressoador na linha de aspiração, denominado câmara de *Helmholtz*.

Segundo Gerges [15], tal dispositivo consiste em uma câmara aplicada na abertura da parede lateral da linha de aspiração, conforme a Fig. 2.6, cujo volume e geometria são definidos de forma a sintonizar a faixa de frequências identificada e neutralizar as ondas sonoras da ressonância identificada, segundo a Equação (2.1).

$$F_o = \frac{c}{2p} \sqrt{\frac{S}{L.V}} \quad (2.1)$$

Onde:

F_o = Frequência de atuação do ressoador;

c = Velocidade do som no ar;

L = Comprimento do tubo de conexão entre o ressoador e a linha de aspiração;

V = Volume do ressoador;

S = Área da seção transversal do tubo de conexão do ressoador à linha de aspiração.

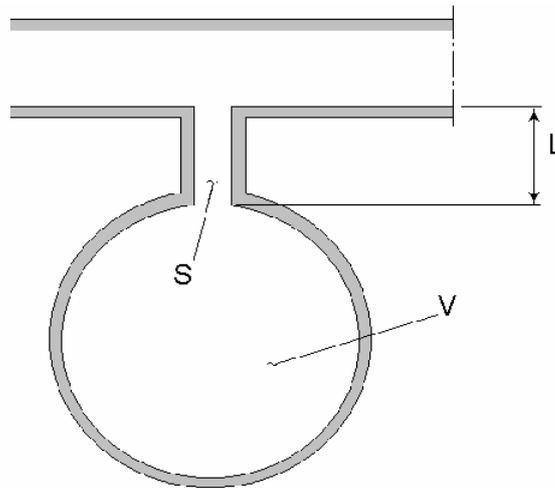


Figura 2.6 Câmara de Helmholtz

Em casos especiais em que o ruído de aspiração é excessivo, são utilizados outros ressoadores suplementares, como demonstrado na Fig. 2.5.

2.2.3 Ruído proveniente do sistema de exaustão

O sistema de exaustão tem como finalidade abafar o ruído provocado na câmara de combustão, reduzir a emissão de poluição dos gases e descarregar o gás em um ponto conveniente do veículo [14].

A Fig. 2.7 ilustra a configuração do sistema de escape de um veículo leve de passageiro, a qual é constituída basicamente de 03 componentes principais: conversor catalítico (posicionado o mais próximo possível do coletor de escape), abafador (normalmente utiliza-se dois abafadores, central e traseiro) e boca de descarga.

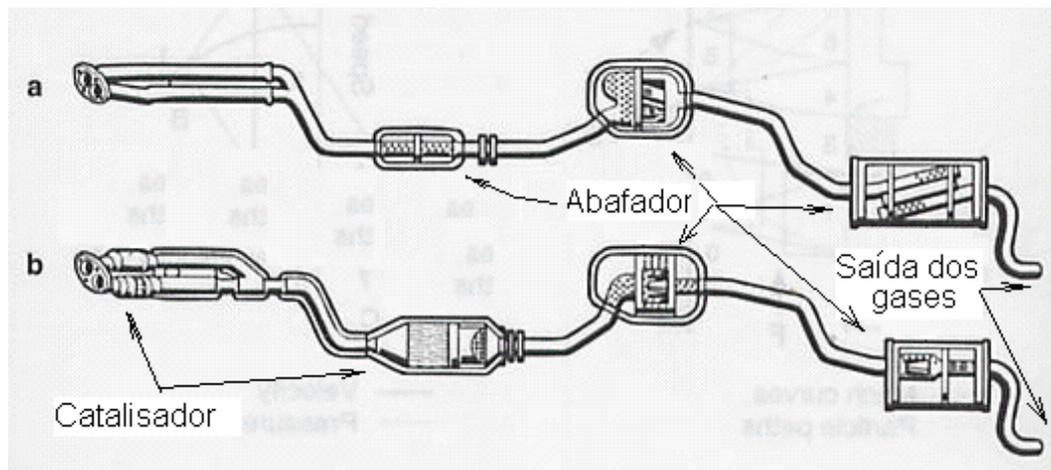


Figura 2.7 Configuração básica do sistema de escape: a) sem catalisador; b) com catalisador

O ruído proveniente do sistema de exaustão é uma das principais fontes de ruído presentes no veículo, podendo contribuir significativamente no ruído externo global. As suas principais contribuições são:

Ruído de boca de escape

Ruído de boca produzido pelas flutuações de pressão no sistema causadas pela ação das válvulas de descarga, geralmente em baixas frequências [14]. Em algumas versões de motorizações utilizadas predomina também o ruído causado pelo jato do fluxo dos gases que saem em alta velocidade. Este tipo de ruído, particular de veículos cujos motores trabalham em alto regime de rotação, principalmente em motores sobrealimentados ou de alta cilindrada, pode ser atenuado alterando a configuração da boca de saída dos gases.

Ruído de parede de escape

Ruído provocado pelas flutuações dos gases no interior do sistema, o qual é irradiado pelas superfícies dos silenciosos e tubos. Aqui, pode-se considerar tanto a contribuição proveniente da irradiação direta como a contribuição proveniente de sua reflexão na superfície do solo [11].

Os silenciadores são destinados a suavizar a pulsação dos gases e fazê-la tão inaudível quanto possível [14]. Basicamente, dois tipos de princípios são aplicados nas construções dos abafadores, por reflexão e por absorção, conforme a Fig 2.8.

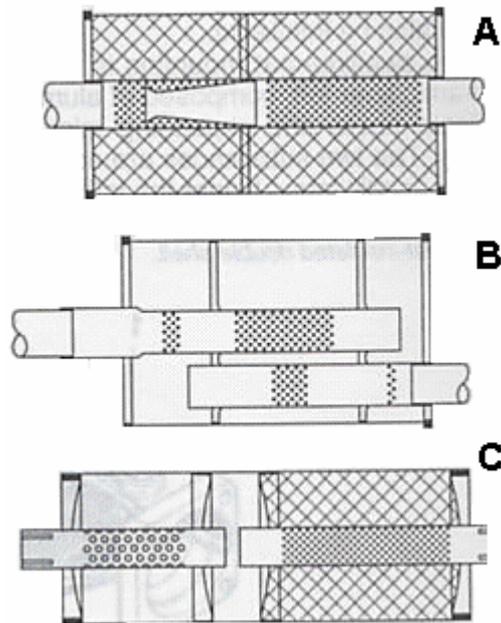


Figura 2.8 Configurações dos abafadores: A - absorção, B - reflexivo e C - combinado

Os abafadores por reflexão apresentam internamente três ou mais câmaras de volumes variados, interligadas entre si através de tubos perfurados, formando ressoadores que atuam efetivamente em baixas frequências (normalmente entre 0 a 700 Hz) [16]. Quanto maior o número de câmaras utilizadas, melhor é o efeito de atenuação do ruído.

Os abafadores por absorção são constituídos geralmente por apenas uma câmara, preenchida totalmente com um material que possui características térmicas e fonoabsorventes [14] (normalmente é utilizada a lã de rocha). A comunicação dos gases com o interior da câmara ocorre por meio de perfurações existentes no tubo central, dimensionadas de forma a não ocorrer a perda da lã de rocha pelo fluxo dos gases. A performance de atenuação deste tipo de abafador, que atua em uma ampla faixa que compreende as médias e altas frequências (normalmente entre 900 a 4000 Hz), depende da densidade, fator de absorção sonora, comprimento e espessura da manta do material fonoabsorvente. Abafadores absorptivos são utilizados principalmente na parte final do sistema de escapamento.

Há casos em que se utilizam estas duas configurações combinadas, onde consegue-se melhor performance acústica em uma faixa bem mais ampla de

freqüências do que a obtida com as configurações individuais (em configurações mistas complexas, consegue-se êxito na faixa de 0 a 5000 Hz). Cabe citar outro método, bem mais científico, que consiste no controle ativo de ruído¹¹. Segundo Gerges [15], o princípio da técnica ativa consiste em captar o campo sonoro indesejado no duto e gerar um sinal invertido pelo alto falante conforme a Fig. 2.9. A idéia do controle ativo baseia-se no fato de que sinais elétricos se propagam com velocidade bem maior do que a velocidade do som.

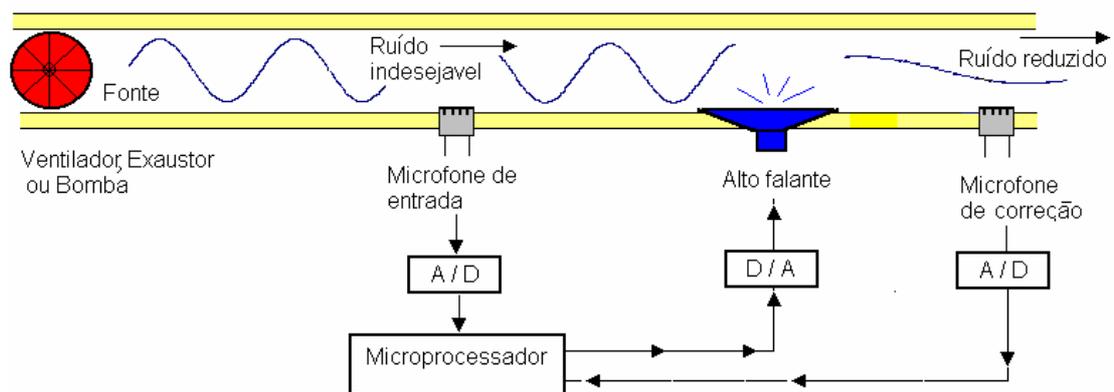


Figura 2.9 Princípio do controle ativo

A purificação dos gases é obtida por um dispositivo denominado conversor catalítico através da reação química promovida pelo contato dos gases com uma extensa e fina camada de metais nobres contidos no interior de uma colméia cerâmica. Estas características construtivas do catalisador, conforme a Fig. 2.10, fazem com que este componente possua também uma função acústica. Em alguns casos, abafadores são anexados ao catalisador para aumentar ainda mais seu desempenho acústico [14].

¹¹ Patente de Lueg de 1963, finalmente utilizada nos últimos anos graças ao advento das técnicas digitais de processamento e análise de sinais [15].

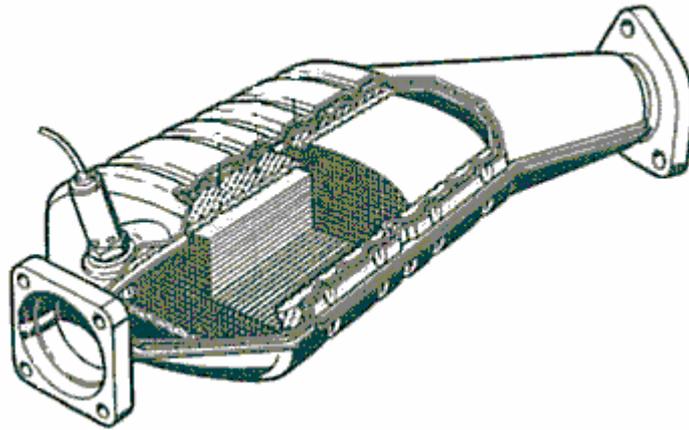


Figura 2.10 Catalisador

2.2.4 Ruído proveniente dos pneus

Em função dos baixos limites de ruído externo impostos atualmente, é atribuída a esta fonte a mesma importância das demais fontes citadas. O processo de geração deste tipo de ruído está relacionado a diferentes fenômenos e pode ser influenciado pelo desenho da banda de rodagem e pelo tipo de borracha utilizada na sua confecção [11]. Logo, no processo de fabricação de um pneu é contemplado, além de oferecer a máxima segurança em todos aspectos (resistência a choques, desgastes e aderência ao solo em condições variadas), também emitir o mínimo de ruído possível. Atualmente, já existem no mercado pneus com adição de sílica no composto de borracha, denominado de “pneu verde” desenvolvidos com o objetivo de reduzir ainda mais o ruído emitido pelo mesmo. Entretanto tal adição eleva o preço do componente, motivo pelo qual ainda é pouco utilizado pelas montadoras.

De modo geral, pode-se distinguir quatro mecanismos diferentes de geração de ruído no pneu [11]:

- Ruído proveniente do bombeamento de ar nos sulcos do pneu, onde ocorre uma compressão do ar quando existe o contato do mesmo com a superfície do solo e expansão quando deixa de existir este contato;
- Ruído proveniente da vibração dos pneus resultante da deformação periódica das suas paredes laterais, da banda de rodagem e da carcaça, quando em contato com a superfície da estrada;
- Ruído proveniente do deslizamento dos elementos da banda de rodagem devido à transmissão da força de tração a qual impõe uma

deformação no sentido radial dos mesmos. Quando o contato destes elementos com a superfície do solo deixa de existir, eles sofrem um impacto, retornando a posição neutra após um movimento vibracional amortecido;

- Ruído proveniente dos efeitos aerodinâmicos gerados pela turbulência do ar no pneu e na roda. Este tipo de ruído, comparado aos anteriores, é de menor importância.

A Figura 2.11 ilustra os aspectos construtivos do pneu, que é formado basicamente pela banda de rodagem, parte do pneu que fica em contato direto com o piso, as laterais (costado) e a carcaça que é constituída de revestimentos internos responsáveis pelo reforço do pneu.



Figura 2.11 Aspectos construtivos do pneu

2.3 Técnicas de Identificação de Fontes de Ruído Externo

Conforme já ressaltado, a crescente tendência para baixos níveis de ruído emitidos por veículos de passageiros e de carga tem enfatizado uma necessidade cada vez maior de pesquisa das fontes de ruído e a contribuição individual das mesmas. O procedimento padrão de ensaio de ruído de passagem, determinado pela Norma NBR 8433, informa em princípio apenas o valor genérico do ruído externo do veículo, não sendo, portanto, adequado para pesquisa de fontes individuais. Como os microfones estão 7,5 m distantes do

centro do veículo, caracteriza-se essencialmente como uma medição de campo distante, oferecendo poucas informações sobre a acústica de campo próximo, tendo em vista que a distância relativa entre as fontes é pequena em relação a distância do veículo ao microfone, o qual interpreta o veículo como uma única fonte. Logo, para uma redução dos níveis de ruído com a máxima eficiência, é necessário obter informações detalhadas sobre as fontes individuais e suas influências no nível global de ruído do veículo. Isto inclui informações sobre a localização individual de cada fonte sonora, a intensidade da emissão sonora individual e a interação entre elas. A utilização de uma técnica eficaz e segura é um fator fundamental para a montadora, para que se possa tomar medidas práticas para a redução dos níveis de ruído em tempo hábil, de forma que o veículo possa ser produzido atendendo à legislação em questão. Para tal, algumas técnicas são utilizadas, sendo abordadas a seguir.

2.3.1 Medições de ruído externo utilizando o sistema telemetrado

O sistema telemetrado fornece, além do nível máximo de ruído obtido nas medições tradicionais, informações adicionais como rotação, velocidade, aceleração e posição do veículo ao longo da linha dos 20 m, conforme a Fig. 2.12. Desta forma é possível, além de um controle do piloto a fim de manter sempre uma boa repetibilidade, conhecer principalmente a posição e a rotação exata em que ocorre o valor máximo de ruído e, através de uma correlação entre estes dados e a posição relativa das fontes no veículo, determinar qual a fonte que influenciou no nível máximo. Entretanto, na maioria dos casos esta correlação não é coerente, a não ser em casos excepcionais em que uma fonte sobressaia muito em relação às demais. Conforme ressaltado anteriormente, a distância dos microfones em relação ao veículo dificulta a interpretação de campo próximo, tendo em vista que as distâncias entre as fontes são pequenas. Logo, como metodologia aplicada à identificação de fontes de ruído, o sistema telemetrado é mais conveniente para dar uma primeira aproximação.

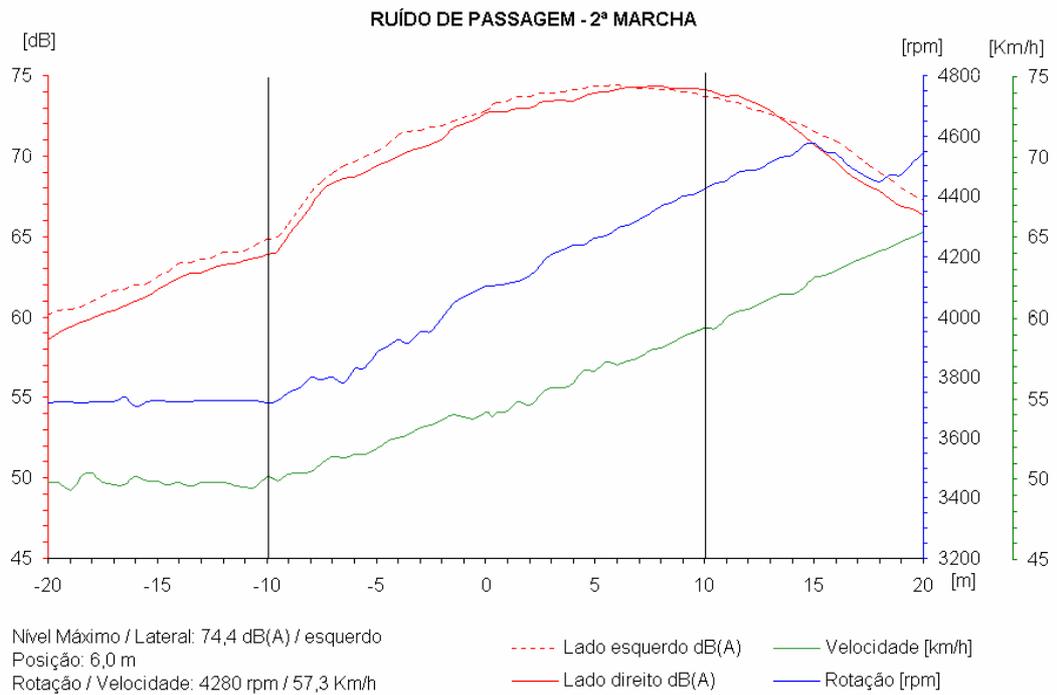


Figura 2.12 Gráficos de medição de ruído externo por telemetria

2.3.2 Método por abafamento de fontes sonoras

Esta técnica, denominada *silent car* ou *quiet car*, consiste em manipular o veículo de modo que apenas uma fonte esteja emitindo ruído, ou no mínimo esteja mais dominante que as demais [17]. Esta manipulação é obtida por meio de enclausuramento total das fontes, conforme a Fig. 2.13, deixando apenas uma descoberta. Para cada fonte individualizada, é realizado um ensaio de ruído externo, meio pelo qual a respectiva fonte é caracterizada. Desta forma, é possível quantificar a contribuição do ruído irradiada pela mesma, cujo êxito dependerá principalmente da eficiência e o procedimento utilizado para enclausuramento das demais fontes.

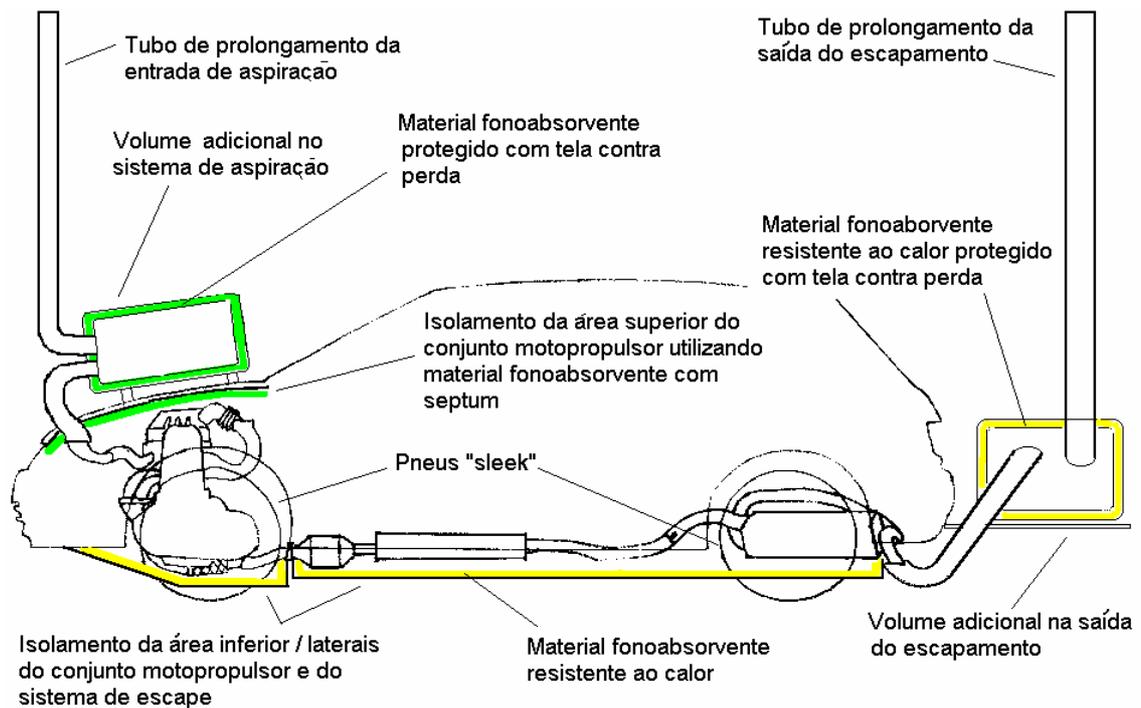


Figura 2.13 Esquema de abafamento das fontes de ruído

Esta metodologia é comumente utilizada por ter certa confiabilidade prática e requerer bem menos recursos técnicos em relação às metodologias mais sofisticadas, como a de intensidade sonora ou holografia acústica. Entretanto, é uma atividade realizada a longo prazo, aumentando como consequência o tempo de resposta, fator determinante para desenvolvimento de um projeto. Este inconveniente ocorre em função da preparação dos utensílios para abafamento e das consecutivas provas, que incluem as inúmeras retiradas e reposições dos isolamentos.

2.3.3 Técnica da intensidade sonora

A busca de novas técnicas e ensaios para este tipo de aplicação tem se tornado grande objeto de pesquisa e desenvolvimento. Metodologias mais científicas têm sido empregadas para pesquisa de fontes de ruído externo através de medições em campo próximo, como a técnica de intensidade sonora. A técnica de medição de intensidade sonora utilizando dois microfones e um medidor de nível sonoro foi desenvolvida pelo Dr Frank J. Fahy em 1977 [18]. Desde então, tem sido largamente empregada devido à sua simplicidade, facilidade de calibração e operação, juntamente com a boa precisão nos

resultados obtidos. Segundo Gerges [15], O princípio desta técnica é baseado na relação entre as pressões sonoras captadas pelos dois microfones próximos e a velocidade da partícula. A medição é feita sobre um plano, paralelo à superfície do objeto, subdividido em várias áreas por meio de uma grade imaginária de referência, conforme a Fig 2.14. A medição de todos os pontos resulta em uma completa descrição do plano de interesse, onde parâmetros acústicos como a distribuição da intensidade sonora, velocidade de partícula e diferença de fase são conhecidas.

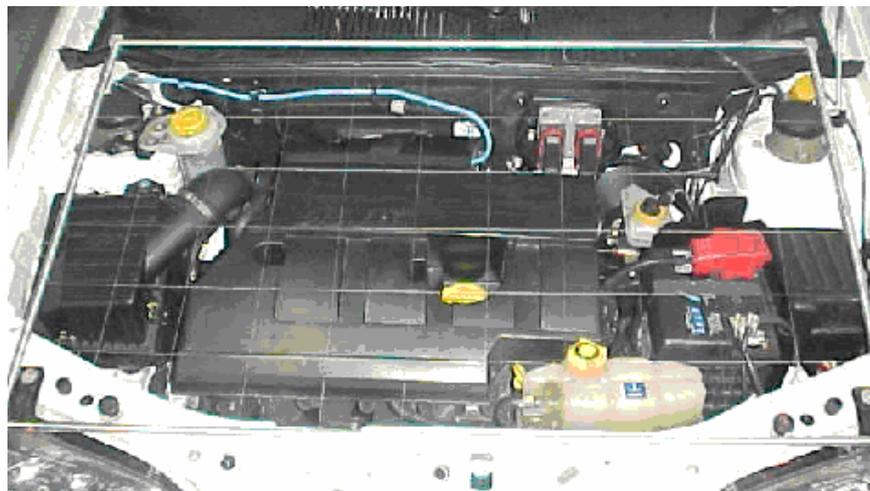


Figura 2.14 Grade de referência para medição de intensidade sonora

Com o uso desta técnica, o estudo de uma determinada região de interesse pode fornecer resultados direcionais que, devido às suas características vetoriais, promove um mapeamento das principais fontes de ruído encontradas, conforme a Fig. 2.15.

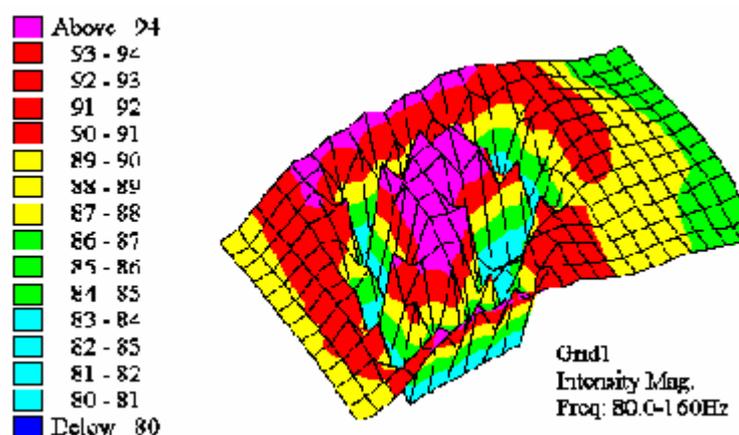


Figura 2.15 Mapa de intensidade sonora

A utilização da técnica de intensidade sonora permite fazer medições locais de um veículo em seu próprio ambiente operacional, contanto que a intensidade externa gerada pela própria fonte e outras fontes presentes não varie muito durante o período de medição.

Uma outra vantagem associada é que a medição de intensidade sonora pode ser usada (por pessoal qualificado) para a identificação e graduação das maiores zonas geradoras de ruído em uma fonte complexa (o ruído externo de um veículo, por exemplo). Podem ocorrer, todavia problemas de má interpretação quando a fonte emite um ruído de baixa intensidade ou de tom puro, principalmente em ambientes fechados [19].

No trabalho de identificação de fontes de ruído em um motor Cummins NTN – 350, Crocker [12] compara três métodos. O primeiro método avaliado, denominado “*Wrapping*”, seguindo o mesmo princípio da metodologia *quiet car* apresentada, consiste em isolar parte das superfícies e identificar o ruído gerado por outras partes. O material utilizado para isolamento foi o chumbo. Segundo Crocker, o método apresenta algumas desvantagens como consumo elevado de tempo, custo elevado, demonstra-se insuficiente nas baixas frequências e não fornece resultados de precisão para fontes de baixos níveis. O segundo método, denominado Método de Intensidade de Superfícies, foi realizado utilizando um microfone e um acelerômetro. Com esta técnica, a velocidade de partícula da superfície é obtida pela integração do sinal do acelerômetro. O sinal de pressão é então multiplicado pelo sinal de velocidade para obter a intensidade sonora. O terceiro método foi o método de Intensidade com Dois Microfones. Embora os três métodos avaliados tenham apresentados resultados similares, é importante ressaltar que, das três técnicas avaliadas, a técnica de dois microfones apresentou maior vantagem, por ser mais simples e mais prática.

Blaser [13], em um trabalho realizado na GM / Michigan, realizou vários testes aplicando a técnica de intensidade sonora para identificação de fontes de ruído em motores e veículos. Entre eles, foram realizadas medições no exterior de um veículo com motor diesel para determinar as contribuições relativas de várias regiões do veículo no ruído externo global, a partir das quais foi elaborado um “*ranking*” das principais fontes. As medições foram conduzidas com o veículo parado a 600 rpm, em um campo aberto com raio de 30 m sem

obstáculos. Desta análise, foram identificadas como principais fontes a região frontal e a lateral do motor. Entretanto, tais medições não podem ser consideradas como um bom indicativo da influência das fontes no ruído de passagem, pois a condição de ensaio não reproduz as mesmas condições de prova de ruído de passagem.

P.P. Muller [20] aplicou a técnica de intensidade sonora para identificação de fontes de ruído externo de um veículo de passageiros, em câmara semi-anecóica com rolos, simulando condições dinâmicas de testes em pistas, ou seja, com veículo a plena carga na mesma rotação em que ocorreu o máximo nível de ruído, registrado em testes de ruído de passagem. O teste foi realizado apenas em 2º marcha, a fim de eliminar o efeito causado pelo ruído proveniente dos pneus. Nesse trabalho foram identificadas várias fontes importantes, sendo a principal delas o ruído emitido pelo catalisador.

2.3.4 Técnica da holografia acústica

Provas utilizando técnicas ainda mais avançadas para identificação de fontes de ruído externo em veículos, como o sistema de holografia acústica, também foram desenvolvidas nos últimos anos. Pode-se citar como exemplo a técnica STSF “*Spatial Transformation of Sound Fields*” [21]. O princípio básico desta técnica está na análise de espectros cruzados entre sinais medidos por um conjunto de transdutores de referência e um conjunto de microfones sobre um plano de referência próximo à fonte sonora, conforme a Fig 2.16.

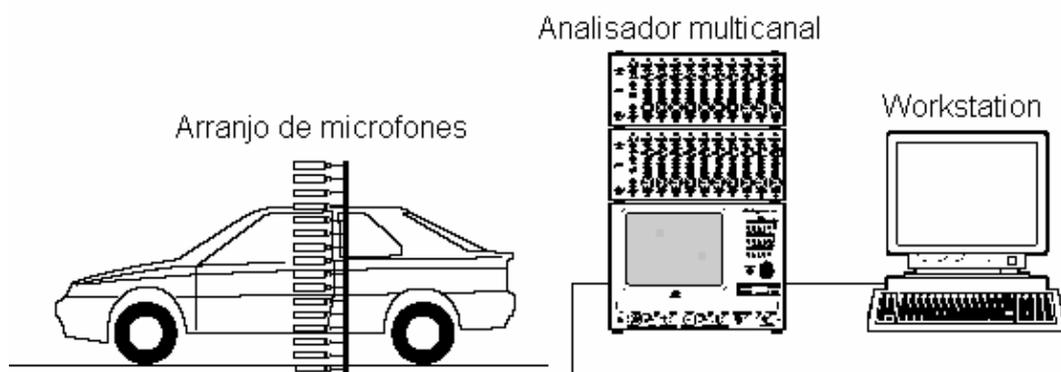


Figura 2.16 Sistema de holografia acústica

Estas medições resultam em uma completa descrição do campo sonoro, onde magnitude e fase da pressão sonora do campo são conhecidos em todos os

pontos. Através de uma técnica matemática de Equação Integral de *Helmholtz* e Holografia Acústica de Campo Próximo, é possível então calcular a distribuição da intensidade sonora em outros campos, conforme Fig a 2.17. É possível também, via *software*, atenuar a emissão sonora de uma determinada fonte e prever, por exemplo, o resultado em campo distante em termos de pressão sonora, simulando a condição de *pass by*. Desta forma torna-se possível concentrar todo o esforço de redução de ruído na fonte que mais contribui para o ruído externo.

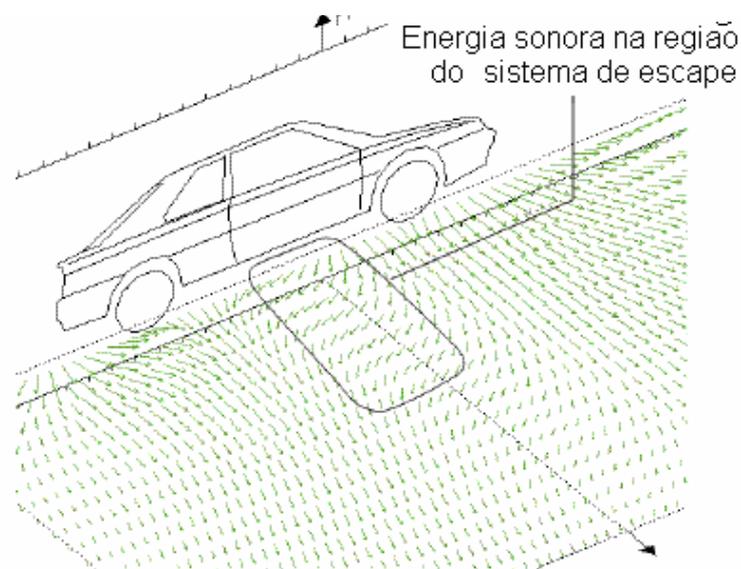


Figura 2.17 Simulação computacional do campo vetorial em medição de holografia acústica

Taylor (Rover Group) e Rasmussen (Brüel & Kjaer), em seu trabalho [22], identificaram através desta técnica a principal fonte de ruído do veículo Rover 220 GSi, que a princípio não atendia ao limite CEE de ruído externo de 74,0 dB(A). O ensaio foi realizado em câmara semi anecóica com rolos e, através da técnica STSF, foram obtidos por simulação os níveis de ruído de passagem. O veículo foi medido a plena carga, na velocidade em que ocorreu o máximo nível de ruído medido previamente em prova de ruído de passagem realizado em pista. Taylor simulou a redução de ruído em várias fontes, quando foi possível prever a influência de cada uma no ruído de passagem. Rasmussen [21], pelo mesmo método, analisou a irradiação sonora de um pneu com veículo em movimento, e estabeleceu uma correlação por simulação do ruído medido em campo próximo com o ruído de passagem.

Capítulo 3

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA INTENSIDADE SONORA

3.1 Princípio de Medição de Intensidade Sonora

A intensidade sonora \vec{I} , ou fluxo de energia, é um vetor que descreve a quantidade e a direção do fluxo de energia acústica em uma dada posição [23]. Portanto, tal grandeza é expressa em energia por tempo e por área, cuja unidade é $[W / m^2]$.

A intensidade I_r na direção r é definida como:

$$I_{r,inst} = \frac{dE_r}{dt \cdot dA}, \quad (3.1)$$

onde: dE_r é a energia que atravessa o elemento de área dA , perpendicular à direção de propagação r , em um período de tempo dt conforme a Fig. 3.1.

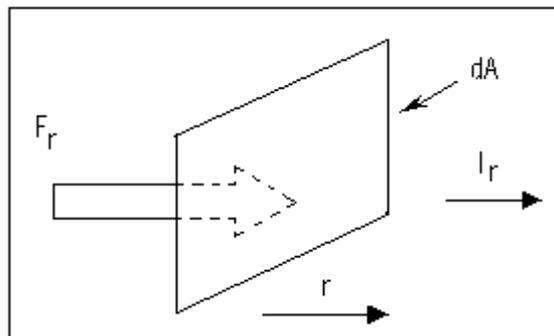


Figura 3.1 Energia transportada através da área dA na direção r

A energia transportada dE_r é igual à quantidade de trabalho realizado sobre a área dA na direção r devido à força total F_r :

$$dE_r = F_r \cdot dr \quad (3.2)$$

e

$$F_r = p_t \cdot dA. \quad (3.3)$$

Logo,

$$dE_r = p_t \cdot dr \cdot dA, \quad (3.4)$$

onde: p_t é a expressão total da soma de duas partes de pressões, sendo a pressão atmosférica (estática) p_a e a pressão sonora p . Logo:

$$p_t = p_a + p. \quad (3.5)$$

Portanto, a intensidade instantânea é:

$$I_{r,inst} = p_t \frac{dr}{dt}, \quad (3.6)$$

onde: $\frac{dr}{dt}$ é a velocidade de partícula u_r na direção r , e portanto:

$$I_{r,inst} = p_t \cdot u_r \quad (3.7)$$

e

$$I_{r,inst} = p_a \cdot u_r + p \cdot u_r. \quad (3.8)$$

O componente do vetor intensidade na direção r é igual à média temporal do produto da pressão sonora instantânea e a correspondente velocidade da partícula instantânea na mesma direção, dada por:

$$I_r = \overline{p \cdot u_r}, \quad (3.9)$$

pois o termo contendo a pressão p_a é nulo, quando executada a média

temporal, tendo em vista que a velocidade de partícula é nula para pressão estática. Em um plano tridimensional o vetor intensidade no tempo pode ser escrito como:

$$\overline{I(t)} = \overline{p(t) \cdot u_x(t) + p(t) \cdot u_y(t) + p(t) \cdot u_z(t)} \quad (3.10)$$

e

$$\overline{I_r(t)} = \overline{p(t) \cdot \overline{u_r(t)}}. \quad (3.11)$$

3.2 Medição de Intensidade Sonora

Logo, a Eq. (3.11) sugere uma metodologia para medição de intensidade sonora, onde a pressão instantânea e a velocidade de partícula devem ser conhecidas [15]. A pressão sonora pode ser facilmente medida, porém uma predição direta da velocidade de partícula não é tarefa fácil, pois requer a utilização de instrumentos sofisticados.

O método de medição de intensidade sonora utilizando dois microfones é baseado na relação entre as pressões acústicas captadas pelos microfones próximos e a velocidade da partícula [15]. Logo, baseada na segunda lei de Newton, que é a equação do movimento (força = massa x aceleração), foi definida uma equação simplificada, chamada também de Relação de Euler [24], expressa por:

$$\mathbf{r}_0 \frac{\partial u_r}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (3.12)$$

onde: \mathbf{r}_0 é a densidade do meio (normalmente o ar).

Visto que o gradiente de pressão é proporcional à aceleração da partícula, a velocidade de partícula pode ser obtida integrando o gradiente de pressão no tempo, conforme a Eq. (3.13):

$$\overline{u_r(t)} = - \frac{1}{\mathbf{r}_0} \int \frac{\partial p}{\partial r} dt. \quad (3.13)$$

Na prática [15], o gradiente de pressão pode ser aproximado medindo as

pressões p_A e p_B de dois microfones idênticos A e B (ver Fig. 3.2) separados por uma pequena distância Δr , conforme a Eq. (3.14):

$$\frac{\partial p}{\partial r} \cong \frac{p_A(t) - p_B(t)}{\Delta r}. \quad (3.14)$$

Logo, a estimativa do componente \vec{u}_r da velocidade de partícula na direção r pode ser dada pela Eq. (3.15):

$$\vec{u}_r = -\frac{1}{r_0 \Delta r} \int [p_A(t) - p_B(t)] dt. \quad (3.15)$$

Esta aproximação é válida somente se a distância que separa os microfones for pequena em relação ao comprimento da onda ($\Delta r \ll \lambda$), isto para evitar erros que podem ocorrer em função da aproximação do gradiente de pressão [25]. Uma sonda de medição de intensidade sonora, portanto, consiste em um arranjo de dois microfones idênticos e separados por uma pequena distância, conforme a Fig. 3.2. Com ela determinam-se a pressão e o gradiente de pressão sonora em um ponto médio entre os dois microfones sobre a linha central que une os dois centros, paralela à direção de propagação da energia acústica [15].

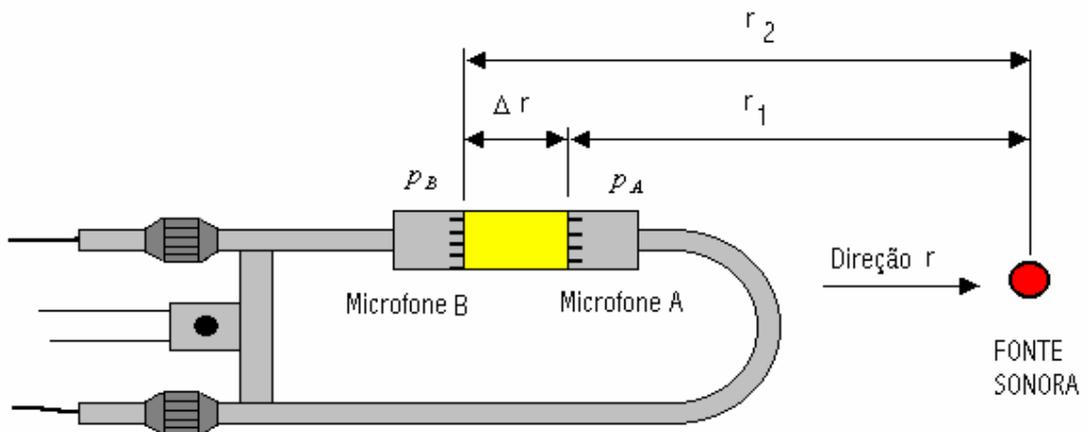


Figura 3.2 Sonda de intensidade sonora

A pressão sonora p é obtida por aproximação, através da média das pressões

$p_A(t)$ e $p_B(t)$ medidas nos dois microfones A e B conforme a Eq. (3.16):

$$p(t) = \frac{1}{2} [p_A(t) + p_B(t)]. \quad (3.16)$$

Logo, o componente do vetor da intensidade sonora na direção r é calculado, pelo método direto, substituindo as Eqs. (3.15) e (3.16) na Eq. (3.11), resultando em:

$$\overline{I_r(t)} = -\frac{1}{2r_0\Delta r} \overline{[p_A(t) + p_B(t)] \int [p_A(t) - p_B(t)] dt}. \quad (3.17)$$

O método indireto é baseado na densidade espectral cruzada dos sinais de pressão dos dois microfones [25]. A medição de intensidade sonora é feita no domínio da frequência, aplicando-se as mesmas aproximações do método direto. A intensidade pode ser calculada pela parte imaginária da densidade espectral cruzada dos sinais dos microfones, por meio de um analisador digital de frequência com dois canais FFT (*Fast Fourier Transform*), através das Eqs. (3.18), que representa a parte imaginária, e (3.19), a parte real:

$$\overline{I_r(\omega)} = -\frac{1}{\omega r_0 \Delta r} \text{Im}\{G_{AB}(i\omega)\} \quad (3.18)$$

ou

$$\overline{I_r(\omega)} = -\frac{1}{r_0 \Delta r} \text{Re}\{G'_{AB}(i\omega)\}, \quad (3.19)$$

onde: G_{AB} é a densidade espectral cruzada dos sinais de pressão dos dois microfones A e B, e G'_{AB} é a densidade espectral cruzada do sinal integrado no tempo do primeiro transdutor de pressão e o sinal não integrado do segundo transdutor de pressão.

A média logarítmica da intensidade, dada pela Eq. (3.20):

$$L_I = 10 \log_{10} \left[\frac{I}{I_{ref}} \right] \quad [dB], \quad (3.20)$$

é o nível de intensidade sonora onde, a intensidade sonora de referência é

$$I_{ref} = 10^{-12} \left[\frac{W}{m^2} \right].$$

3.3 Campos Sonoros

O campo sonoro é caracterizado por uma região onde há som, podendo ser classificado conforme o modo e o tipo de ambiente em que o som é propagado [24]. Existem dois tipos de campos sonoros em que a intensidade sonora está diretamente relacionada: campo livre e campo difuso. Portanto, para a determinação precisa da qualidade da medição de intensidade sonora, é necessário conhecer o tipo de campo em que está sendo realizada a medição. Em um campo livre, chamado também de campo ativo, não há obstáculos para reflexão do som propagado. A propagação do som em um campo livre é caracterizado pela queda linear de 6 dB a cada vez que é dobrada a distância entre a fonte e o sensor de medição. Esta condição pode ser retratada de forma bastante aproximada em um campo totalmente aberto em que não há presença de obstáculos em uma distância suficientemente grande da fonte, ou em uma câmara totalmente anecóica, onde toda onda incidida nas paredes é absorvida por material de características altamente fonoabsorvas, conforme a Fig. 3.3. A relação entre pressão e intensidade neste tipo de campo é conhecida e pode ser descrita pela Eq. (3.21).

$$|I| = \frac{p_{rms}^2}{r c}, \quad (3.21)$$

onde: o termo $r c$ é a impedância do meio.

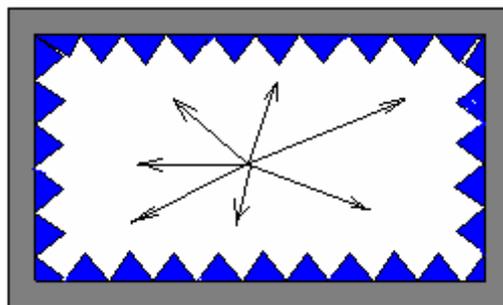


Figura 3.3 Câmara anecóica

Em um campo puramente difuso, também chamado de campo reativo, as ondas sonoras são refletidas em todas as direções ao mesmo tempo, com igual magnitude. A propagação de som envolve fluxo de energia; entretanto, neste tipo de campo, embora haja ondas de pressão sonora, não há fluxo de energia. Em um dado instante haverá fluxo de energia transportado de um lado para outro, entretanto, o mesmo fluxo retorna no instante final. Portanto, o valor final da intensidade neste campo é nula ($|I| = 0$). O campo pode ser retratado em uma câmara reverberante conforme a Fig. 3.4. A relação entre pressão e intensidade também pode ser conhecida, descrita pela Equação (3.22):

$$I_x = \frac{p_{rms}^2}{4rc}. \quad (3.22)$$

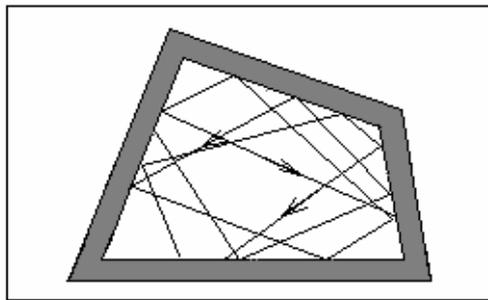


Figura 3.4 Câmara reverberante

De uma forma geral, no campo sonoro disponível para medições de intensidade sonora, haverá sempre ambos os componentes, ou seja, uma parte ativa e outra reativa [15]. Mesmo assim, é possível medir intensidade sonora em função da propriedade da intensidade que distingue o componente ativo do componente reativo do campo. Em um campo ativo, a pressão e velocidade variam simultaneamente, ou seja, não há mudança de fase entre os mesmos. Logo, o valor da média temporal do produto dos dois sinais resulta na intensidade sonora. Já no campo reativo, a pressão e velocidade de partícula estão 90° defasados entre si. Logo, o produto dos dois sinais resulta em um valor nulo de intensidade [23]. A Fig. 3.5 ilustra a relação existente entre pressão e velocidade de partícula nos dois tipos de campo citados.

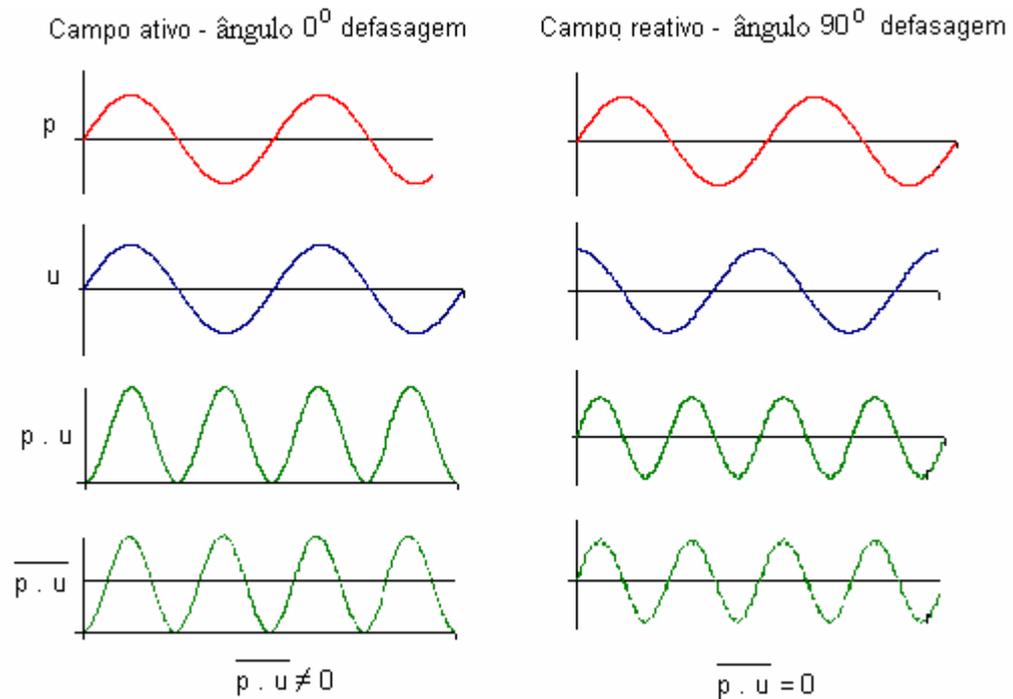


Figura 3.5 Parcelas ativa e reativa do campo sonoro

3.4 Erros Inerentes à Técnica de Medição de Intensidade Sonora

3.4.1 Erro de Diferença Finita

O erro causado pela aproximação do gradiente de pressão por meio de uma reta é denominado erro de diferença finita [25]. Esta aproximação introduz erros principalmente em altas frequências. A estimativa do gradiente será imprecisa a partir do momento em que o comprimento de onda tornar-se relativamente pequeno quando comparado ao comprimento do espaçador dos microfones, conforme ilustrado nas Figs. 3.6 e 3.7. Para um dado espaçamento entre os microfones, haverá um limite de alta e baixa frequência a partir do qual os erros irão crescer significativamente.

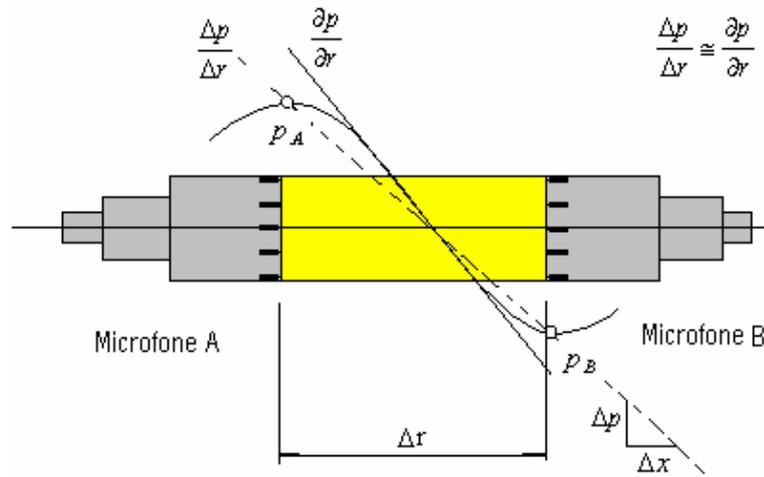


Figura 3.6 Aproximação do gradiente de pressão em baixas frequências

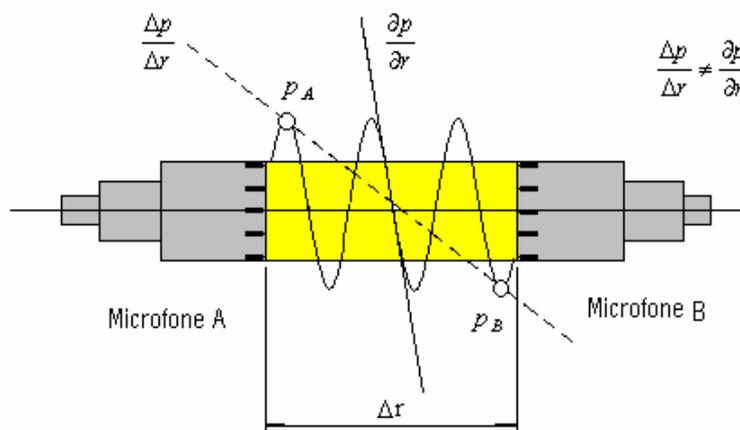


Figura 3.7 Aproximação do gradiente de pressão em altas frequências

A aproximação feita através da linha reta introduz dois tipos de erros em alta frequência: pressão e velocidade de partícula incorretos [26]. O efeito causado por esta combinação é estimado assumindo uma onda plana senoidal propagada ao longo do eixo longitudinal dos microfones, conforme a Eq. (3.23), utilizada para determinar o *range* de frequência para um determinado espaçador:

$$L_{erro} = 10 \log \left[\frac{\text{sen} \left(2p \frac{\Delta r}{l} \right)}{2p \frac{\Delta r}{l}} \right]. \quad (3.23)$$

A Fig. 3.8 demonstra os gráficos de erros de aproximação em função da frequência para espaçadores de 6mm, 12mm e 50mm, plotados a partir da Eq. (3.23). Observa-se que, quanto menor for o tamanho do espaçador, menor será o erro em altas frequências.

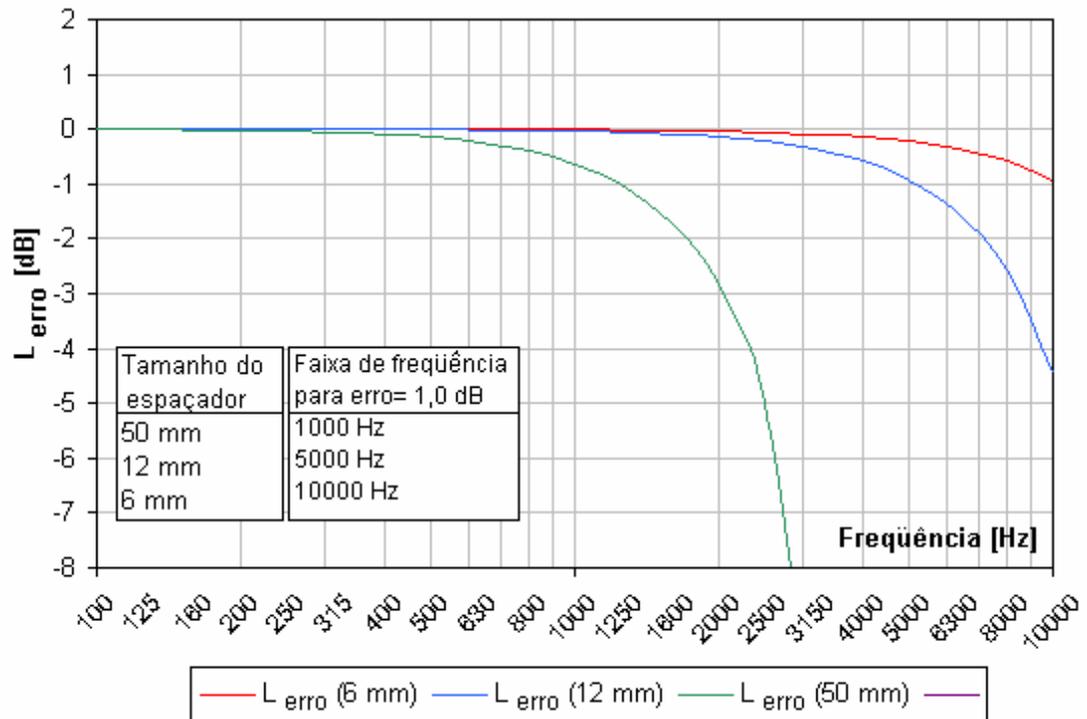


Figura 3.8 Análise dos erros em altas frequências em função dos espaçadores

3.4.2 Erro de Diferença de Fase

Ao ser utilizada a técnica de dois microfones, para a determinação da intensidade sonora, deve ser levada em conta a limitação dos equipamentos de medição, a fim de garantir a precisão dos resultados que serão obtidos [19].

A medição de intensidade sonora depende basicamente da relação de fase entre os sinais de pressão sonora captadas pelos microfones, a qual depende da natureza do campo sonoro e da localização e orientação da sonda dentro do campo [25]. Logo, para se obterem resultados precisos, deve-se determinar o erro de casamento de fase introduzido pelo próprio instrumento de medição (canais de entrada e microfones). O erro de diferença de fase introduz erros em baixas frequências, a partir do momento em que o comprimento de onda torna-se grande em relação ao comprimento do espaçador, e a diferença de fase entre as pressões medidas nos respectivos microfones é pequena.

De fato, em frequências muito baixas, a diferença é tão pequena que pode ser mascarada pelo erro de fase da sonda e do analisador. A parcela $(2p \cdot \Delta r) / l = k \Delta r$ da Eq. (3.23) corresponde à diferença de fase de dois microfones posicionados em um plano de onda senoidal, onde a sonda é orientada na direção de propagação [23]. Se o erro de fase ϕ existe entre dois canais de medição, a diferença de fase associada será $[(2p \cdot \Delta r) / l] \pm j$ ao invés da principal diferença de fase $k \Delta r$, ocasionando assim modificação na Eq. (3.23) de aproximação de erro, resultando na Eq. (3.24):

$$L_{erro} = 10 \log \left[\frac{\text{sen} \left(2p \frac{\Delta r}{l} \pm j \right)}{2p \frac{\Delta r}{l}} \right]. \quad (3.24)$$

É evidente que, em analogia à situação anterior, quanto maior for o tamanho do espaçador, menor será o erro em baixas frequências. O erro de fase máximo estimado gerado por um instrumento de precisão, como o analisador espectral B&K 2145 [23], é de $0,3^\circ$. As curvas da Fig. 3.9 indicam o erro subestimado para vários comprimentos de espaçadores, gerado a partir da Eq. (3.25):

$$L_{erro} = 10 \log \left[\frac{\text{sen} \left(2p \frac{\Delta r}{l} - j \right)}{2p \frac{\Delta r}{l}} \right]. \quad (3.25)$$

Considerando o intercâmbio dos microfones, pode-se superestimar o erro de fase, conforme a Fig. 3.10, gerado a partir da eq. (3.26):

$$L_{erro} = 10 \log \left[\frac{\text{sen} \left(2p \frac{\Delta r}{l} + j \right)}{2p \frac{\Delta r}{l}} \right]. \quad (3.26)$$

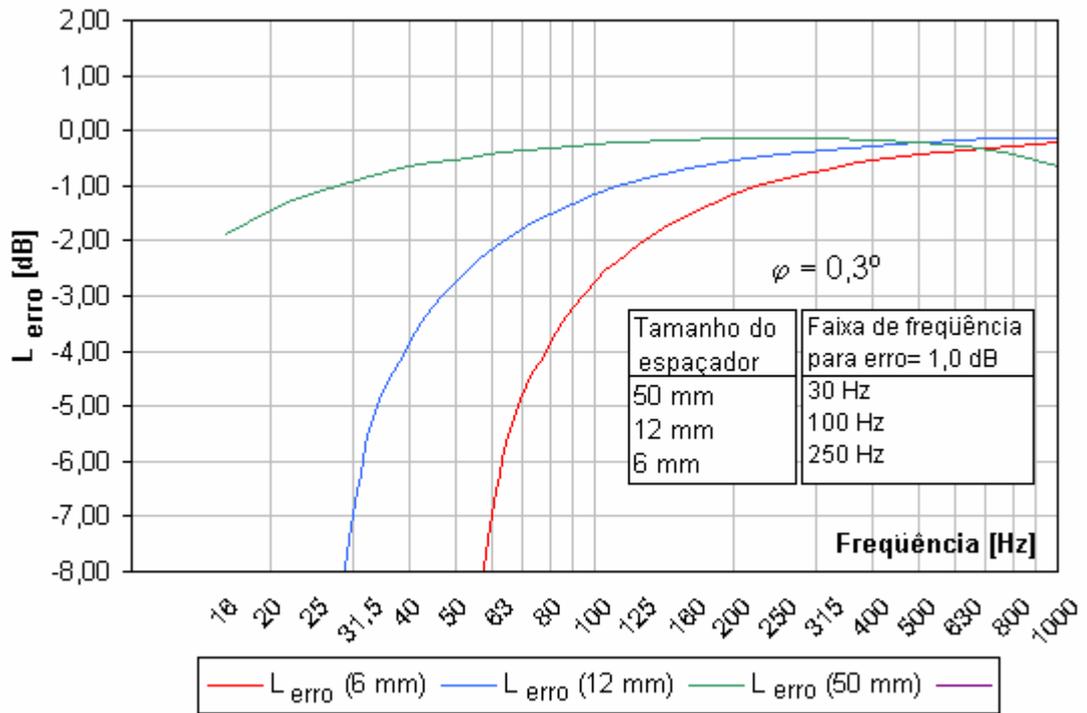


Figura 3.9 Erro de diferença de fase, subestimado em baixas frequências.

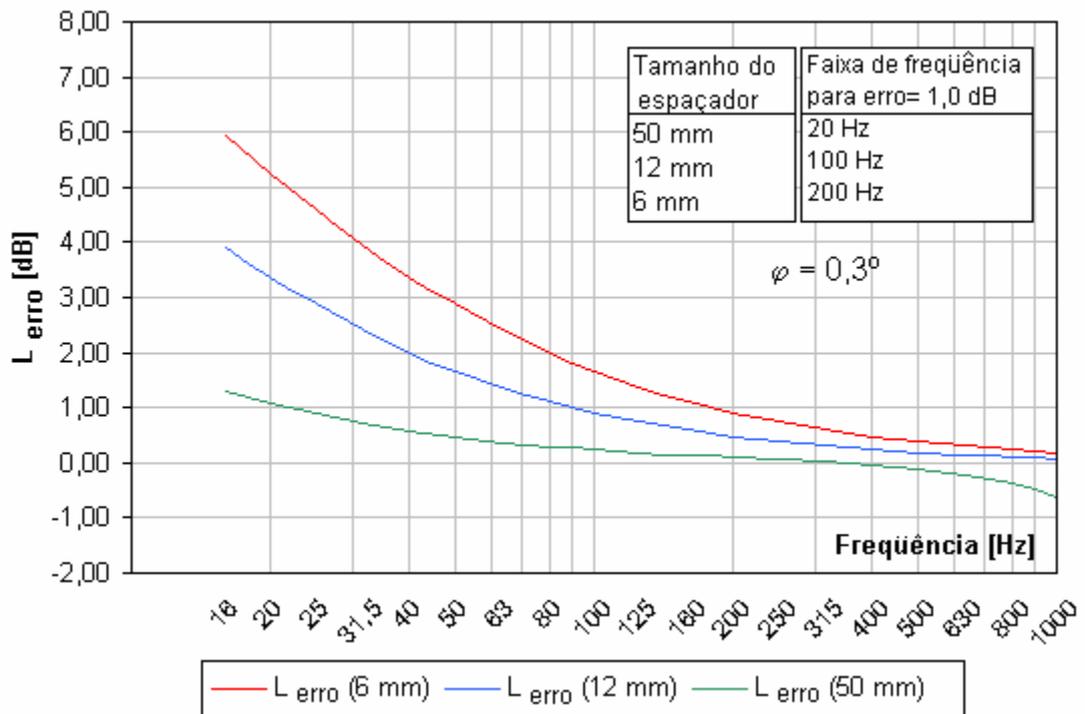


Figura 3.10 Erro de diferença de fase, superestimado em baixas frequências.

O erro de fase pode resultar também na distorção das características direcionais da sonda [23]. A direção para mínima sensibilidade é indicada pelo ângulo ψ formado pelo ângulo perpendicular da sonda, geometricamente, dada pela Eq. (3.27):

$$\Psi = a \operatorname{sen}\left(\frac{j \cdot I}{2p \cdot \Delta r}\right). \quad (3.27)$$

A Fig. 3.11 demonstra o ângulo que deve ser compensado com uma função da frequência para um erro de fase de $0,3^\circ$, em vários tamanhos de espaçadores.

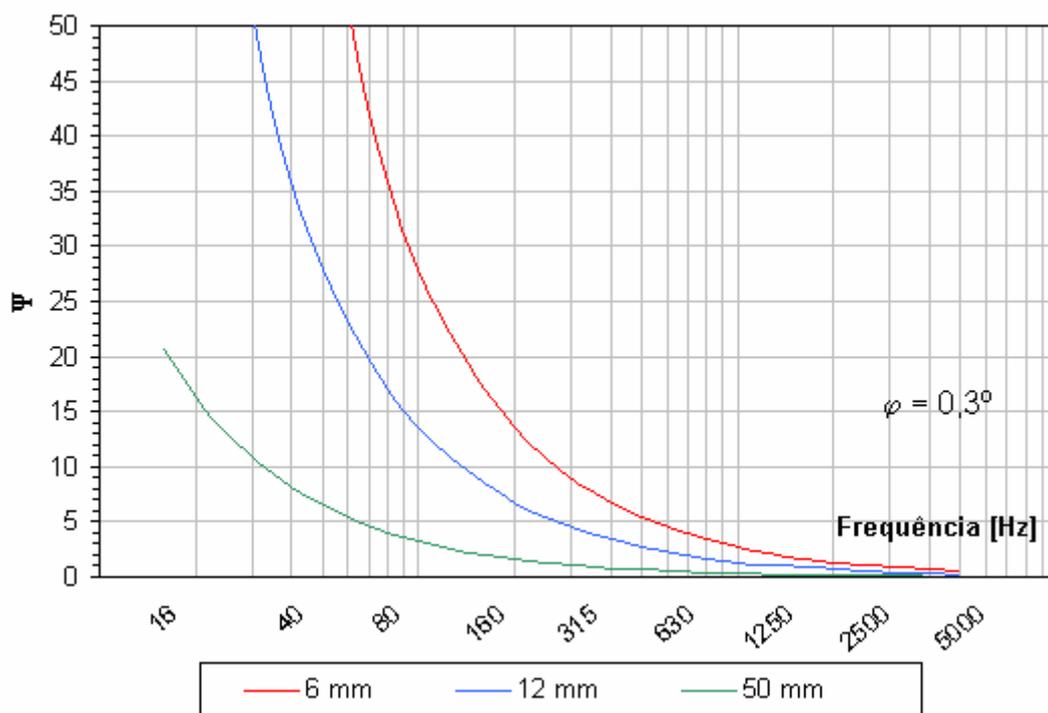


Figura 3.11 Deslocamento angular do eixo mínimo

Sendo assim os microfones de uma sonda de intensidade sonora são selecionados especificamente de forma que as respostas de fase dos mesmos apresentem a mínima diferença possível (situação conhecida como microfones casados).

Logo, para uma medição de intensidade sonora com precisão, é necessário definir a capacidade dinâmica da instrumentação, ou seja, a faixa de frequência

confiável, levando em consideração as limitações tanto em alta como em baixa frequência [19].

Determina-se o erro de fase da instrumentação através de um dispositivo que promove um campo altamente reativo, de intensidade nula em ambos os microfones, conforme a Fig 3.12. O ruído é gerado por uma fonte de ruído branco¹³ injetada na parte superior da câmara.

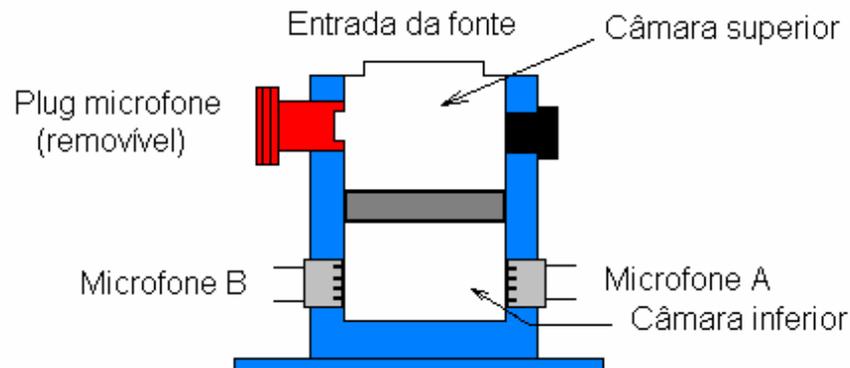


Figura 3.12 Acoplador para calibração da sonda de intensidade sonora

O valor de intensidade medido será decorrente ao não casamento de fase elétrico do sistema de medição, denominado intensidade residual L_{I_o} . O nível de intensidade residual aumenta à medida em que a pressão relativa aumenta, portanto, é conveniente referir-se a este termo como "índice de pressão - intensidade residual" d_{PI_o} , dada pela Eq. (3.28):

$$d_{PI_o} = L_P - L_{I_o} \quad (3.28)$$

Outro fator que deve ser considerado para se obter resultados precisos é a diferença de fase das pressões sonora medidas nos microfones, que depende basicamente da natureza do campo sonoro, posição e orientação do elemento testador e da sonda no campo, e o casamento dos canais dos transdutores. Conforme ressaltado, dependendo do tipo de campo sonoro, podem haver ondas de pressão sonora, mesmo que não haja fluxo de energia sonora, ou seja, de intensidade nula. A relação existente entre nível de pressão sonora e

¹³ Ruído branco é caracterizado pela energia sonora em uma larga faixa de frequência de amplitude constante em todas as bandas de frequência.

nível de intensidade sonora é denominado "índice de pressão - intensidade" d_{PI} que indica a qualidade do campo sonoro dado pela Eq. (3.29):

$$d_{PI} = L_P - L_I \quad (3.29)$$

Na prática, o índice d_{PI} é medido em uma base global do campo de medição (média de amostragem).

A má adequação de fase imposta pelos fatores acima introduzirá um erro na estimativa da intensidade, dado pela Eq. (3.30):

$$L_{erro} = 10 \log \left[1 + \left(10^{\frac{L_f}{10}} - 1 \right)^{-1} \right], \quad (3.30)$$

onde: L_f , denominado "índice de erro de fase", é dado pela diferença entre d_{PI_0} e d_{PI} , conforme a Eq. (3.31):

$$L_f = d_{PI_0} - d_{PI} . \quad (3.31)$$

Tal índice traz informação do erro de fase, contido no parâmetro d_{PI_0} , e da qualidade do campo sonoro d_{PI} .

O índice de erro de fase L_f deve ser maior que 7 dB para obter 95% de confiabilidade em um intervalo de 1 dB, conforme demonstrado no gráfico da Fig. (3.13), plotado a partir da Eq. (3.30). O procedimento acima se baseia essencialmente no procedimento descrito pela norma CD 9614-2 [27]. Na referida norma, d_{PI_0} é chamado de *Fpi*.

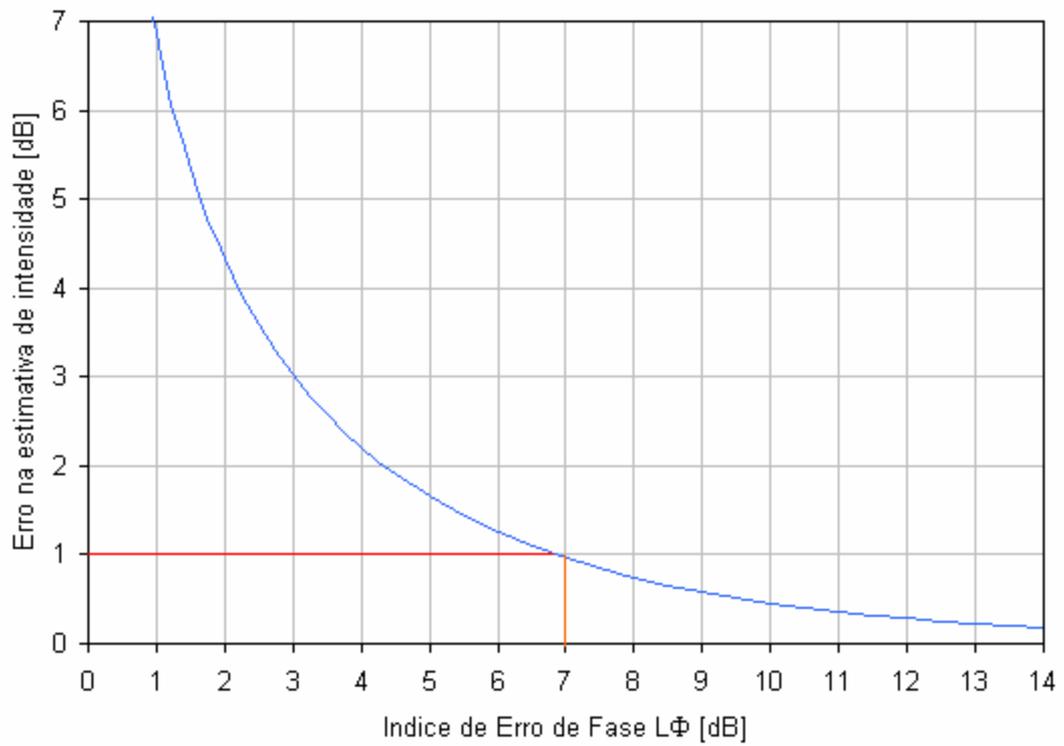


Figura 3.13 Erro na estimativa de intensidade

A capacitação dinâmica é determinada pelos pontos de interseção entre as curvas geradas pelo índice d_{PI} e pelo índice d_{PI_0} , esta subtraída de um fator de erro constante de no mínimo 7 dB, conforme gráfico da Fig 3.14.

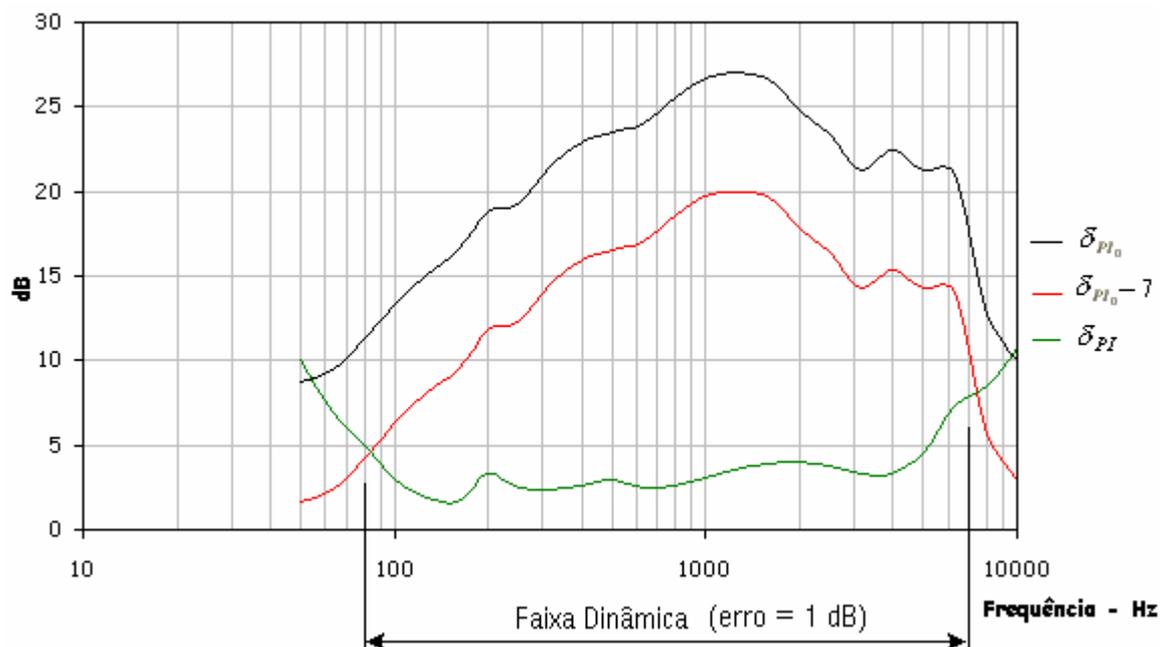


Figura 3.14 Capacitação dinâmica da instrumentação

3.4.3 Erro de Estimativa de Espectro

O erro ocasionado no cálculo de uma estimativa espectral é igual a $(BT)^{-\frac{1}{2}}$, (intervalo de 68 % de confiança) para $BT \geq 10$, onde B é a largura da banda e T é o tempo de média efetivo [28].

Uma medição de intensidade é um cálculo de espectros cruzados cujo erro ocasional é uma função da coerência entre os dois sinais além do produto BT .

De uma forma geral, os maiores erros ocasionais acontecem onde uma faixa estreita de interesse opera em um ambiente reverberante na presença de outras forças não correlatadas. Nestas circunstâncias, muitas vezes são necessários tempos muito prolongados para se reduzir os erros ocasionais a proporções aceitáveis.

3.4.4 Erro de Pesquisa de Difração

Este erro origina-se pela distorção do campo sonoro devido à presença do elemento testador e a sonda. Tal erro é minimizado pelos fabricantes, mas coloca um limite muito superior na frequência [19].

3.4.5 Erro de Direcionamento da Sonda

Quando se mede a intensidade sonora, a sonda deve manter-se relativamente perpendicular à superfície de medição, a fim de evitar erros [26]. A Tab. 3.1 indica o erro causado em função da inclinação do eixo da sonda em relação à superfície de medição.

Tabela 3.1 Erro de direcionamento da sonda para vários ângulos

Inclinação	Erro (dB)
0°	0,00
10°	0,07
30°	3,50
60°	5,12

3.5 Calibração

A calibração dos microfones é de extrema importância para garantir resultados confiáveis nas medições. Para uma completa calibração do equipamento de medição de intensidade sonora, é necessário o seguinte procedimento¹⁴:

- Calibração da pressão sonora dos microfones individualmente;
- Verificação da intensidade sonora e da velocidade de partícula;
- Levantamento do índice de pressão - intensidade residual.

Calibração da pressão sonora

A calibração da pressão sonora é efetuada posicionando os microfones face a face nas entradas da câmara superior do acoplador demonstrado de forma esquemática anteriormente na Fig 3.12, de forma que ambos os microfones recebam o sinal de pressão sonora injetadas por uma fonte, conforme a Fig. 3.15. Esta fonte, denominada "pistonphone", emite um nível de pressão sonora constante de aproximadamente 124 dB na frequência de 251,2 Hz. Porém quando utilizado juntamente com o acoplador, o nível é reduzido para 118 dB.

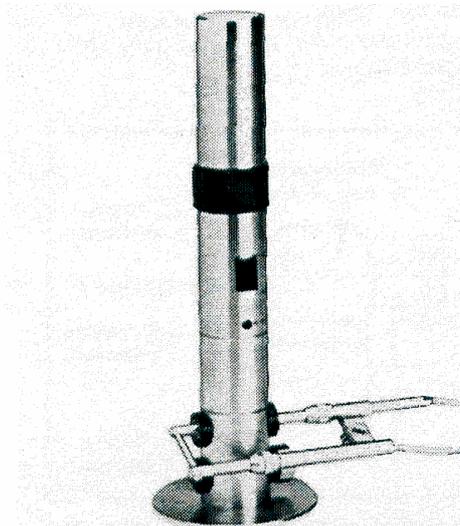


Figura 3.15 Calibração da pressão sonora

Verificação da velocidade de partícula

As verificações da velocidade de partícula e da intensidade sonora são feitas com o procedimento análogo ao descrito acima, entretanto os microfones são posicionados em câmaras diferentes, conforme a Fig. 3.16. Com este arranjo, o

acoplador causa uma diferença de fase entre as pressões sonoras dos microfones, simulando os níveis de intensidade sonora e velocidade de partícula.

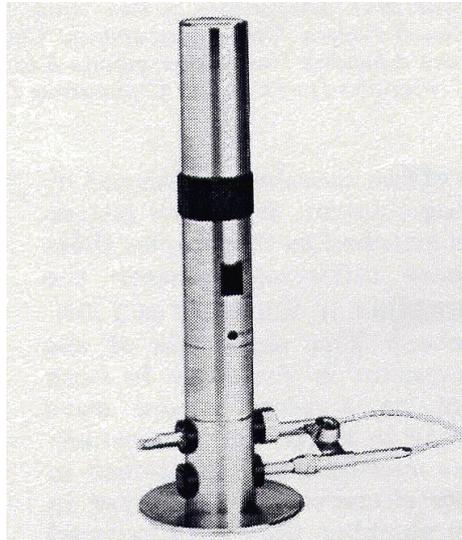


Figura 3.16 Verificação da velocidade de partícula

Medição da pressão – intensidade residual

A medição da pressão - intensidade residual é feita injetando um ruído de faixa larga de frequência (ruído branco) através de uma fonte apropriada, conforme a Fig. 3.17. Esta medição deve ser utilizada para corrigir o efeito de mal casamento de fase no valor de intensidade medida em cada banda de frequência.

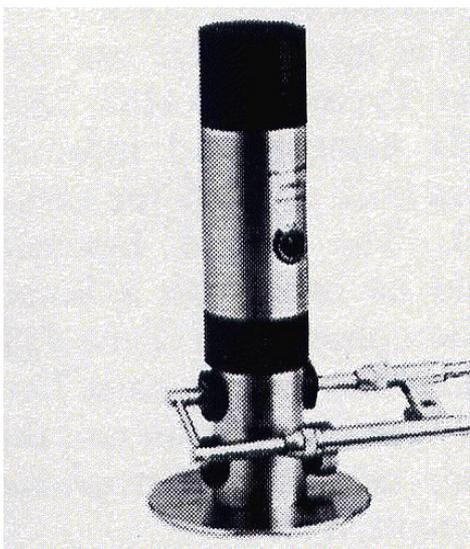


Figura 3.17 Medição da pressão – intensidade residual

¹⁴ Procedimento baseado na cadeia de calibração B&K 3541

Capítulo 4

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Metodologia das Provas

O trabalho experimental foi desenvolvido em duas etapas distintas realizadas de forma independente e seqüencial.

Na primeira etapa, o objetivo foi desenvolver uma metodologia de prova para identificação da principal fonte de ruído externo de um veículo, através da técnica de intensidade sonora. A escolha desta técnica foi motivada pela sua maior praticidade e rapidez de execução em relação a outras técnicas disponíveis, além de proporcionar uma boa precisão nos resultados. Os testes foram realizados sobre rolo dinamométrico no interior de uma câmara semi anecóica, reproduzindo condições bastante próximas das provas de ruído de passagem realizadas em pista. Em função disto, os parâmetros para execução desta prova foram determinados a partir de uma medição de ruído de passagem na pista, utilizando o sistema de aquisição por telemetria. Com base nos resultados apresentados em forma de mapas de intensidade sonora e do cálculo de potência sonora das superfícies que correspondem às fontes de ruído em análise, foi elaborado um *ranking* das principais fontes.

A segunda etapa foi elaborada com o objetivo de estabelecer uma correlação entre as medições em campo próximo, obtidas com a técnica de intensidade sonora, e as medições em campo distante, obtidas em ensaios de ruído de passagem em pista, segundo procedimento descrito pela NBR 8433. Para tal, foi empregada a técnica de enclausuramento das fontes de ruído, denominado *quiet car*, através da qual foi possível quantificar individualmente as fontes de ruído externo através de medições em campo distante. Da mesma forma, foi elaborado um *ranking* das principais fontes, com base nos resultados apresentados em 2ª e 3ª marcha.

4.2 Especificações Técnicas do Veículo

O veículo que foi utilizado para o desenvolvimento desta pesquisa foi um modelo FIAT Stilo 1.8 8V. Exclusivamente para este trabalho, foi mantida a mesma configuração do veículo em fase inicial de projeto, visando criar uma situação mais real de aplicação desta pesquisa. Os dados técnicos relevantes para a realização dos testes experimentais encontram-se descritos na Tab. 4.1 abaixo.

Tabela 4.1 Especificações técnicas do veículo

1 - Motor	Número de cilindros:	04
	Cilindrada total:	1795,0 cc
	Ciclo / Tempo:	OTTO / 04
	Taxa de compressão:	9,4
	Alimentação / Combustível:	Aspirado / Gasolina
	Potência máxima:	103 CV a 5250 rpm
	Torque máximo:	17,0 kgf.m a 3200 rpm
	Nº de válvulas:	08
2 - Transmissão	Número de marchas:	05
	Relação de marchas: 1ª -	3,909
	2ª -	2,238
	3ª -	1,520
	4ª -	1,156
	5ª -	0,919
	Diferencial -	3,867
3 - Pneus	Tipo:	Radial
	Fabricante:	Goodyear
	Dimensões:	195/65 R15
	Diâmetro dinâmico:	1,946 m

4.3 Aplicação da Técnica da Intensidade Sonora

Nesta primeira etapa, foi aplicada a técnica de intensidade sonora para a identificação das fontes de ruído externo do veículo. O experimento foi realizado na seguinte seqüência:

- Determinação dos parâmetros de prova;
- Medição da intensidade sonora sobre rolo dinamométrico.

4.3.1 Determinação dos Parâmetros de Prova

Os parâmetros utilizados para medição de intensidade sonora sobre rolo foram obtidos em prova de ruído de passagem em pista, segundo procedimento descrito pela Norma NBR 8433. Tais parâmetros, baseados no maior nível de ruído registrado durante a passagem do veículo pela linha dos 20 m, consistem em:

- Regime de rotação;
- Posição do veículo ao longo da linha dos 20 m;
- Conhecimento da lateral do veículo de maior emissão de ruído.

Para obtenção destes parâmetros, a medição de ruído externo foi realizada utilizando o sistema telemetrado, conforme a Fig 4.1, a qual fornece além do nível máximo de ruído, informações adicionais como rotação, velocidade, aceleração e posição em que o mesmo ocorre ao longo da linha dos 20 m, tanto em 2ª como em 3ª marcha. O sistema reconhece a posição do veículo devido a um sensor de aproximação posicionado a 10 m antes da linha de início de prova. Os sinais de rotação do motor foram registrados por um tacômetro digital interligado a uma unidade de transmissão, e os sinais de velocidade registrados por um radar, ambos transmitidos telemetricamente a um receptor de sinal interligado ao analisador espectral que processa todos os dados simultaneamente. Os dados são analisados e processados via CPU através de um *software* da *Brüel & Kjaer* (ver aparato técnico experimental no Item 4.5).

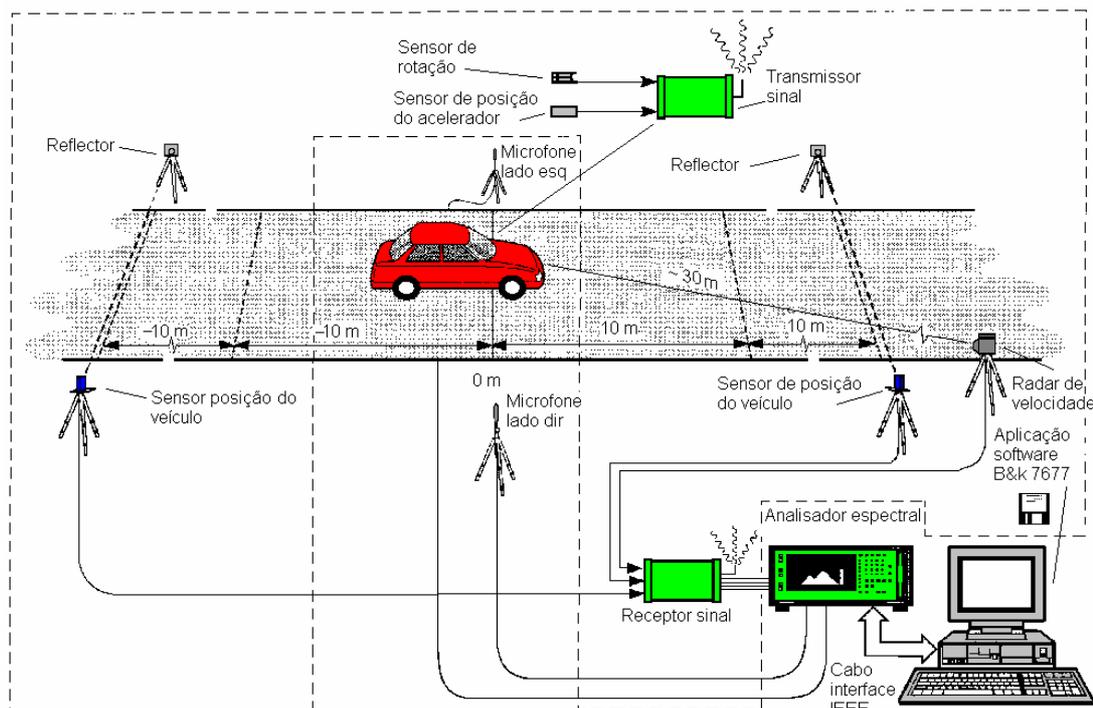


Figura 4.1 Sistema telemétrico para medição de ruído externo

O ensaio foi realizado em 2ª e 3ª marchas sucessivamente, nas velocidades e rotações descritas na Tab. 4.2, calculadas a partir dos dados da Tab. 4.1.

Tabela 4.2 Dados para execução da prova de ruído de passagem

Marcha	Velocidade de aproximação (km/h)	Rotação do motor (rpm)
2ª	50,0	3706
3ª	50,0	2517

Repetibilidade

As provas foram executadas obedecendo às especificações da norma NBR 8433, a qual determina um número mínimo de 03 medições em cada marcha, e embora considere válidas medições cuja diferença entre elas não ultrapasse a 2,0 dB(A), foram consideradas válidas as medições cuja diferença não ultrapassaram 1,0 dB(A). Tal precisão foi obtida em função da possibilidade de monitoramento da rotação, velocidade, e do momento exato de acionamento do pedal do acelerador, proporcionada pelo sistema telemétrico.

Especificação do local de testes

Foi utilizada a pista de provas nas dependências da Fiat Allis situada na região de Sarzedo - MG. A pista obedece aos requisitos da norma NBR 8433, a qual determina uma área de aceleração com raio mínimo de 10 m em torno do centro do local de teste, superfície de asfalto plana e retilínea, e também livre de qualquer obstáculo em um raio de 50 m, de modo que não possa haver reflexão do ruído emitido pelo veículo. O ruído de fundo medido foi de 48 dB(A), obedecendo ao limite mínimo de 10 dB(A) abaixo do menor nível de ruído emitido pelo veículo.

Condições ambientais

As medições foram realizadas com tempo bom, obedecendo a condições impostas pela norma NBR 8433, conforme a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Condições ambientais do teste de ruído externo

Condições ambientais	Valores medidos	Valores especificados
Velocidade do vento (m/s)	1,0 a 2,5	< 5
Temperatura ambiente (°C)	28° a 31°	10° a 35°
Umidade relativa do ar (%)	60 a 45	-----

4.3.2 Medição de Intensidade Sonora Sobre Rolo

A identificação das principais fontes sonoras do veículo foi efetuada aplicando a técnica de intensidade sonora, a partir dos parâmetros obtidos na prova de ruído de passagem. A prova foi realizada em uma câmara semi-anecóica equipada com rolos dinamométricos, através da qual foi possível reproduzir algumas das condições do ensaio realizado em pista. Para tal, a medição foi realizada com veículo a plena carga (máxima aceleração), em rotação constante, sendo esta a mesma em que ocorreu o maior nível de ruído na prova realizada em pista.

A câmara semi-anecóica utilizada, situada nas dependências do campo de provas da GM (General Motors) em Indaiatuba SP, possui uma dimensão aproximada de 1400 m³ e frequência de corte de 100 Hz. O campo sonoro da câmara pode ser classificado como campo livre, portanto ideal para medições

de intensidade sonora. O banco dinamométrico possui dois rolos de 2m de diâmetro recobertos com uma camada áspera, proporcionando assim uma boa aderência dos pneus e também uma boa representatividade das condições de superfície da pista de provas.

As medições foram realizadas em um plano vertical paralelo à lateral do veículo, também no mesmo lado onde foi registrado o maior nível de ruído nas provas em pista. Como referência para direcionamento da sonda foi utilizada uma malha imaginária de 1,0 m de altura e 5,4 m de comprimento, proporcionando uma área total de aproximadamente $5,17 \text{ m}^2$, incluindo a projeção de 0,6 m distante da frente e da traseira do veículo. A área foi subdividida em 135 elementos, com comprimento de $20 \times 20 \text{ cm}$ entre os pontos. A malha de referência foi posicionada a uma distância de 15 cm da superfície de medição (distância de referência para posicionamento da sonda em relação a lateral do veículo). As medições foram realizadas nas 03 direções ortogonais em cada ponto (X, Y e Z), pois nesta condição obtêm-se informações sobre características vetoriais do fluxo irradiado no plano medido. O método empregado foi o de medição ponto a ponto, por ser considerado mais preciso do que o método de varredura.

Por se tratar de uma prova em condições severas, uma atenção especial foi dada no intuito de prevenir superaquecimentos. Para tanto, a câmara de testes dispõe de um sistema de fornecimento de ar a baixa velocidade na área frontal do veículo, a uma temperatura próxima de 10° C , de forma a minimizar o superaquecimento do veículo. Além disto, a temperatura do óleo do motor foi monitorada durante o andamento da prova, com paradas sucessivas a cada instante em que a mesma atingia 120° C , que ocorria aproximadamente a cada 8 min, e reiniciada após estabilizada em 90° C . O tempo de aquisição de cada ponto foi de 10 s, considerado suficiente para se obter uma boa média de integração. A faixa de frequência utilizada está compreende entre 100 a 5000 Hz, em função do tipo de espaçador utilizado (12 mm), e largura de banda de $1/3$ de oitava. A escolha dos parâmetros acima foi motivada, por ser mais freqüentemente utilizada em trabalhos de aplicação de intensidade sonora na área automobilística. A Fig. 4.2 ilustra a disposição do veículo na câmara durante a execução da medição.



Figura 4.2 Medição de intensidade sonora

As medições de intensidade sonora foram realizadas utilizando uma sonda B&K do tipo face a face e um analisador espectral bicanal B&K 2145. Os dados foram processados em *software* também B&K, e analisados através de mapas de cores e mapas de vetores, meio pelo qual foi determinado o *ranking* das fontes de ruído (ver aparato técnico experimental no Item 4.5).

4.3.3 Calibração do Equipamento de Medição

Para obtenção de uma calibração adequada da instrumentação foram controlados a pressão sonora nos microfones individuais, o nível de intensidade sonora e a velocidade da partícula, conforme procedimento descrito no Item 3.5 do Capítulo 03. Os parâmetros obtidos para calibração foram:

- Pressão atmosférica local: 980 hPa;
- Temperatura ambiente: 25°C;
- Espaçador dos microfones: 12 mm.

Nível de pressão sonora

O parâmetro que influencia nesta calibração é apenas a pressão atmosférica. A correção da instrumentação foi obtida da seguinte forma:

Nível de referência emitido pelo calibrador: 118,0 dB

Correção do barômetro em função da diferença entre pressão ambiente local e pressão atmosférica padrão (nível do mar): - 0,3 dB.

Nível de pressão calculado que o instrumento deveria indicar = 117,7.

Correção do equipamento: Microfone A = 0,9 dB;

Microfone B = 0,6 dB.

Nível de Intensidade Sonora

A verificação do nível de intensidade sonora foi obtida conferindo o valor indicado no instrumento de medição. Os parâmetros para controle desta variável são a temperatura e o espaçador. O valor de referência para verificação foi calculado da seguinte forma:

Nível de referência emitido pelo calibrador: 118,0 dB.

Correção da temperatura = $(25 - 20) \times 0,024 = + 0,12$ dB.

Correção do espaçador dos microfones = + 6,2 dB.

Nível de intensidade calculado que o equipamento deveria indicar = 124,32 dB.

Nível de intensidade verificado no equipamento = 124,0 dB.

Nível de velocidade de partícula

O controle da velocidade de partícula foi obtido também apenas por meio de uma verificação. Os parâmetros que influenciam nesta variável são a pressão atmosférica, a temperatura ambiente e distância do espaçador dos microfones.

O valor de referência para esta verificação foi calculado da seguinte forma:

Nível emitido pelo calibrador: 118,0 dB.

Correção do barômetro = - 0,3 dB.

Correção da temperatura = $(25 - 20) \times 0,05 = + 0,25$ dB.

Correção do espaçador dos microfones = + 12,4 dB.

Nível de velocidade que o equipamento deveria indicar = 130,35 dB.

Nível de velocidade verificado no equipamento = 129,6 dB.

4.3.4 Validação das Medições de Intensidade Sonora

As medições de intensidade sonora foram validadas determinando os erros proporcionados pela instrumentação utilizada e pelo campo sonoro no local das medições, segundo procedimento descrito nos Itens 3.4.1 e 3.4.2 do Capítulo 03. Para tal, foram levantados o índice pressão - intensidade residual d_{PI} , o

qual traz informações sobre a qualidade da instrumentação em função do erro de casamento de fase dos canais e dos transdutores de pressão, medido por meio de um ruído branco injetado por uma fonte adaptada sobre o acoplador, e o levantamento do índice de pressão - intensidade d_{PI} que indica a qualidade do campo sonoro, medido através de uma média de amostragem das medições realizadas. Com base nas duas curvas levantadas, foi determinada a capacidade dinâmica do sistema de medição L_d , subtraindo 10 dB do índice de pressão - intensidade residual, a fim de se obter uma precisão no erro da estimativa de intensidade no mínimo de 0,5 dB.

4.4 Aplicação da Técnica Quiet car

Nesta segunda etapa, foi aplicada a técnica de abafamento das fontes de ruído, denominado metodologia “*silent car*” (algumas literaturas tratam como “*quiet car*” ou “*wrapping*”), para identificação das fontes de ruído externo. Esta metodologia consiste basicamente em caracterizar individualmente as fontes de ruído externo por meio de um enclausuramento ideal das demais fontes, fazendo com que o ruído emitido pela fonte descoberta sobressaia em relação às demais. Desta forma foi possível quantificar a contribuição do ruído irradiado por cada fonte individualmente, sem a influência das demais. A individualização foi definida visando otimizar ao máximo o processo de remoção e reposição dos isolamentos em cada fonte caracterizada, obedecendo à seguinte seqüência:

1. Pneus;
2. Sistema de aspiração;
3. Boca de exaustão dos gases;
4. Conjunto motopropulsor;
5. Parede do sistema de exaustão;

4.4.1 Procedimento utilizado para abafamento das fontes

A atenuação do ruído das fontes foi obtida aplicando alguns princípios básicos de tratamento do som [15], como a neutralização de ondas sonoras por meio de câmara de “*helmholts*”, barreiras acústica e absorção sonora por meio de materiais fonoabsorventes, conforme são descritos a seguir:

Sistema de aspiração

O ruído emitido por esta fonte foi atenuado por uma câmara com aproximadamente 75 l de volume construída em chapa de aço de 1,0 mm de espessura, interligada à entrada da boca de aspiração, atuando como ressoador “*helmholts*”. As paredes internas do volume foram revestidas por uma manta asfáltica termofusível de 2,5 mm de espessura que, somada à parede da chapa, proporcionou maior eficácia da barreira acústica. Nas paredes internas da câmara foi adotada uma manta de feltro fenólico de 20 mm de espessura que atuou como absorvente acústico. A manta foi revestida ainda com uma fina tela, cuja função foi a de impedir a perda de material fonoabsorvido para o interior do sistema de aspiração. Foi adotado também um prolongamento na entrada do volume por meio de um tubo de neoprene, resultando em uma altura de ~ 3,0 m em relação à entrada da boca de aspiração, conforme esquema da Fig. 4.3.

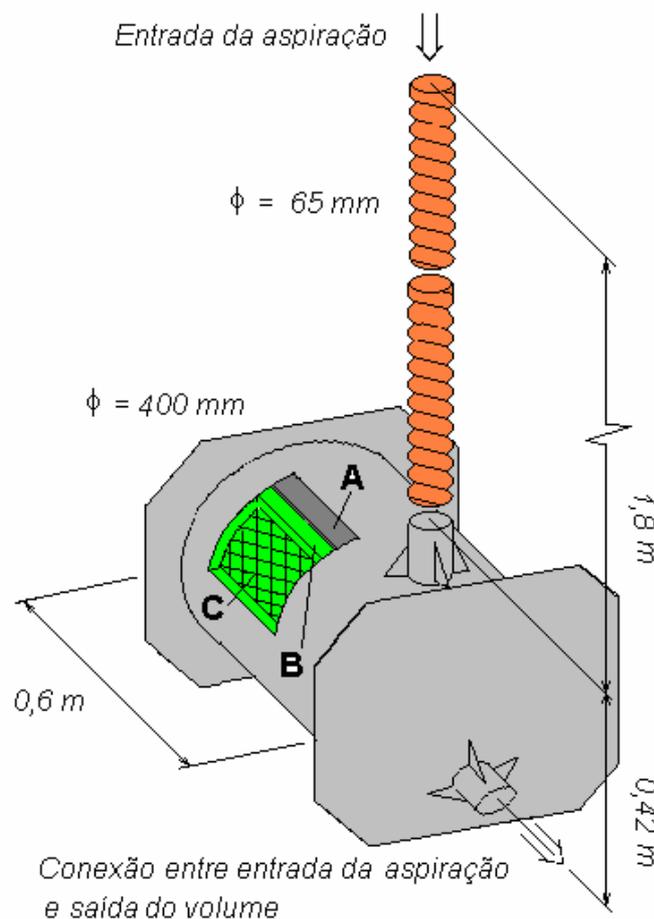


Figura 4.3 Esquema do volume utilizado na atenuação do ruído de aspiração. A seção em corte indica: **A** - Placa asfáltica termofusível; **B** - Manta de feltro fenólico; **C** - Tela de proteção.

O volume foi posicionado sobre o capô, conforme a Fig. 4.4, interligada a entrada da aspiração, de forma que a configuração original da entrada de aspiração não fosse alterada.



Figura 4.4 Posicionamento do volume na entrada da aspiração de ar

Boca de saída dos gases de exaustão

O ruído emitido por esta fonte foi atenuado através dos mesmos princípios aplicados na atenuação do ruído de aspiração. A câmara utilizada possui um volume de aproximadamente 108 l, ainda maior que a utilizada na aspiração. O material utilizado como fonoabsorvivo nas paredes internas foi uma manta de lã de rocha, em função da elevada temperatura de saída dos gases. Da mesma forma, a saída dos gases foi prolongada a uma altura cerca de 2,5 m em relação à boca de escape por meio de um tubo de aço, eliminando assim ainda mais a influência do ruído causado por esta fonte, conforme a Fig. 4.5.

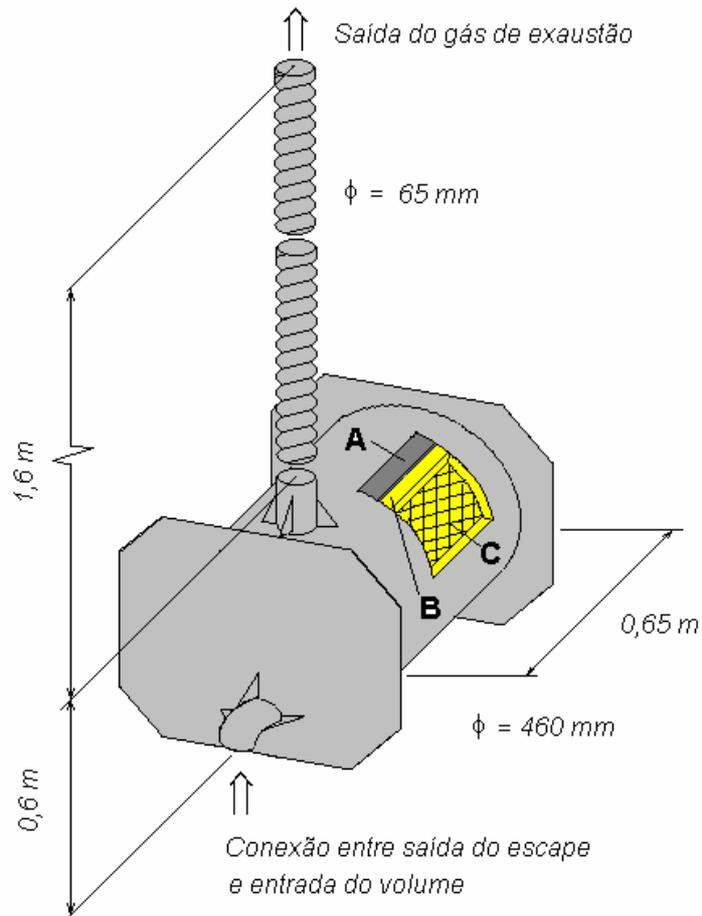


Figura 4.5 Esquema do volume utilizado na atenuação do ruído de boca de escape. A seção em corte indica: **A** - Placa asfáltica termofusível; **B** - Manta lã de rocha; **C** - Tela de proteção.

O volume foi posicionado na parte traseira do veículo, conforme a Fig. 4.6.

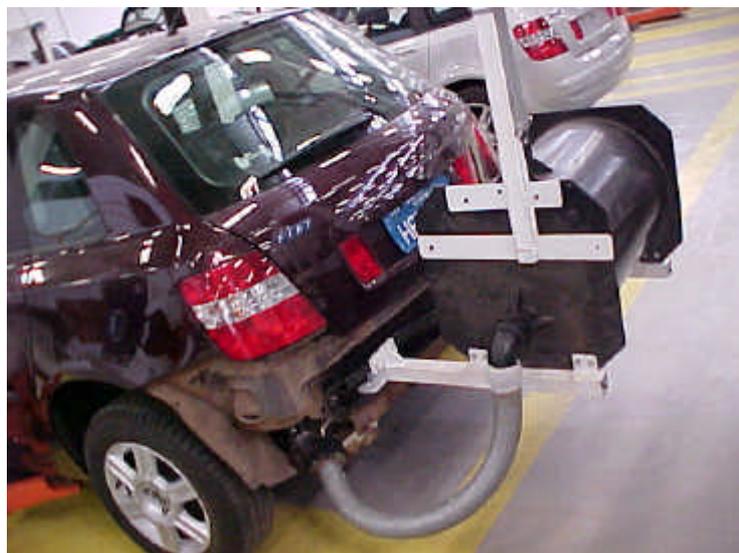


Figura 4.6 Posicionamento do volume nas proximidades da saída dos gases de escape

Pneus

A atenuação desta fonte foi obtida adotando pneus "sleek" em substituição aos pneus radiais originais. A principal característica deste tipo de pneu é a superfície da banda de rodagem totalmente lisa, conforme a Fig. 4.7, eliminando assim os efeitos sonoros causados pelo impacto dos elementos da banda de rodagem com o solo.



Figura 4.7 Pneu "sleek"

Outro fator importante observado foi de manter as características dimensionais equivalentes ao pneu original, conforme a Tab. 4.4, a fim de não alterar significativamente os parâmetros de prova de ruído externo.

Tabela 4.4 Dados dimensionais dos pneus utilizados para provas de ruído de passagem

Tipo	Fabricante	Dimensões	Diâmetro dinâmico (m)
Radial	GoodYear	195/65 R15	1,946
Sleek	Michelin	195/60 R15	1,902

Logo, em função da variação do diâmetro dinâmico do pneu, foi realizado um novo cálculo da rotação para execução das provas com o *quiet car*, a fim de manter a mesma velocidade de aproximação, conforme a Tab. 4.5. Verifica-se, entretanto, que as rotações ainda assim permaneceram muito próximas da

realizada com o veículo base, não sendo portanto fator comprometedor na análise dos resultados finais.

Tabela 4.5 Dados para execução da prova de ruído de passagem

Condição de prova	Marcha	Velocidade de aproximação (km/h)	Rotação do motor (rpm)
Pneu de origem	2 ^a	50,0	3706
	3 ^a	50,0	2517
Pneu “sleek”	2 ^a	50,0	3796
	3 ^a	50,0	2578

Conjunto motopropulsor

O ruído emitido por esta fonte foi atenuado mediante a utilização de uma chapa de aço pré-formada de 1,0 mm de espessura formando um escudo na superfície inferior do motor, conforme a Fig. 4.8. Na superfície interna deste escudo foi aplicada uma manta asfáltica de 3,0 mm de espessura, de modo a melhorar ainda mais a performance desta barreira acústica. As laterais nos vãos das rodas dianteiras foram também isoladas utilizando o mesmo conceito, conforme a Fig 4.9. Na superfície interna da tampa do motor foram adotadas duas camadas de feltro fenólico com espessura de 20 mm.



Figura 4.8 Isolamento da parte inferior



Figura 4.9 Isolamento das laterais

Parede de escape

O isolamento desta fonte foi obtido enclausurando todo o sistema de escape utilizando chapa de aço pré-formada de 1,0 mm de espessura, também

revestida internamente com uma manta asfáltica de 3,0 mm de espessura, conforme as Figs. 4.10 e 4.11. Na superfície interna do isolamento foi ainda aplicada manta de lã de rocha, agindo como absorvente acústico.



Figura 4.10 Isolamento da parte central



Figura 4.11 Isolamento da parte traseira

4.4.2 Quantificação das Fontes de Ruído Externo

A caracterização acústica das fontes foi efetuada individualmente, removendo o abafamento da fonte em análise, de forma que predominasse apenas o ruído emitido pela mesma. As medições foram executadas conforme procedimento descrito pela norma NBR 8433, utilizando o sistema de aquisição telemetrado, conforme as Figs. 4.12 e 4.13. Entretanto, um procedimento particular foi adotado para medição do ruído dos pneus, a fim de obter maior precisão na individualização desta fonte. Neste caso, o ruído de rolagem dos pneus foi medido com motor desligado, de modo a evitar a influência das demais fontes, mesmo abafadas. O procedimento adotado foi praticamente o inverso da situação em aceleração, ou seja, o veículo atingiu a linha inicial com a velocidade próxima de 57 km/h, equivalente à velocidade média de passagem na condição de aceleração em 2ª e 3ª marcha respectivamente (baseado nos valores registrados com o veículo na condição base). Durante a passagem pela linha dos 20 m foi efetuada uma desaceleração gradativa, utilizando o próprio freio do veículo, induzindo o veículo a atingir a linha de chegada a 50 km/h. Desta forma foi possível medir apenas o ruído de rolagem dos pneus, reproduzindo as mesmas condições de aceleração em 2ª e 3ª marcha. As condições de provas foram praticamente as mesmas descritas no Item 4.3.1, relativas ao ruído de fundo, repetibilidade, local de testes e condições ambientais.



Figura 4.12 Medição de ruído das fontes



Figura 4.13 Analisadores de dados

4.5 Aparato Técnico Experimental

Sistema de Aquisição de Ruído Externo telemetrado B&K 3558, contendo os seguintes acessórios:

- Analisador Espectral Bicanal B&k 2145;
- Microfones Pré-polarizados B&K 4190;
- Pré-amplificadores B&K 2696;
- Calibrador de Microfone B&K 4123;
- Unidade de Controle ZH 0613;
- Reflector SB 1537;
- Fococélula AO 0411;
- Sensor de Rotação MM 0096;
- Sensor de Acionamento do Acelerador MM 0097;
- Unidade de controle de Transmissão ZH 0612;
- Radar ZZ 0231;
- *Software “Pass by Noise Telemetric System” B&k 7677.*

Sistema de Medição de Intensidade Sonora B&K 3599, contendo os seguintes acessórios:

- Analisador Espectral Bicanal B&K 2144;
- Sonda B&K 2683;
- Fonte de Ruído ZI 0055;
- Pistonphone B&K 4228;
- Acoplador de Intensidade UA 0914;
- *Software “Noise Source Location” B&K 7681.*

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Apresentação dos Resultados

Nesta seção serão inicialmente apresentados os resultados obtidos nos testes experimentais pelas duas metodologias aplicadas, seguidos de uma análise detalhada, e da elaboração de um *ranking* das principais fontes de ruído identificadas. Posteriormente, será realizada uma correlação entre as duas metodologias, através do confrontando dos resultados obtidos pelas duas metodologias.

5.2 Resultados Obtidos nas Medições de Intensidade Sonora

5.2.1 Parâmetros de Prova de Intensidade Sonora

Os gráficos das Figs. 5.1 e 5.2 demonstram os níveis de ruído externo medidos em 2ª e 3ª marcha respectivamente. Os parâmetros utilizados para medição de intensidade sonora sobre rolo foram extraídos do gráfico de ruído em 2ª marcha, conforme descritos na Tab. 5.1 abaixo.

Tabela 5.1 Parâmetros de prova para medição de intensidade sonora sobre rolo

Nível Máx. (dB(A))	Rotação (rpm)	Velocidade (km/h)	Posição (m)	Lado de Medição
75,6	4270	57,2	5,5	Esquerdo

Prova em 2ª marcha

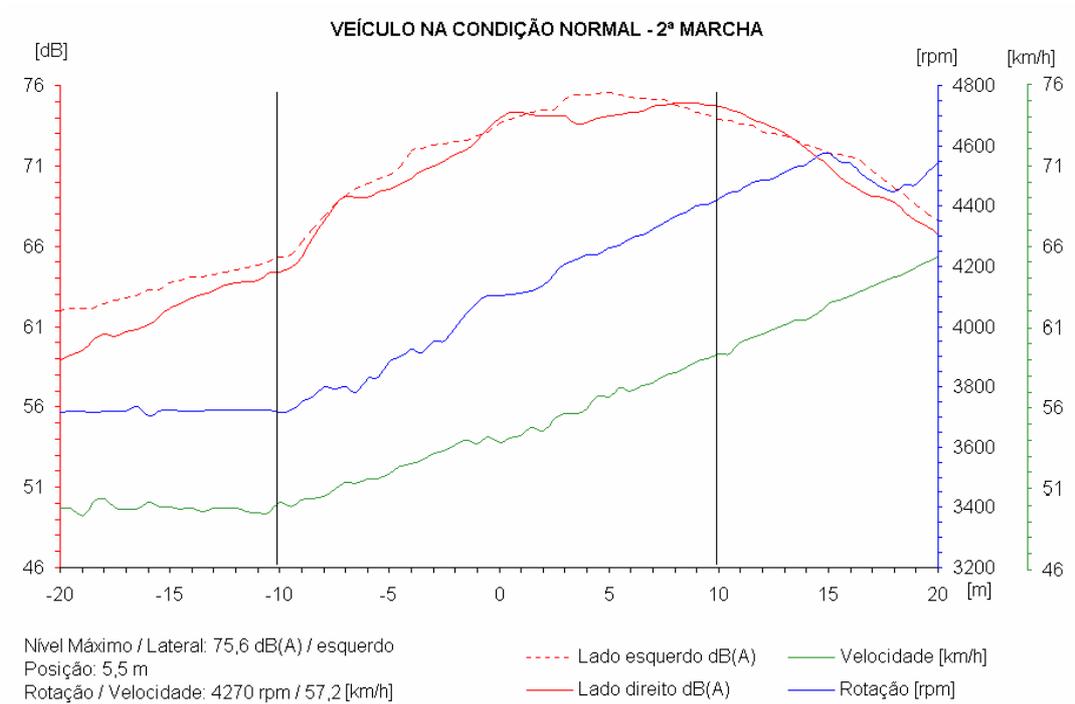


Figura 5.1 Curvas dos níveis de ruído externo em 2ª marcha

Prova em 3ª marcha

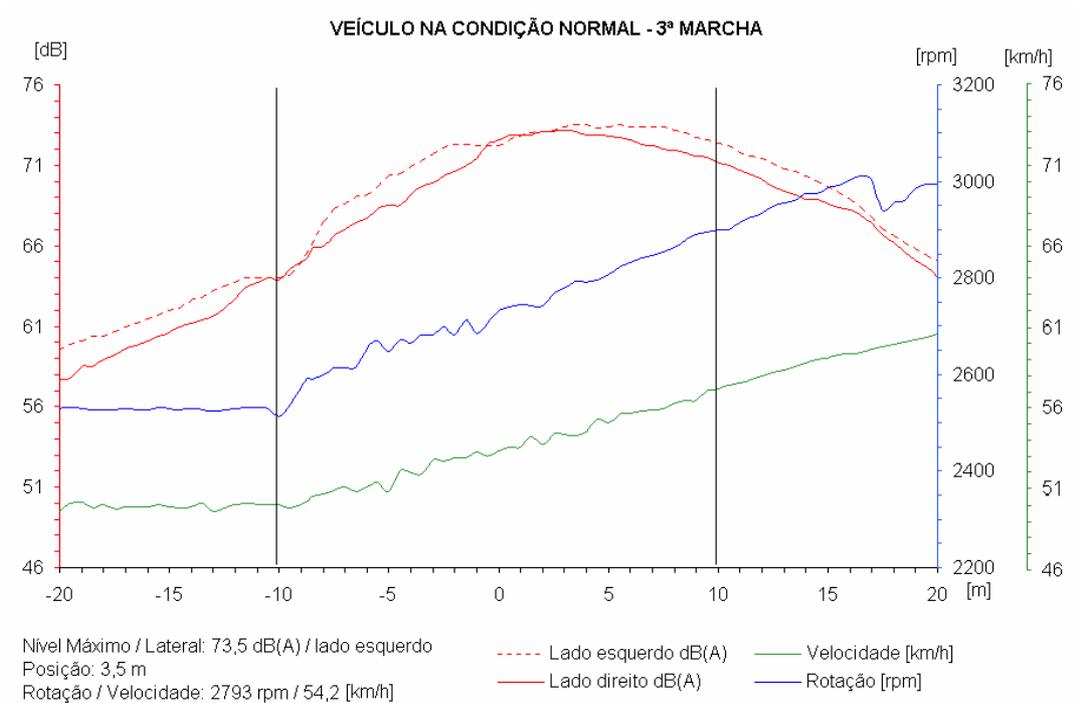


Figura 5.2 Curvas dos níveis de ruído externo em 3ª marcha

As curvas indicam os níveis gerais de pressão sonora em dB(A) medidos nos lados esquerdo e direito, bem como o registro da rotação e velocidade em função da posição do veículo ao longo da linha dos 20,0 m. Os níveis foram registrados 10,0 m antes da linha de início da prova para se ter um controle preciso da rotação estabilizada antes do acionamento total do acelerador. As curvas de ruído representam o valor máximo de 03 medições. Para uma maior precisão da prova, foram consideradas como válidas as medidas cujas dispersões estavam dentro das diferenças descritas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Dispersões de prova de ruído de passagem

Velocidade de aproximação	Rotação correspondente à velocidade de aproximação	Diferença entre os níveis máximos de ruído
0,5 km/h	$\pm 50,0$ rpm	1,0 dB(A)

Em uma análise preliminar, observa-se tanto nas provas de 2ª como em 3ª marcha, que os maiores níveis ocorreram no lado esquerdo, e praticamente na mesma posição. Este comportamento indica, provavelmente, que a mesma fonte esteja influenciando nos níveis de ruído irradiados nesta lateral, tanto em 2ª como em 3ª marcha, e a posição de maior nível indica a boca de escape como a principal fonte. Entretanto, tal afirmação não pode ser feita com segurança apenas com base nestes resultados, tendo em vista que esta posição se refere ao ruído global do veículo, ou seja, a contribuição de todas as fontes simultaneamente.

5.2.2 Validação das Medições de Intensidade Sonora

Índice de pressão - intensidade residual - d_{PI_o}

A Fig. 5.3 demonstra o índice de pressão – intensidade residual em toda faixa de freqüência de interesses obtido por meio de uma fonte geradora de ruído branco, conforme procedimento descrito no Item 3.5 do Capítulo 03.

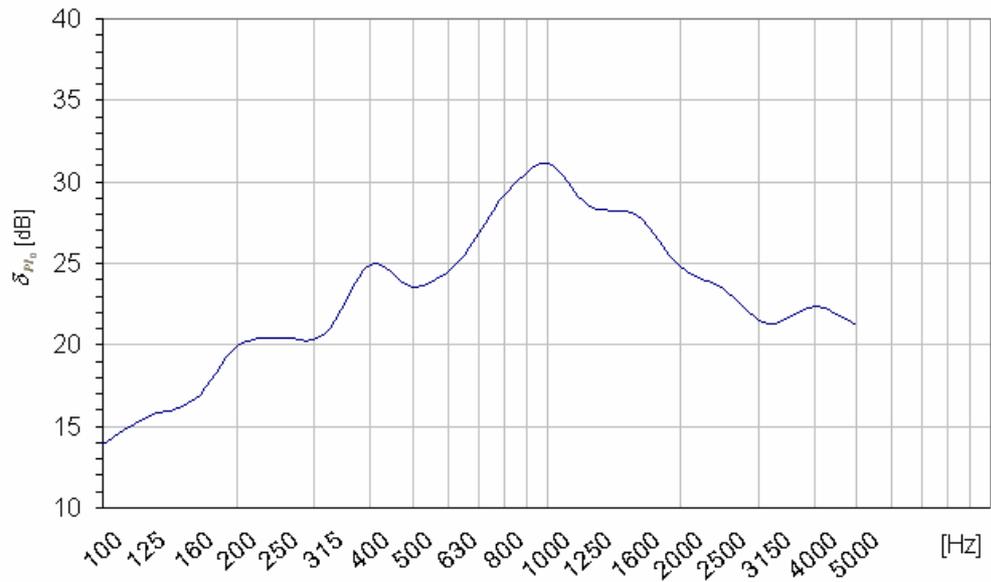


Figura 5.3 Índice de pressão – intensidade residual

Índice de pressão - intensidade d_{PI}

A Fig. 5.4 demonstra o índice de pressão – intensidade em toda faixa de freqüência de interesse, obtida pela média de amostragem da medição de intensidade sonora.

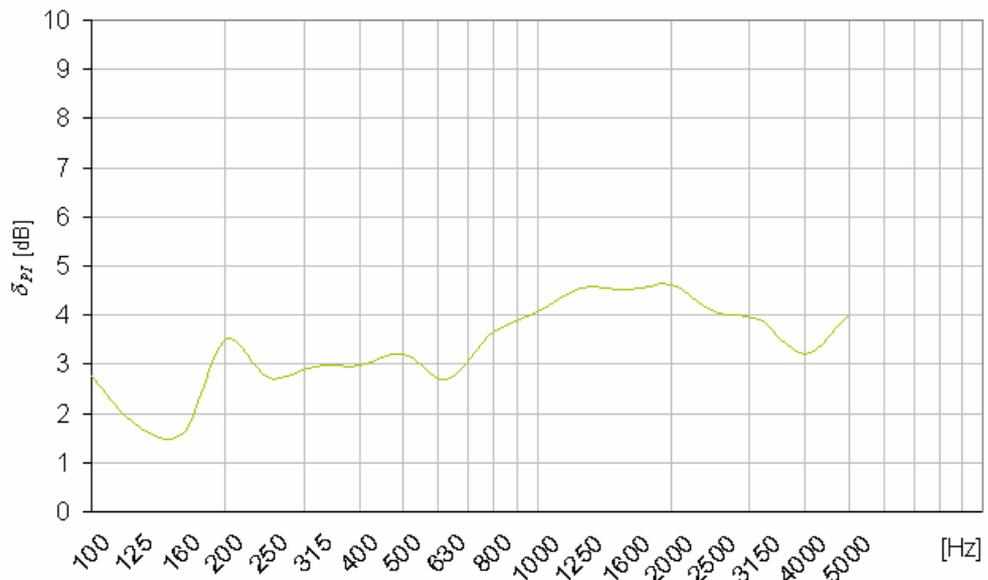


Figura 5.4 Índice de pressão – intensidade

Capacitação dinâmica da instrumentação - L_d

A capacidade dinâmica do sistema de medição foi obtida subtraindo 10 dB do índice de pressão - intensidade residual, conforme Fig. 5.5, a fim de obter uma precisão no erro da estimativa de intensidade no mínimo de 0,5 dB. Os pontos de interseção entre a curva L_d e a curva d_{PI} determinam a faixa de frequência de análise com a precisão de 0,5 dB. Logo, observa-se que a faixa utilizada nas medições apresentou uma precisão ainda maior do que a esperada.

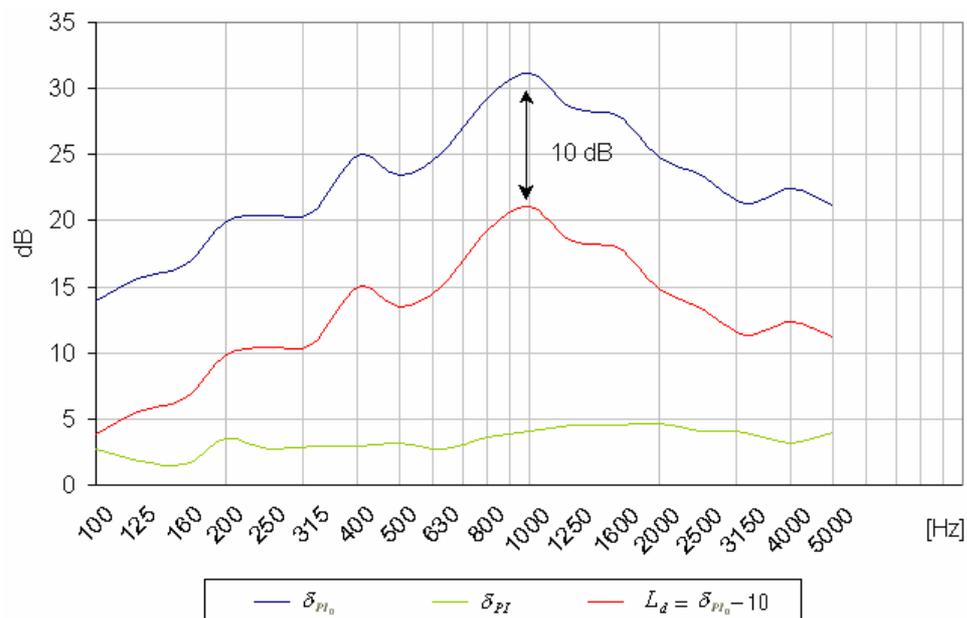


Figura 5.5 Capacitação dinâmica da instrumentação

5.2.3 Análise dos Mapas de Intensidade Sonora

Os níveis de intensidade sonora medidos na lateral do veículo são apresentados sob a forma de mapas de cores e vetores, auxiliados por uma ilustração de referência, indicando a posição relativa de cada fonte de ruído no veículo. Os mapas de cores representam o fluxo de energia sonora, tanto na direção Z, perpendicular à superfície de medição, como em magnitude, que consiste na resultante das três direções medidas, proporcionando assim uma excelente visualização das regiões onde estão situadas as fontes de ruído em análise. O mapa de vetores proporciona, embora às vezes de difícil interpretação, a identificação da direção do fluxo da energia sonora das fontes de maior emissão de intensidade. As dimensões dos vetores resultantes indicam a magnitude de intensidade sonora, multiplicados por um fator

constante que facilita a interpretação dos resultados. As escalas dos gráficos foram determinadas mantendo sempre um range constante de 14 dB a partir de uma linha base, cujo nível foi fixado de forma a possibilitar a melhor distribuição possível das cores e vetores. Os níveis são apresentados em dB linear, isto porque a ponderação em dB(A) não foi adequada para os altos níveis medidos próximos às fontes, principalmente em baixas frequências. A análise foi feita em bandas de 1/3 de oitava, inicialmente englobando toda faixa de frequência de interesse (100 a 5000Hz), conforme a Fig. 5.6, e posteriormente em faixas específicas para uma melhor compreensão do comportamento das fontes. As faixas analisadas foram de 125 a 160Hz, 250 a 315 Hz, 400 a 500 Hz, 500 a 630Hz, 1000 a 2000 Hz, conforme as Figs. 5.7 a 5.11. As três primeiras faixas englobam as respectivas frequências de 2º, 4º e 6º ordens de funcionamento do motor, na rotação em que foi realizada a prova (4270 rpm).

A análise de ordem é importante, pois através desta análise é possível identificar qual é o fenômeno correlacionado ao ruído emitido pela respectiva fonte. Entende-se por ordem as harmônicas de uma determinada frequência considerada fundamental. No caso em estudo, por tratar-se de um motor de 04 cilindros e 08 válvulas, a frequência fundamental (ou de 1ª ordem), no regime de rotação testado equivale a 71 Hz, que corresponde ao número de revoluções por segundo do eixo virabrequim.

Logo, a frequência de 2º ordem (142 Hz), considerada como sendo a principal ordem de análise, está associada ao fenômeno de explosão dos gases de combustão, pois a cada giro completo do eixo virabrequim ocorrem duas explosões consecutivas.

As frequências de 4ª e 6ª ordens (285 e 427 Hz respectivamente), também podem ser correlacionadas aos ruídos causados pela aspiração do ar e pelo fluxo dos gases de exaustão, em função do número de ocorrência de abertura e fechamento das válvulas de admissão e escape para cada giro do motor.

A faixa entre 500 a 630 Hz foi selecionada para análise do ruído dos pneus, cuja frequência de ocorrência foi identificada como sendo 588 Hz. A correlação foi obtida a partir da frequência de 1ª ordem de giro do pneu sobre o rolo (8 Hz), calculada em função dos dados referentes à velocidade de prova (57 km/h) e do perímetro do pneu (1,95 m). Como a banda de rodagem possui 72 elementos, origina a frequência de 588 Hz correspondente à 72ª ordem.

Faixa de 100 a 5000 Hz

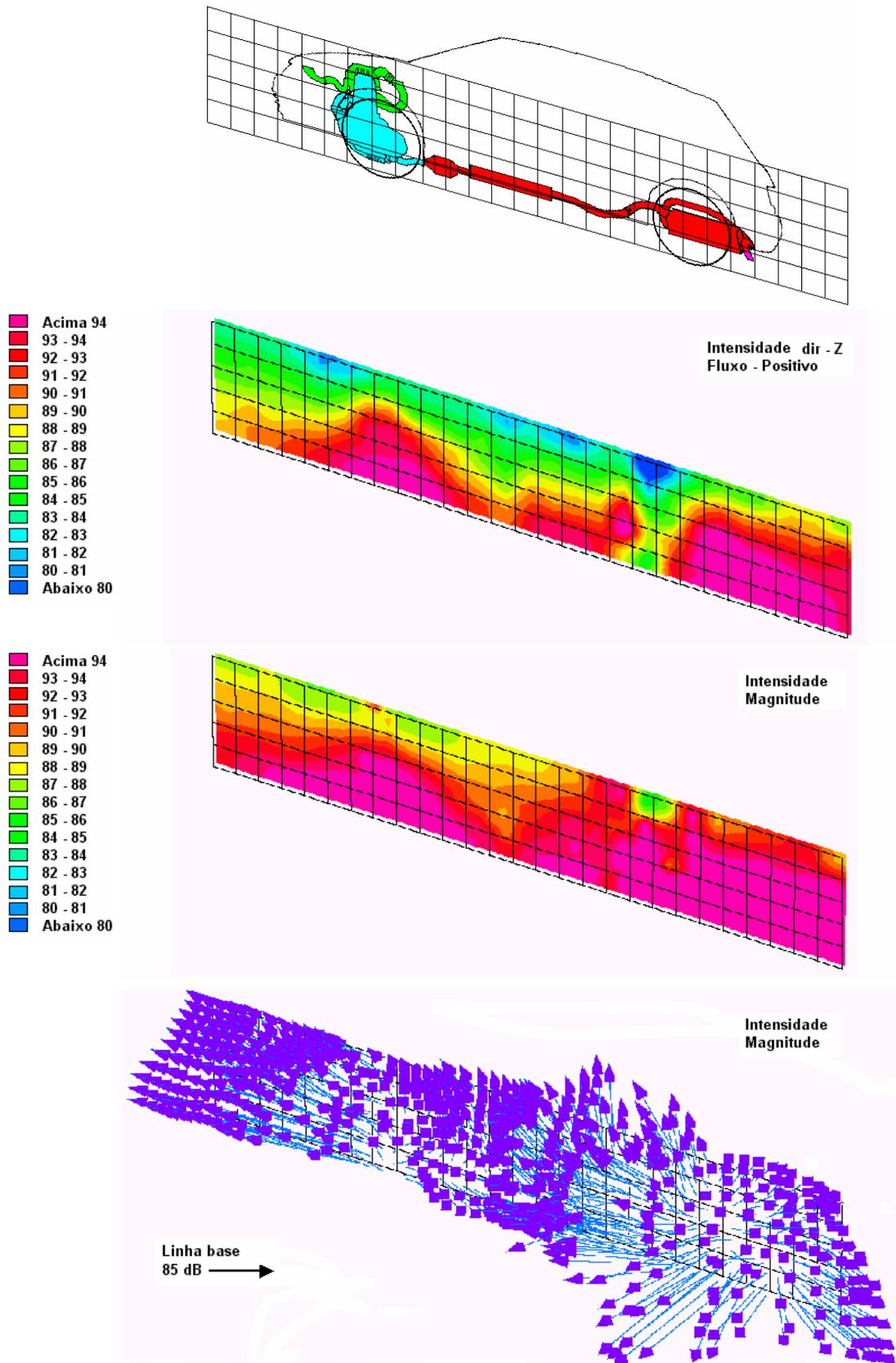


Figura 5.6 Mapas de intensidade sonora – frequências de 100 a 5000Hz

Faixa de 125 a 160 Hz.

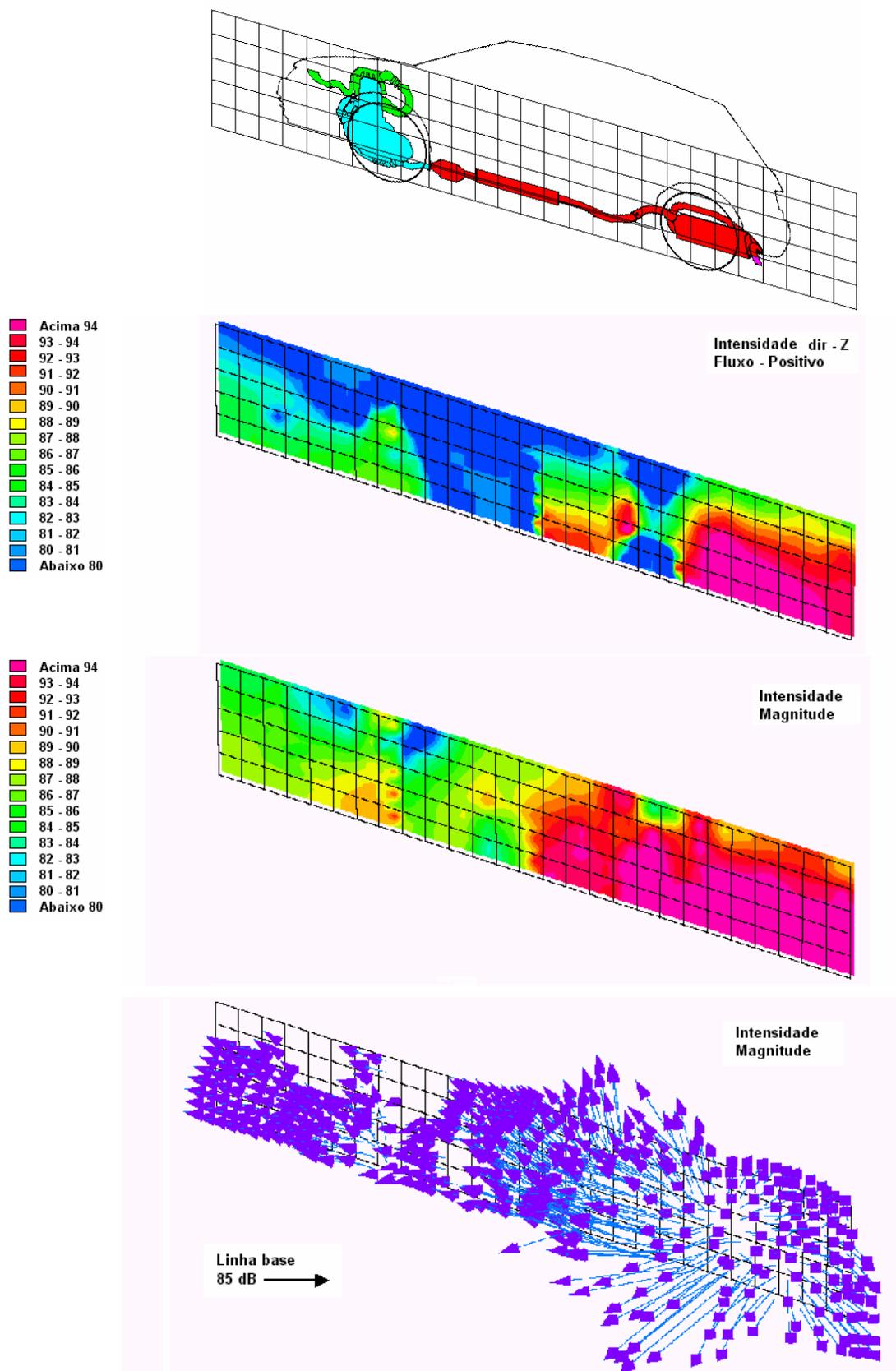


Figura 5.7 Mapas de intensidade sonora – frequências de 125 a 160 Hz

Faixa de 250 a 315 Hz

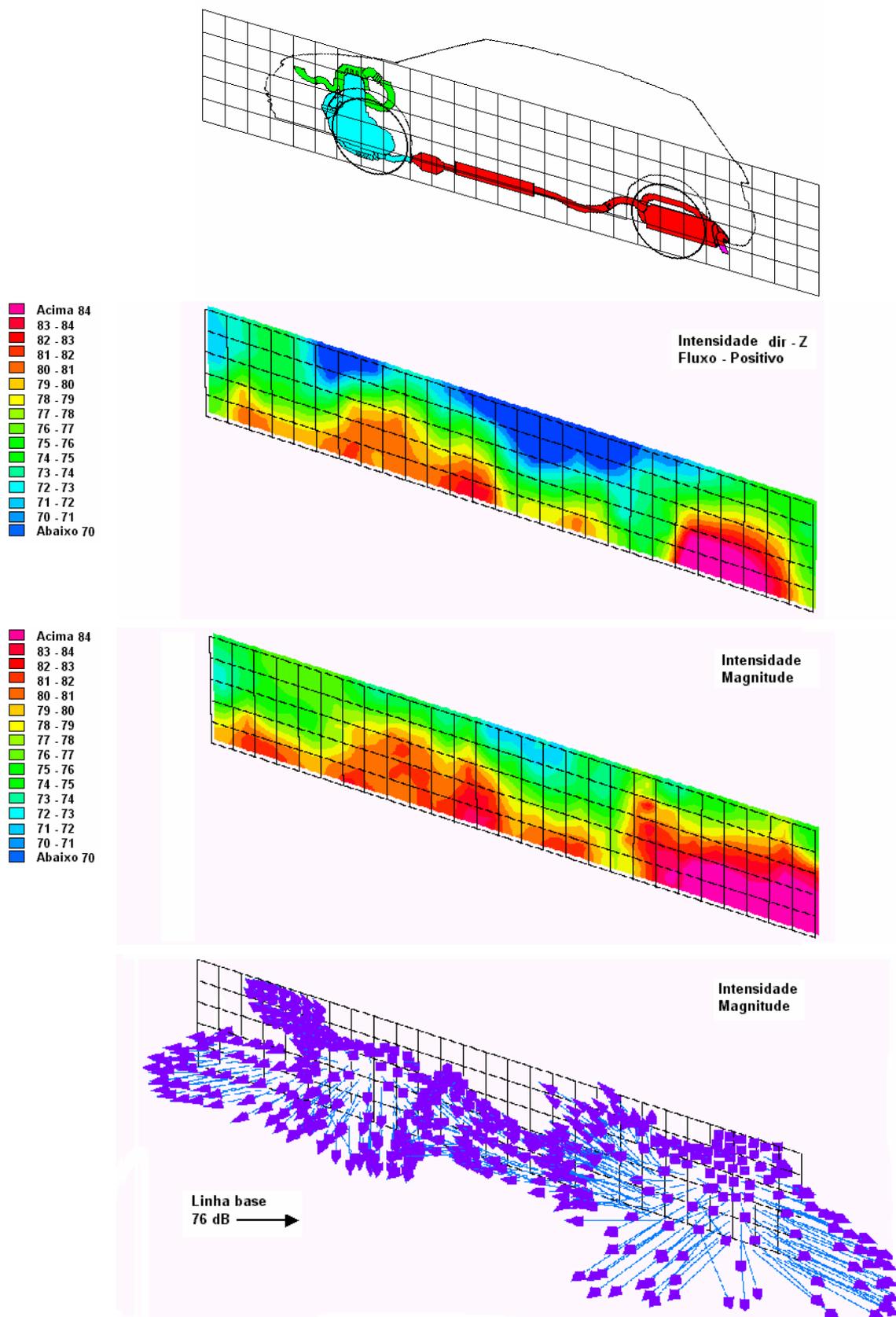


Figura 5.8 Mapas de intensidade sonora – frequências de 250 a 315 Hz

Faixa de 400 a 500 Hz

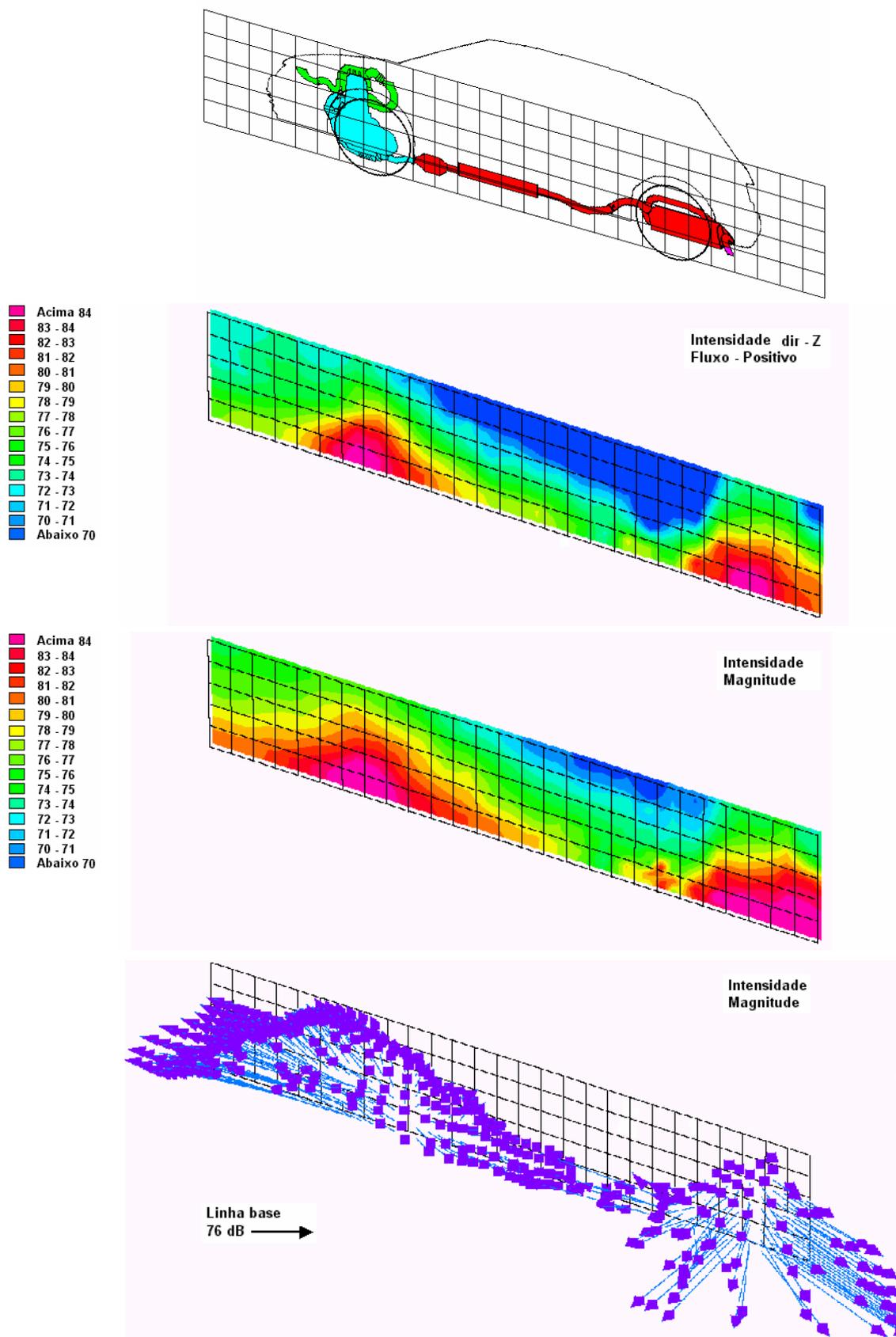


Figura 5.9 Mapas de intensidade sonora – frequências de 400 a 500 Hz

Faixa de 1000 a 2000 Hz

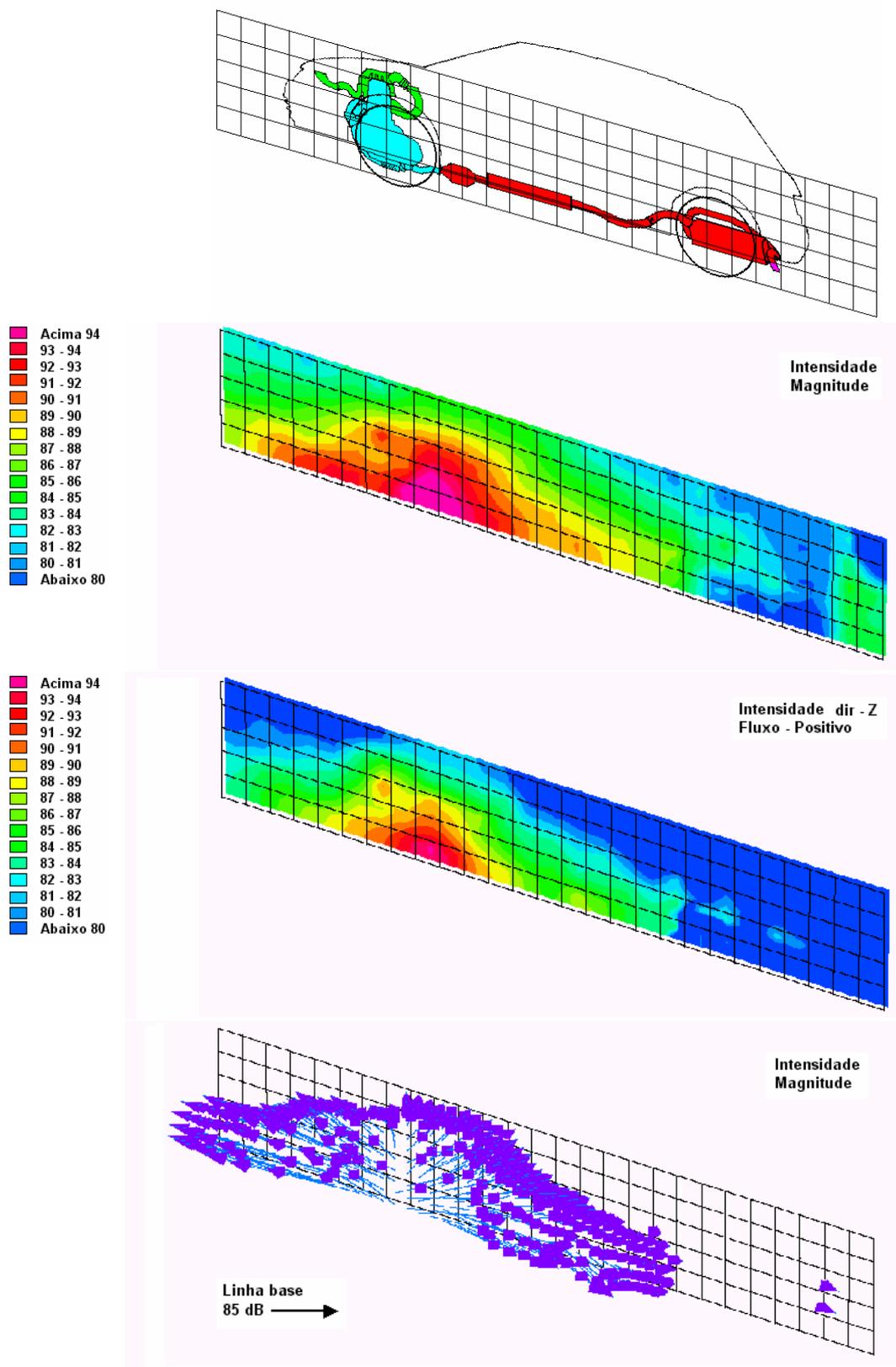


Figura 5.10 Mapas de intensidade sonora – frequências de 1000 a 2000 Hz

Faixa de 500 a 630 Hz

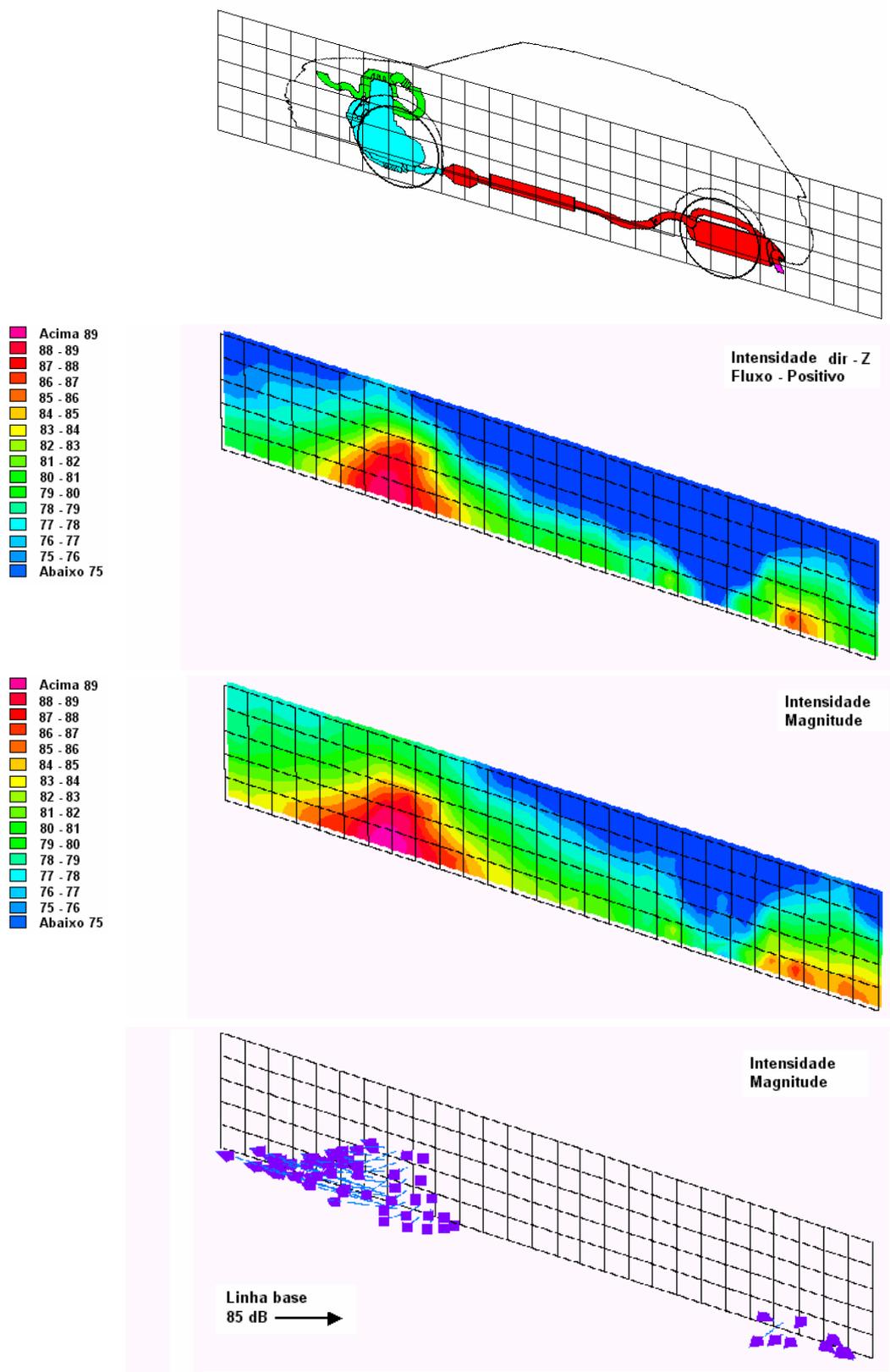


Figura 5.11 Mapas de intensidade sonora – frequências de 500 a 630 Hz

Análise dos resultados

A fig. 5.6 demonstra os mapas de iso-intensidade abrangendo, para uma primeira análise, toda faixa de freqüência de amostragem. Observa-se a formação de ilhas de iso-intensidade de maiores níveis na região que corresponde à boca de escape e do silencioso traseiro.

As figs 5.7 a 5.9 demonstram os mapas nas faixas em que predominam a 2ª, 4ª e 6ª ordens (125 a 160 Hz, 250 a 315 Hz e 400 a 500 Hz respectivamente), onde verifica-se pelos elevados níveis maior predominância da boca de escape, com influência principal da 2ª ordem. A menor influência das demais ordens pode ser percebida pela diferença de escala, adotada para facilitar a visualização das ilhas de iso-intensidade. Verifica-se também uma contribuição das demais fontes, porém com menor intensidade, principalmente na região correspondente ao sistema de aspiração, percebendo-se nesta análise pouca evidência desta fonte. Isto porque os componentes do sistema de aspiração deste veículo situam-se no lado direito, dificultando ainda mais sua caracterização, uma vez que a medição foi realizada na lateral esquerda.

Na faixa de freqüência que inclui a 6ª ordem, verifica-se a formação de ilhas de maiores níveis na região dos pneus e na região do catalisador.

A fig. 5.10 demonstra os mapas na faixa de médias freqüências compreendida entre 1000 e 2000 Hz, onde se verificam ilhas com elevados níveis nas regiões onde se localizam o catalisador, o flexível do tubo primário e o pneu dianteiro (ressalta-se que a primeira harmônica da freqüência principal de giro do pneu, relativa à sua velocidade de giro, ocorre nesta faixa de freqüência).

A Fig. 5.11 demonstra os mapas na faixa de freqüência de 500 a 630 Hz, visando uma análise particular do ruído emitido pelo pneu, já que a freqüência principal desta fonte, relativa à sua velocidade de giro, ocorre a 588 Hz.

Entretanto, o plano de medição frontal a esta fonte (ponto de contato do pneu com os rolos) corresponde também a outras fontes que se localizam na mesma direção, como o motor (parte inferior), caixa de câmbio e flexível do tubo primário, todas passíveis de emissão de ruído nesta mesma faixa de freqüência. Logo, fica evidente que a análise do ruído emitido pelo pneu, nestas condições, certamente está sendo influenciada por estas fontes. Isto gera, a princípio, incerteza nos resultados apresentados particularmente nesta análise, podendo ocasionar uma interpretação incorreta acerca da contribuição

do ruído emitido pelo pneu. Visando minimizar ao máximo esta incerteza, e eliminar a influência destas fontes, a medição nesta região foi realizada com os pneus girando apenas impulsionados pela força de inércia dos rolos do dinamômetro (motor desligado e câmbio na posição neutra). A velocidade dos pneus, entretanto, foi mantida a mesma determinada para execução da prova (57,2 km/h). A Fig. 5.12 demonstra a análise do mapa de vetores que engloba toda faixa de frequência, de 100 a 5000 Hz, e na faixa que engloba a primeira harmônica, de 500 a 630 Hz.

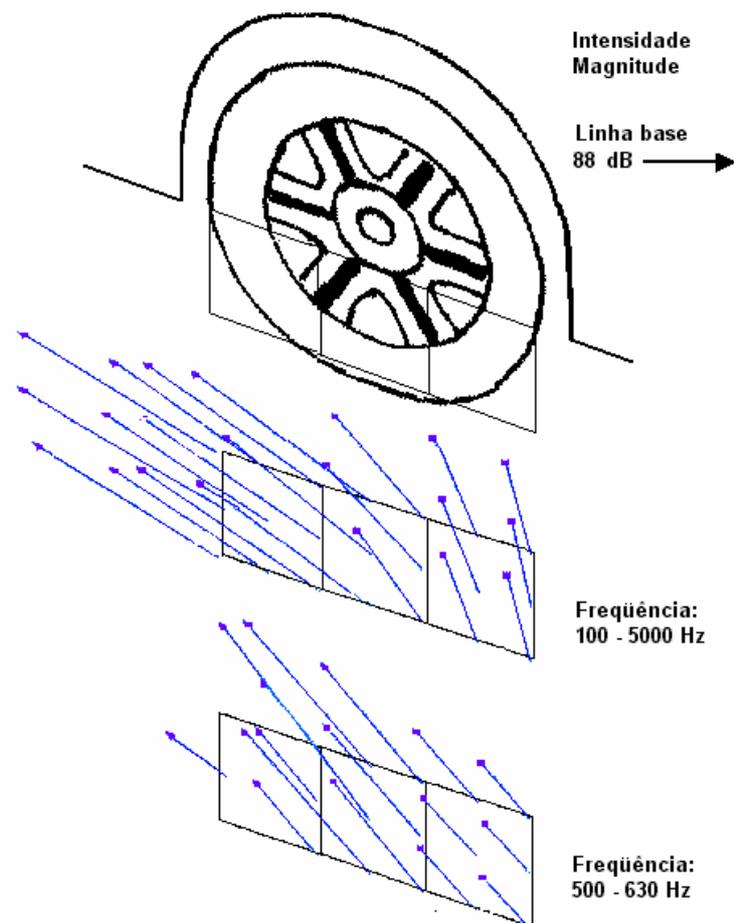


Figura 5.12 Mapas de vetores do pneu medido isoladamente

5.2.4 Análise espectral de intensidade sonora

Com o intuito de se obter uma melhor análise do comportamento individual das fontes em termos de frequência, foram extraídos os espectros de intensidade sonora dos pontos que correspondem à localização de cada fonte. A Fig. 5.13

indica os pontos em que foram extraídos os espectros de intensidade sonora, referentes a cada fonte sonora.

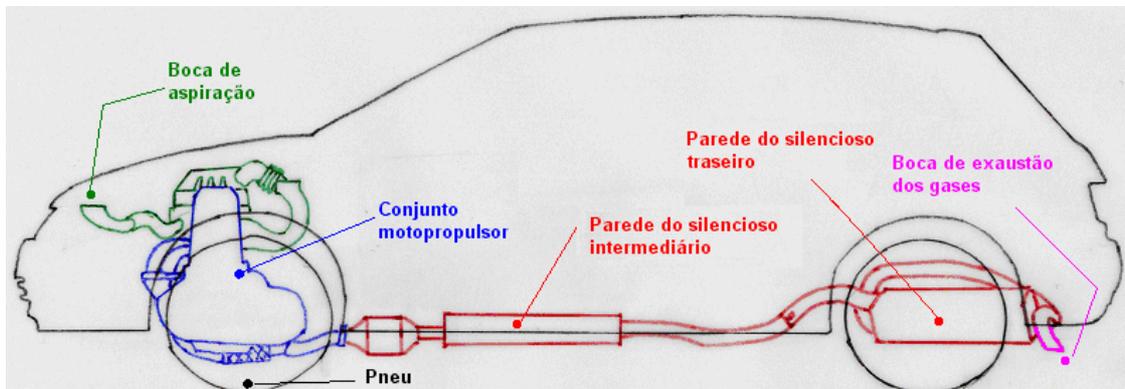


Figura 5.13 Pontos de referência para obtenção dos espectros de intensidade sonora

A Fig 5.14 demonstra os espectros extraídos das medições na direção Z. Para análise do pneu, especificamente, o espectro foi extraído da medição desta fonte isoladamente, sem a influência das fontes próximas a ela.

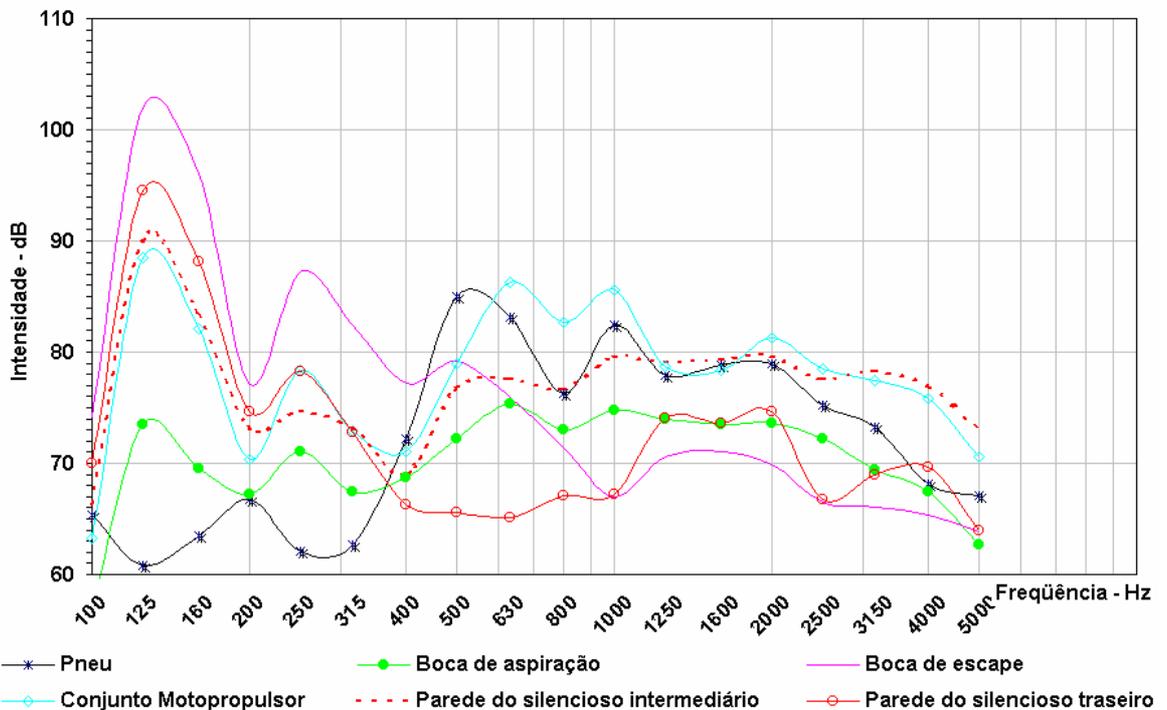


Figura 5.14 Espectros de intensidade sonora de cada fonte

A maior predominância da boca de escape pode ser claramente observada, também nesta análise, em função do maior pico na faixa de frequência de 125 a 160 Hz que a principal ordem de análise. Logo, através desta análise são obtidas informações importantes que direcionam algumas ações seguras para a correção desta fonte. Isto porque, conforme descrito no Item 2.2.3 do Capítulo 2, o ruído de boca pode ser influenciado tanto pela flutuação da pressão sonora como pelo jato do fluxo dos gases. Porém ambas apresentam características distintas. No primeiro caso, quando mais evidente, o espectro caracteriza-se por bandas de frequências bem definidas correspondentes às principais ordens de análise. Já no segundo caso, quando mais evidente, o espectro caracteriza-se por uma faixa mais ampla de frequência. Portanto, as ações corretivas necessárias para atenuação do ruído em cada caso são diferentes.

Observa-se também nesta faixa de frequência níveis elevados emitidos pela parede de escape e do motopropulsor, porém com menor intensidade. Na frequência de 250 Hz, que corresponde à 4ª ordem, verifica-se também valores consideráveis medidos nestas fontes, porém menos predominantes.

O ruído produzido no sistema de aspiração, assim como na análise dos mapas de iso-intensidade, apresentou-se pouco evidente em todas as faixas analisadas. Verifica-se no espectro extraído da medição no pneu (medição individual) maiores níveis na faixa de frequência de 500 a 630 Hz. A Fig 5.15 demonstra o confronto dos espectros obtidos nesta fonte, na medição individual dos pneus movimentados pela inércia dos rolos e na medição do veículo à plena carga de aceleração.

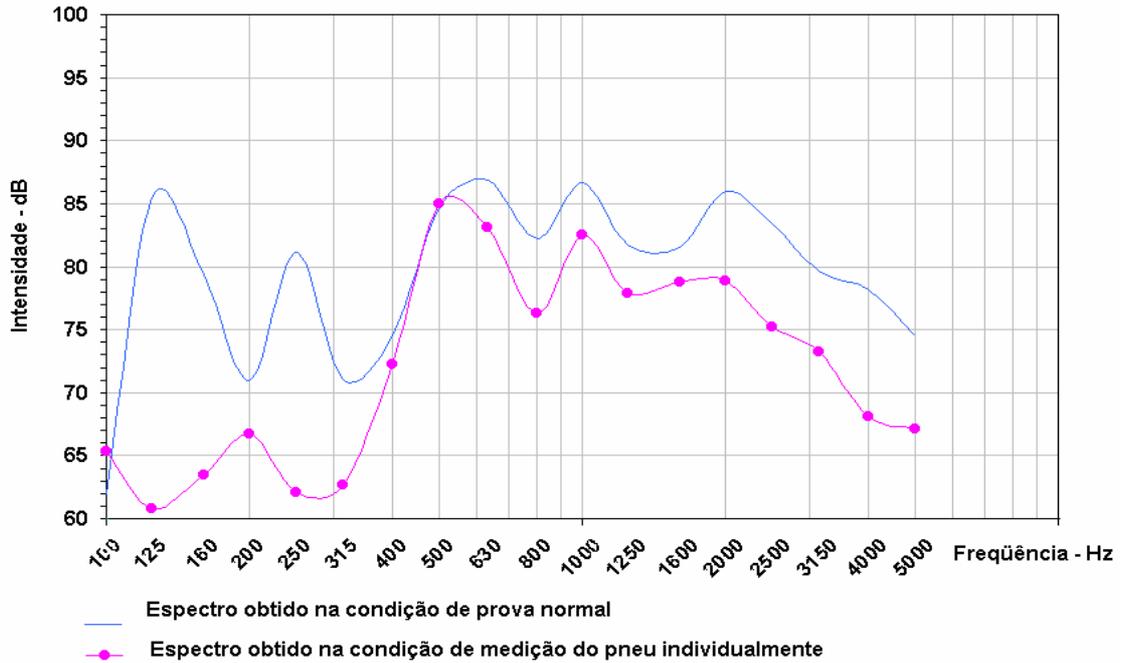


Figura 5.15 Espectros obtidos no pneu nas condições de plena carga e individualmente

Neste confronto observa-se a influência do ruído emitido pelas outras fontes, principalmente na faixa abaixo de 400 Hz, motivo pelo qual esta fonte foi avaliada isoladamente.

5.2.5 Classificação das fontes sonoras

As fontes de ruído foram classificadas em forma de um *ranking*, elaborado com base na potência sonora emitida por cada fonte, calculada em função do fluxo de intensidade sonora irradiado nas áreas que correspondem à localização de cada fonte respectivamente. As áreas delimitadas indicadas na Fig. 5.16 é que foram utilizadas para cálculo da potência sonora emitida por cada fonte.

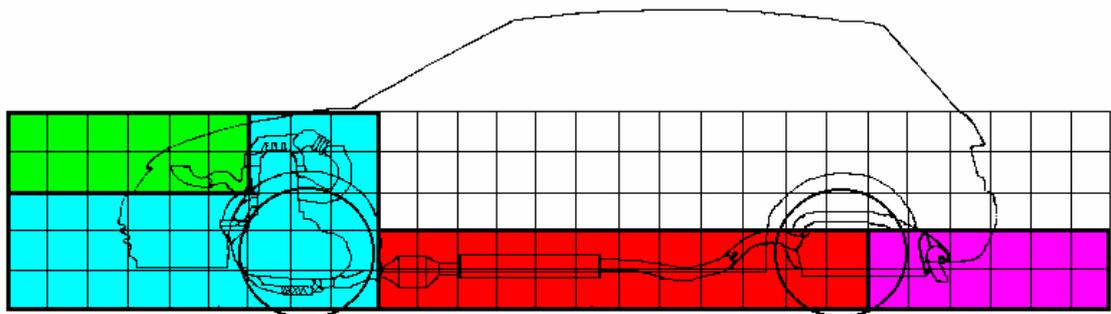


Figura 5.16 Áreas utilizadas para cálculo da potencia sonora de cada fonte

Com relação à potência sonora irradiada pelo pneu, obtida também da prova individualizada, foi calculada em função da área evidenciada na Fig 5.17, onde se localiza o ponto de contato do pneu com os rolos do dinamômetro.

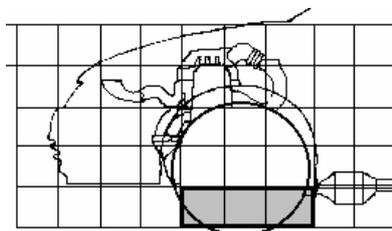


Figura 5.17 Área do pneu utilizada para cálculo da potencia sonora

Sendo assim, para classificação da potência sonora irradiada pelo conjunto motopropulsor, foi subtraído o valor obtido na medição do pneu isoladamente. Além disto, na elaboração do ranking foi considerado o dobro do valor obtido na medição individual do ruído de pneu, isto porque na condição real em pista todos os pneus estão em movimento, obviamente, e na prova sobre o rolo somente os pneus dianteiros estão em movimento.

A Fig. 18 demonstra, após todas essas as considerações relevantes, a classificação das fontes de ruído em análise.

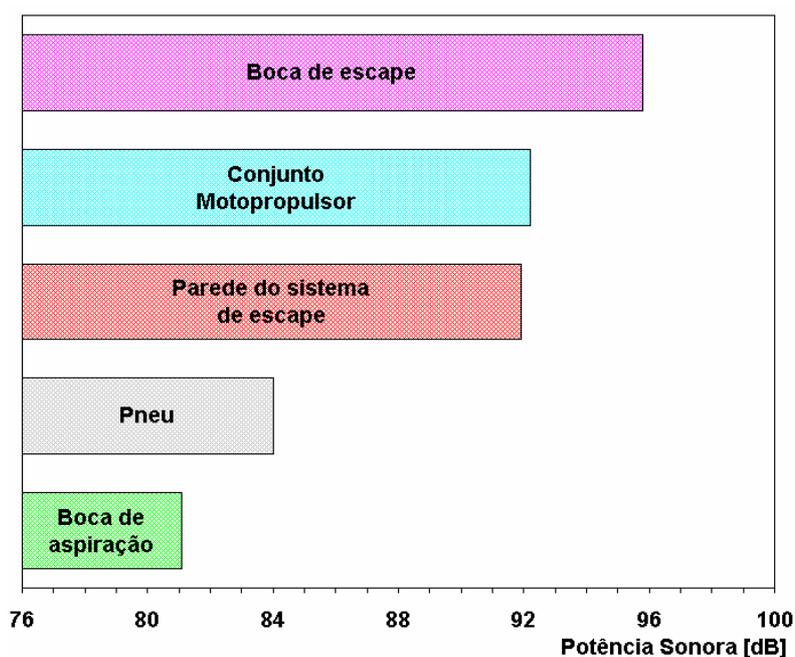


Figura 5.18 Classificação da fontes sonoras – metodologia de intensidade sonora

Tal resultado comprova que a fonte de maior nível de ruído é a boca de escape; conseqüentemente a principal influência no nível máximo de ruído externo global do veículo, obtido na prova de ruído de passagem em 2ª marcha na lateral esquerda.

5.3 Resultados Obtidos Através da Metodologia *Quiet car*

Nesta segunda etapa, são apresentados os resultados obtidos pelo método de enclausuramento, através do qual foi caracterizada acusticamente a contribuição individual de cada fonte. Nestes resultados estão contidos gráficos dos níveis de ruído externo medidos nas fontes, tanto em nível geral como em bandas de freqüências que correspondem as principais ordens. Finalmente as fontes são classificadas de acordo com os níveis máximos de ruído emitidos individualmente.

5.3.1 Níveis de ruído externo

Os níveis de ruído externo medidos pelo sistema telemetrado são apresentados em forma de gráficos que descrevem os valores instantâneos de ruído registrados durante a trajetória do veículo na pista de testes, para cada fonte, em 2ª e 3ª marcha. As curvas dos níveis de ruído geral são expressas em dB(A), juntamente com a análise em faixas de freqüências específicas, para melhor compreensão do comportamento individual das fontes. Na prova de 2ª marcha, às freqüências analisadas foram de 125, 160, 315 e 400 Hz, que correspondem às respectivas freqüências de 2ª (as duas primeiras faixas), 4ª e 6ª ordens de funcionamento do motor, calculadas com base na rotação do motor nesta prova. Da mesma forma, nas provas em 3ª marcha foram analisadas as freqüências de 100, 200 e 315 Hz, que correspondem às respectivas freqüências de 2ª 4ª e 6ª ordens. Para avaliação do ruído emitido pelos pneus foram analisadas as freqüências de 630 e 1250 Hz, que correspondem às freqüências de 1ª e 2ª harmônicas. Juntamente com os níveis de ruído são apresentados os gráficos das rotações e velocidades registradas durante o percurso de prova. Esta análise demonstra também a posição do veículo em que ocorreu o maior nível de ruído em cada fonte. Correlacionando estes dados com os obtidos na condição base, é possível identificar a fonte de maior influência. Estes gráficos são demonstrados nas Figs. 5.19 a 5.24.

Ruído do veículo na condição base (sem o abafamento das fontes)

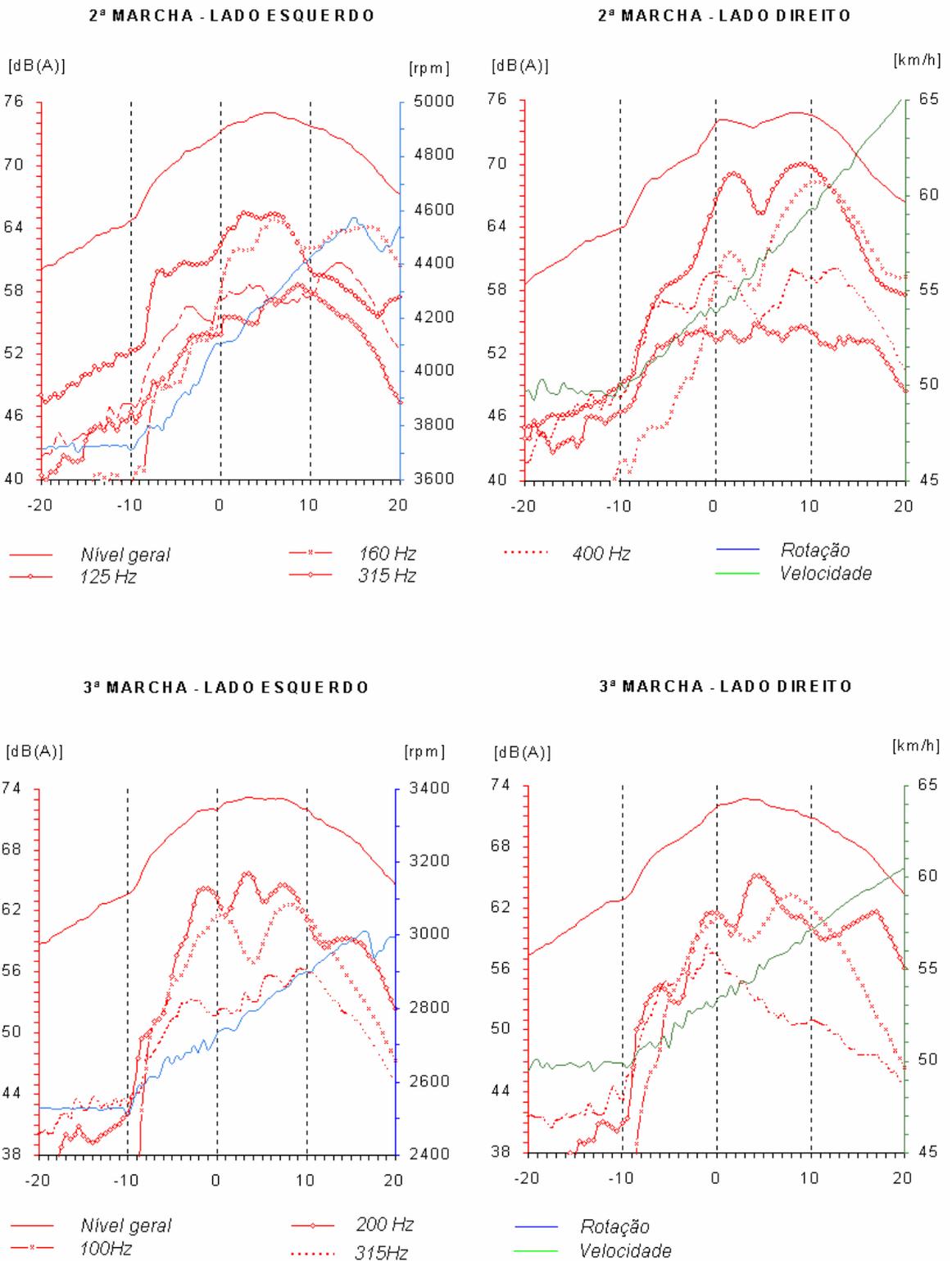


Figura 5.19 Níveis de ruído de passagem medidos no veículo sem o abafamento das fontes

Ruído de boca de escapamento

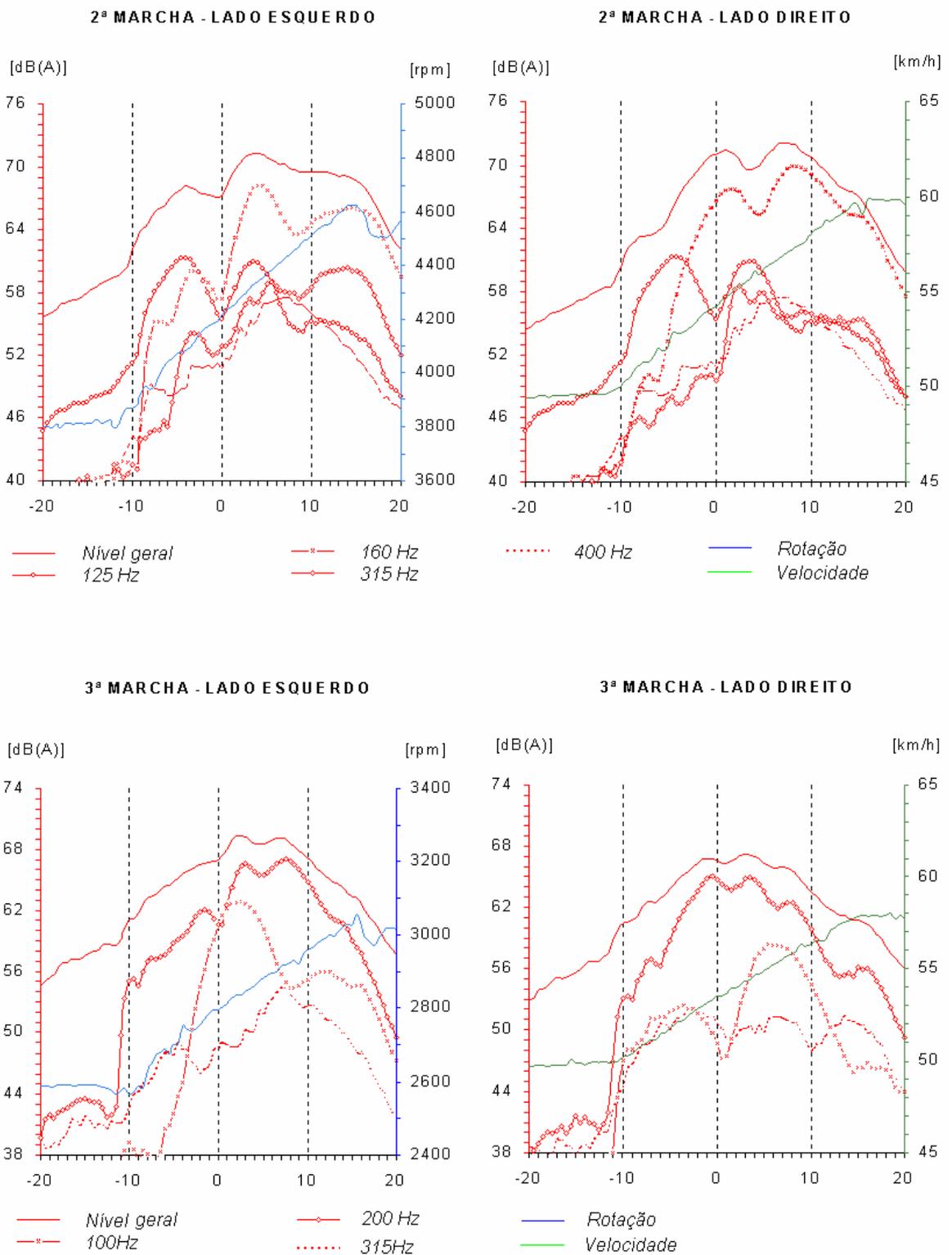


Figura 5.20 Níveis de ruído de passagem medidos no veículo com a boca de escape individualizada

Ruído do sistema de aspiração

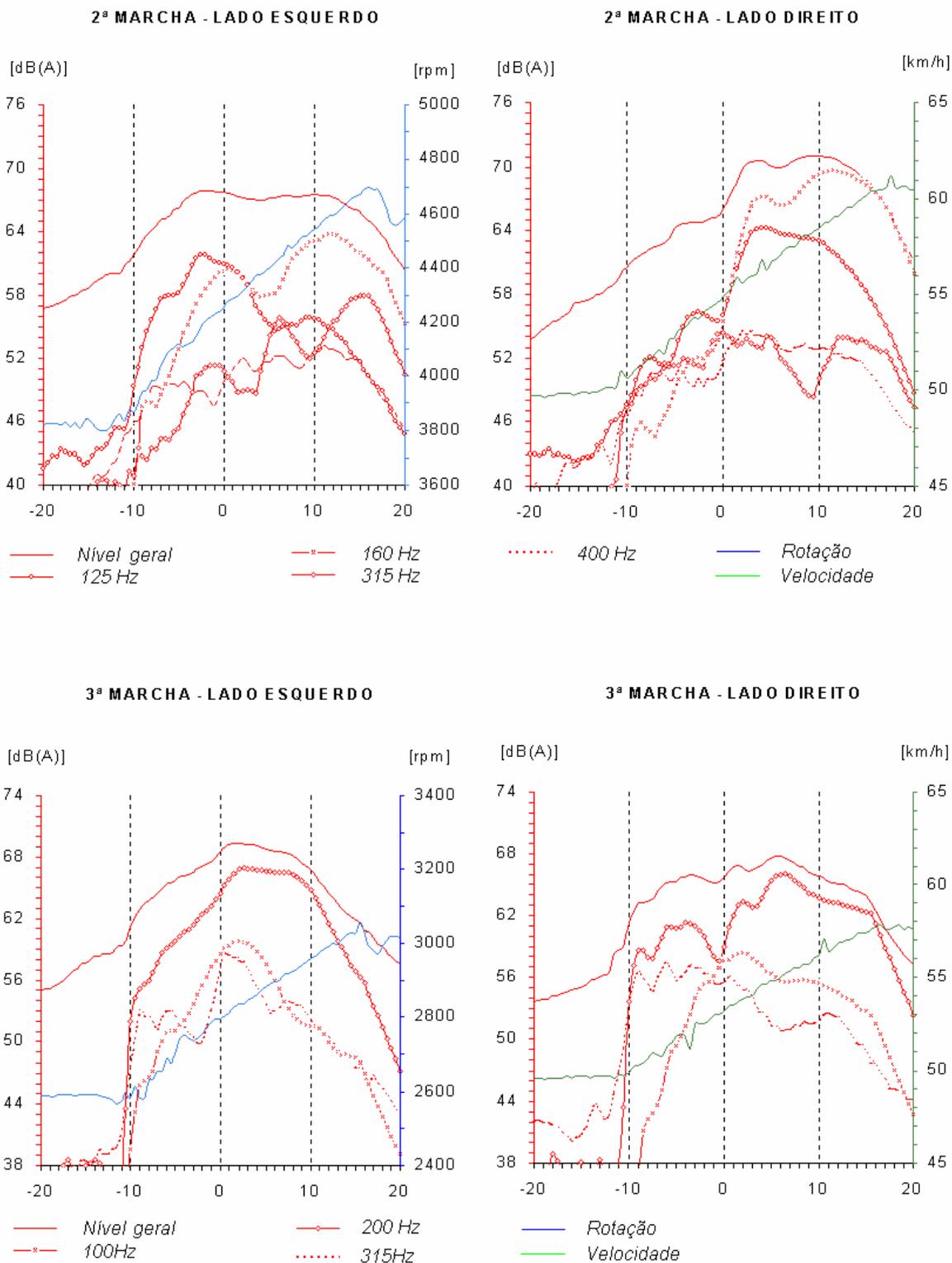


Figura 5.21 Níveis de ruído de passagem medidos no veículo com o sistema de aspiração individualizado

Ruído do conjunto motopropulsor

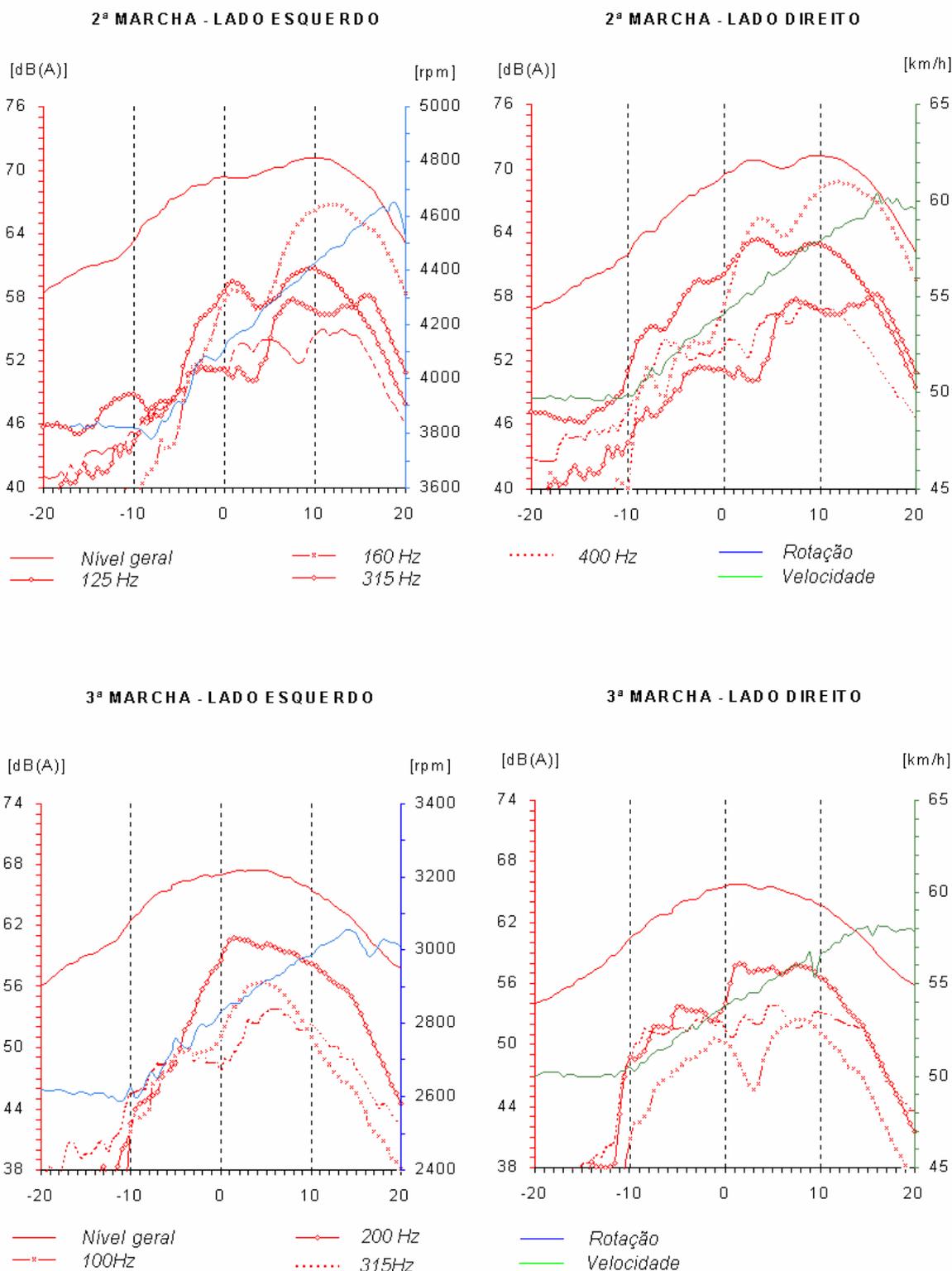


Figura 5.22 Níveis de ruído de passagem medidos no veículo com conjunto motopropulsor individualizado

Ruído de parede do sistema de escape

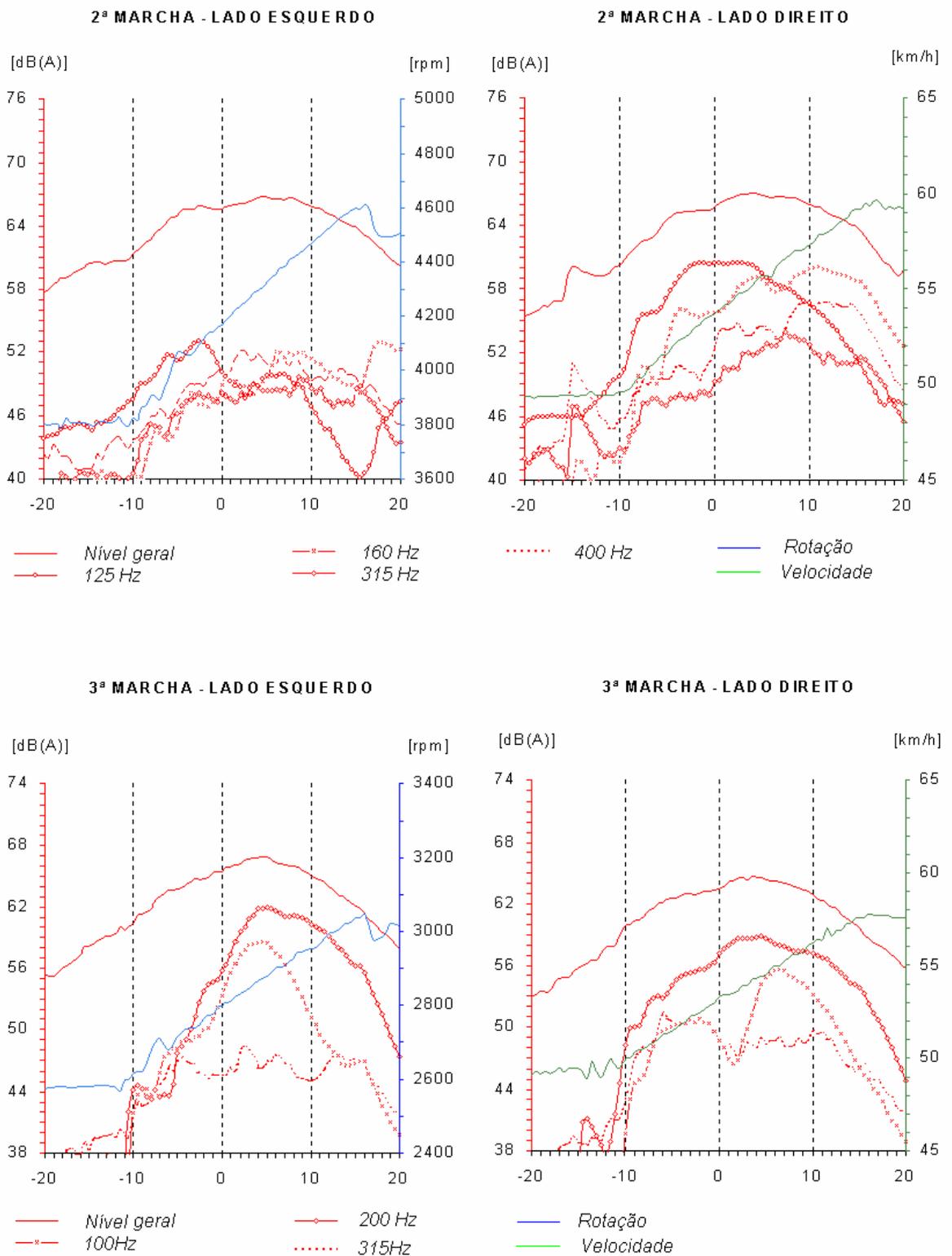


Figura 5.23 Níveis de ruído de passagem medidos no veículo com a parede do sistema de escape individualizado

Ruído dos pneus

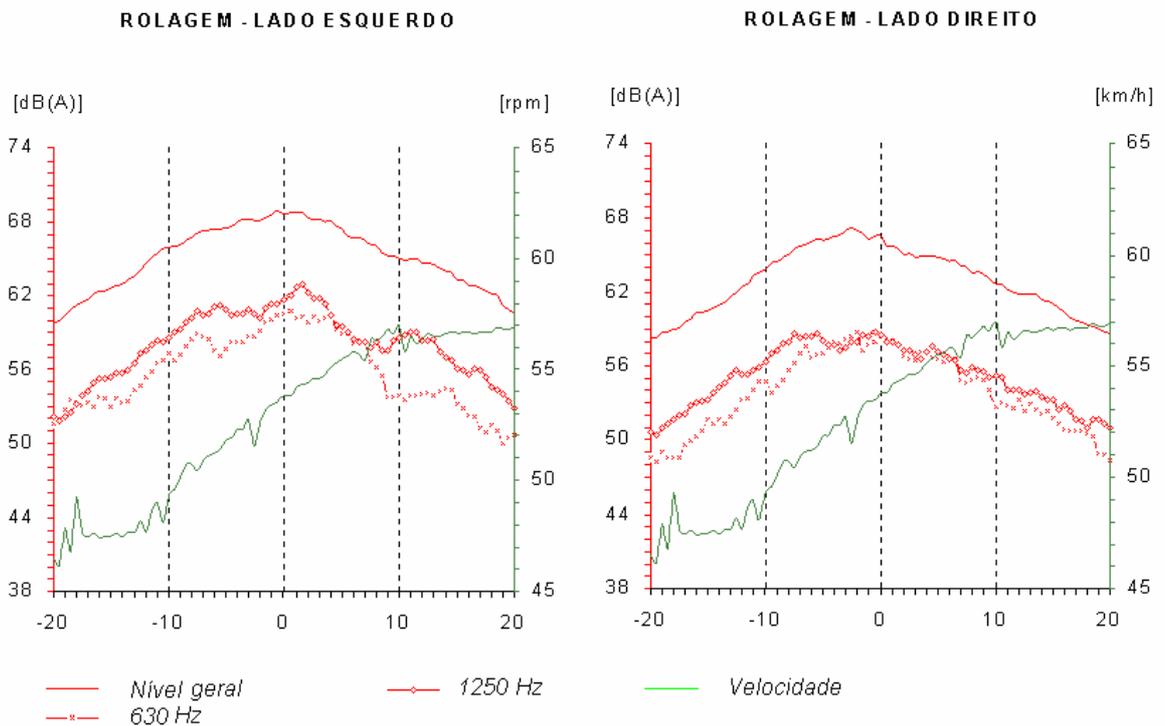


Figura 5.24 Níveis de ruído de passagem medidos no veículo com os pneus individualizados

Análise dos resultados

A figura 5.19 demonstra os gráficos de ruído medidos no veículo na condição base (sem abafamento) como referência para análise das fontes individuais, que correspondem aos níveis globais e os níveis de 2^a, 4^a e 6^a ordens.

As Figs. 5.20 a 5.23 demonstram os níveis de ruído emitidos pelas fontes individualmente. Nesta análise, nota-se maior influência da 2^a ordem nas provas em 2^a marcha e maior influência da 4^a ordem nas provas em 3^a marcha, pois estas curvas acompanham a mesma tendência da curva em nível global. Isto justifica-se pelo fato de que em 2^a marcha predomina o ruído proveniente de combustão, e em 3^a marcha predomina o ruído proveniente da flutuação dos gases de escape e aspiração do ar provocados pelas aberturas e fechamentos das válvulas.

A Fig. 5.24 demonstra os níveis medidos no pneu individualmente, onde verifica-se maior influência da 2^a harmônica da frequência principal.

Através destas curvas foram obtidos os valores máximos emitidos pelas respectivas fontes, conforme a Tab. 5.3.

Tabela 5.3 Níveis máximos de ruído medidos em cada fonte

	Níveis de ruído em 2ª Marcha – dB(A)		Níveis de ruído em 3ª Marcha – dB(A)	
	LE	LD	LE	LD
Boca de escape	71,4	72,1	69,5	67,2
Conjunto motopropulsor	71,2	71,3	67,5	65,9
Sistema de aspiração	67,9	71,1	69,4	67,8
Parede de escape	66,9	67,2	66,9	64,7
Pneus	68,8	67,1	68,8	67,1

A contribuição individual de cada fonte pode ser melhor analisada através de um confronto das curvas dos níveis de todas as fontes, incluindo a curva obtida do veículo na condição base, conforme as Figs. 5.25 a 5.28.

Confronto das fontes individualizadas - lado esquerdo - 2ª marcha

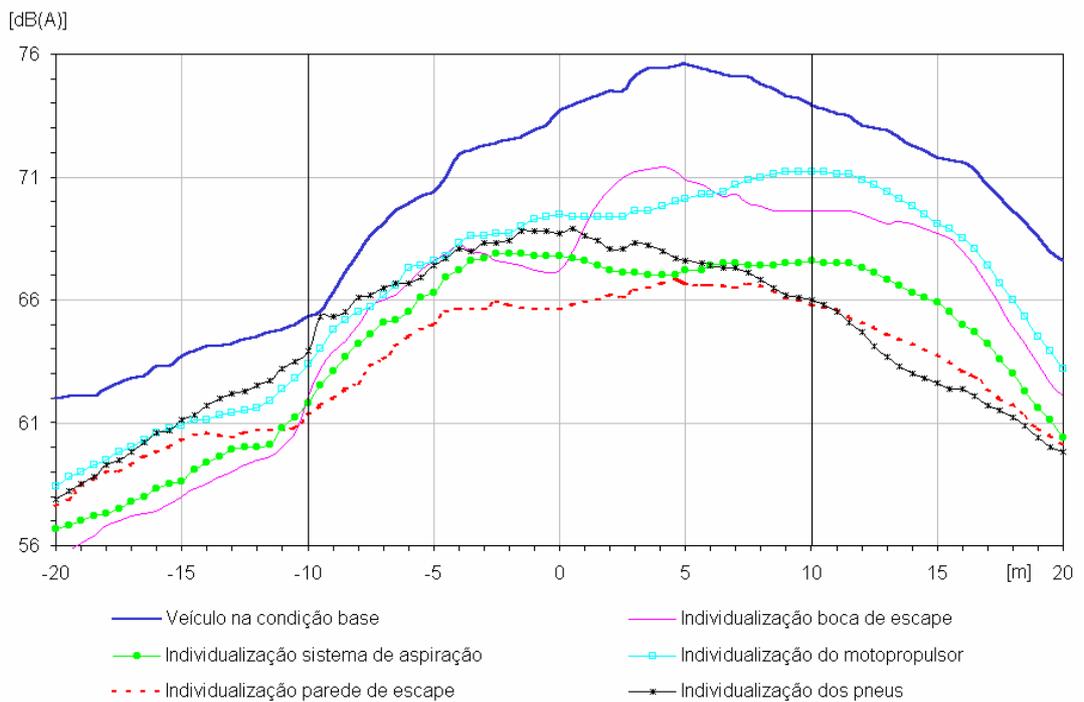


Figura 5.25 Confronto das curvas de ruído entre as fontes individuais – 2ª marcha (LE)

Confronto das fontes individualizadas - lado direito - 2ª marcha

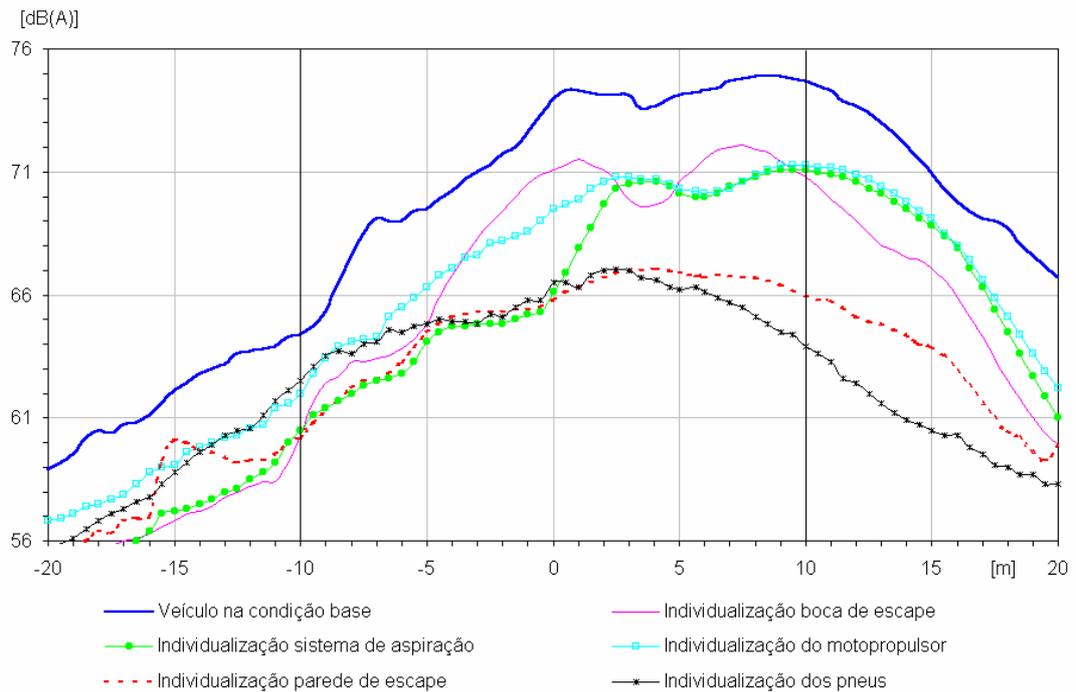


Figura 5.26 Confronto das curvas de ruído entre as fontes individuais – 2ª marcha (LD)

Confronto das fontes individualizadas - lado esquerdo - 3ª marcha

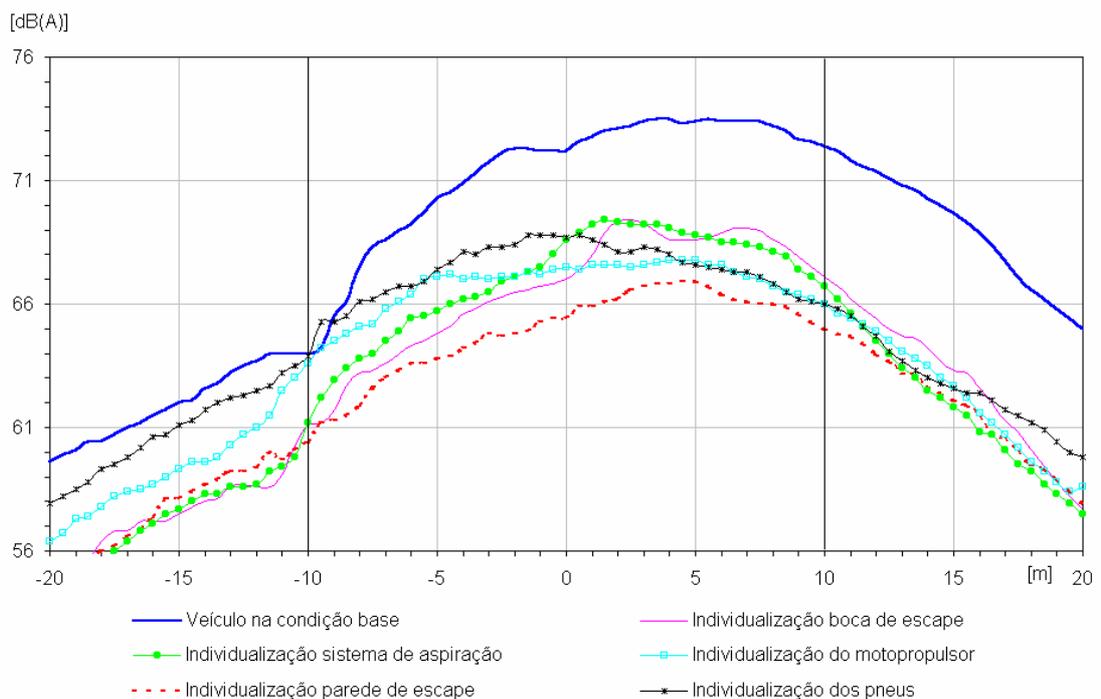


Figura 5.27 Confronto das curvas de ruído entre as fontes individuais – 3ª marcha (LE)

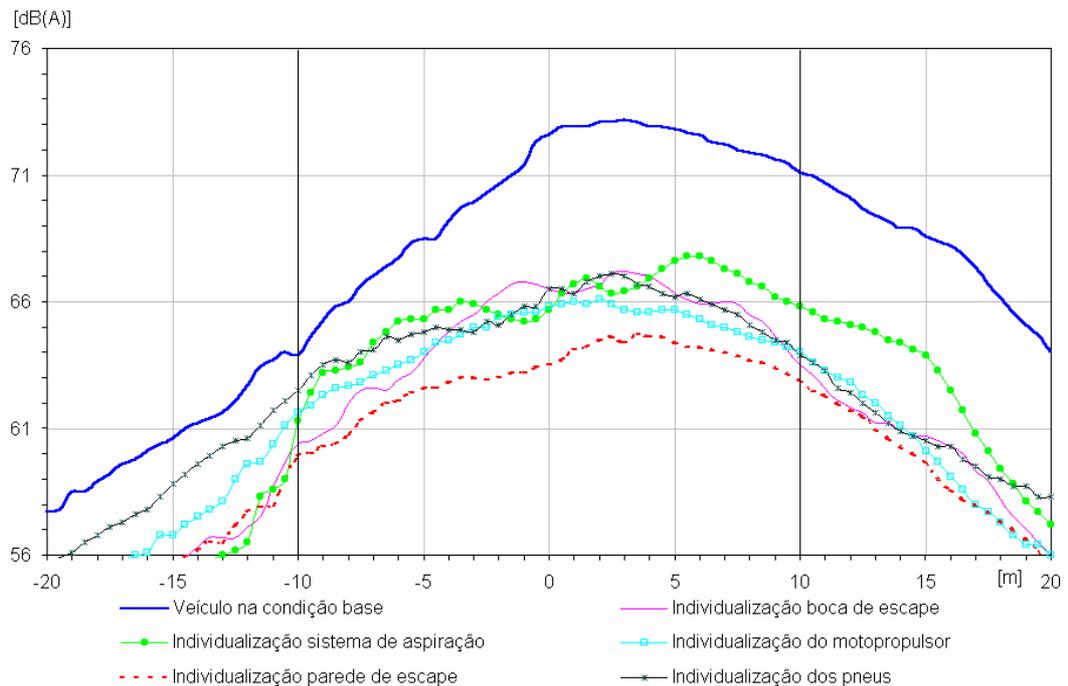
Confronto das fontes individualizadas - lado direito 3ª marcha

Figura 5.28 Confronto das curvas de ruído entre as fontes individuais – 3ª marcha (LD)

Este confronto facilita a identificação das fontes de maior influência no nível global do veículo, onde verifica-se claramente a maior influência do ruído de boca de escape em praticamente todas as condições. Nota-se também com maior clareza, através deste confronto, que os níveis de ruído emitidos pela parede de escape estão bem abaixo dos níveis esperados, tendo em vista que tal fonte demonstra ser, por conceito, de grande potencial acústico. Entretanto, observa-se claramente que esta fonte foi influenciada pelo volume adicional adotado para abafamento do ruído emitido pela boca de escape.

Visando verificar a performance obtida na individualização das fontes, os níveis sonoros foram somados e confrontados com a curva de ruído global, medida no veículo na condição base, conforme demonstrado na Fig 5.29.

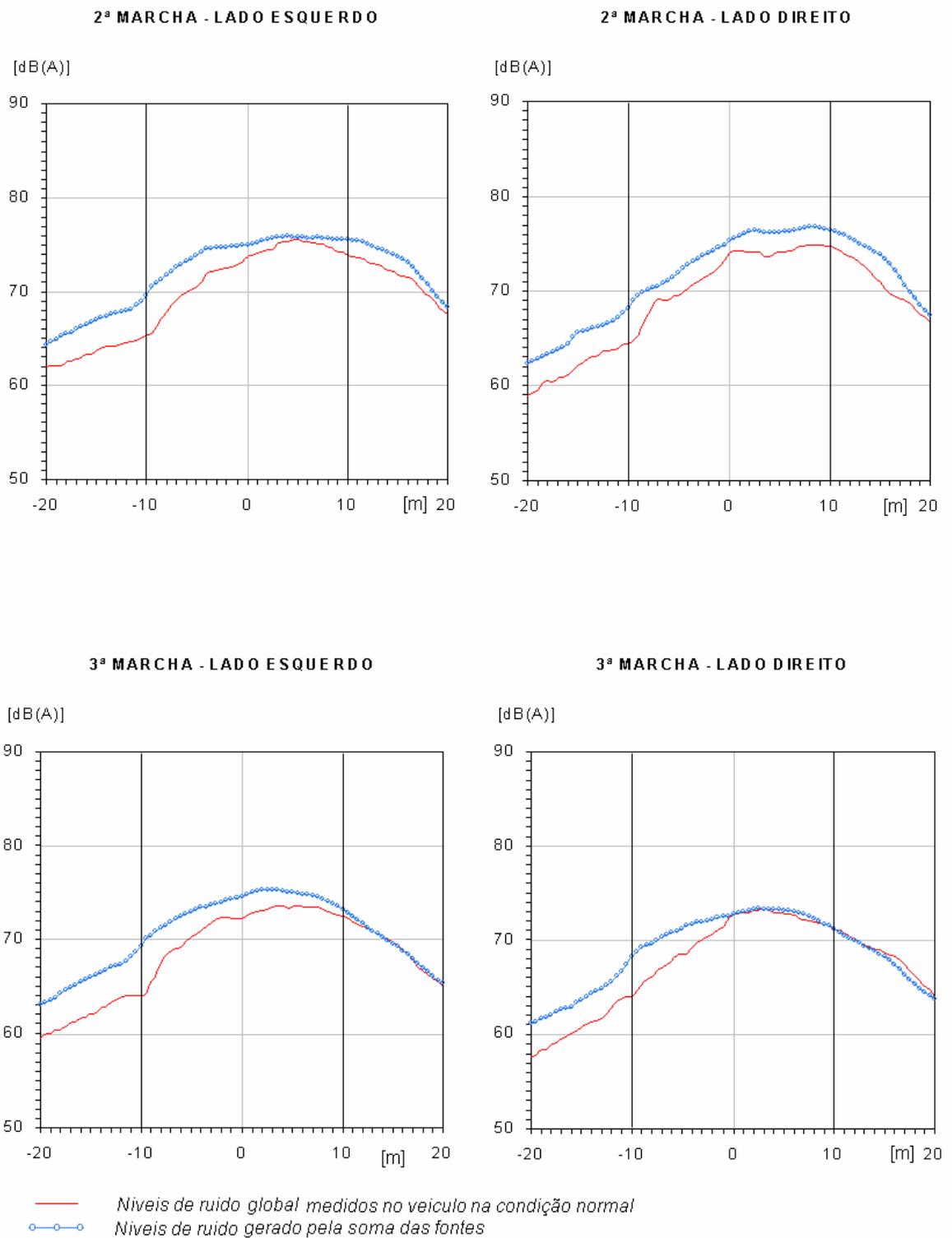


Figura 5.29 Confronto entre as curvas de ruído medidos no veículo na condição base e as curvas de ruído originado da soma das fontes individuais

Observa-se neste confronto uma boa correlação entre a curva referente a soma das fontes individuais e a curva de ruído global, indicando que foi obtida performance satisfatória no abafamento das fontes.

5.3.2 Classificação das fontes sonoras

O *ranking* das fontes de ruído externo foi baseado nos valores de níveis máximos medidos em cada fonte, conforme demonstrado na Tab. 5.3. A princípio, as fontes foram classificadas seguindo o mesmo procedimento que a norma NBR 8433 determina para obtenção do resultado de ruído de passagem, ou seja, através da média dos valores máximos registrados em 2ª e 3ª marcha, conforme a Fig. 5.30.

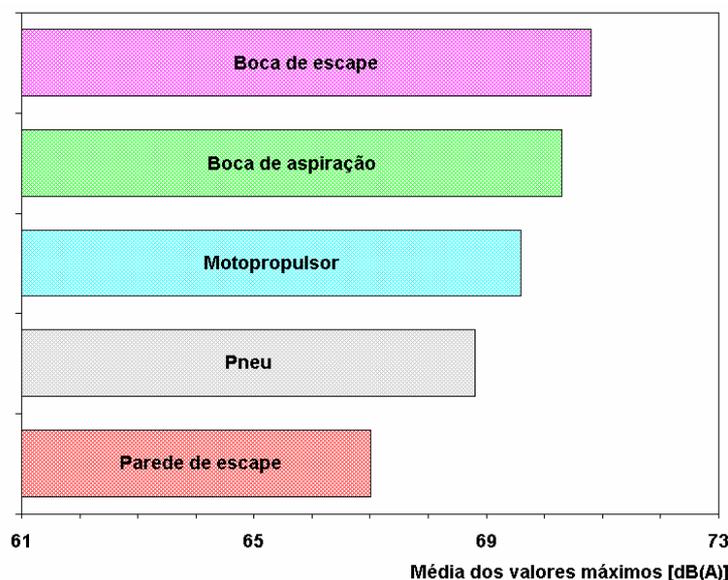


Figura 5.30 Classificação das fontes sonoras pela média dos valores máximos – metodologia quiet car

Verifica-se que a principal fonte de ruído predominante no veículo é a boca de escape, conforme já era esperado em função das análises anteriores, embora apresente pouca diferença em relação ao ruído de aspiração, a segunda maior fonte classificada. Este resultado gera a expectativa, em uma primeira análise, de que o ruído externo global do veículo seria reduzido atenuando o ruído de aspiração, o que seria mais conveniente em termos de factibilidade, custo e o tempo dedicado para uma ação corretiva nesta fonte, em relação ao que seria investido em uma mesma ação no sistema de escape. Entretanto, em uma

segunda análise ainda mais detalhada, onde cada fonte foi classificada segundo os valores máximos de ruído de passagem em cada lado medido, em 2ª e em 3ª marchas, nota-se um comportamento diferente do potencial desta fonte, conforme a Fig. 5.31.

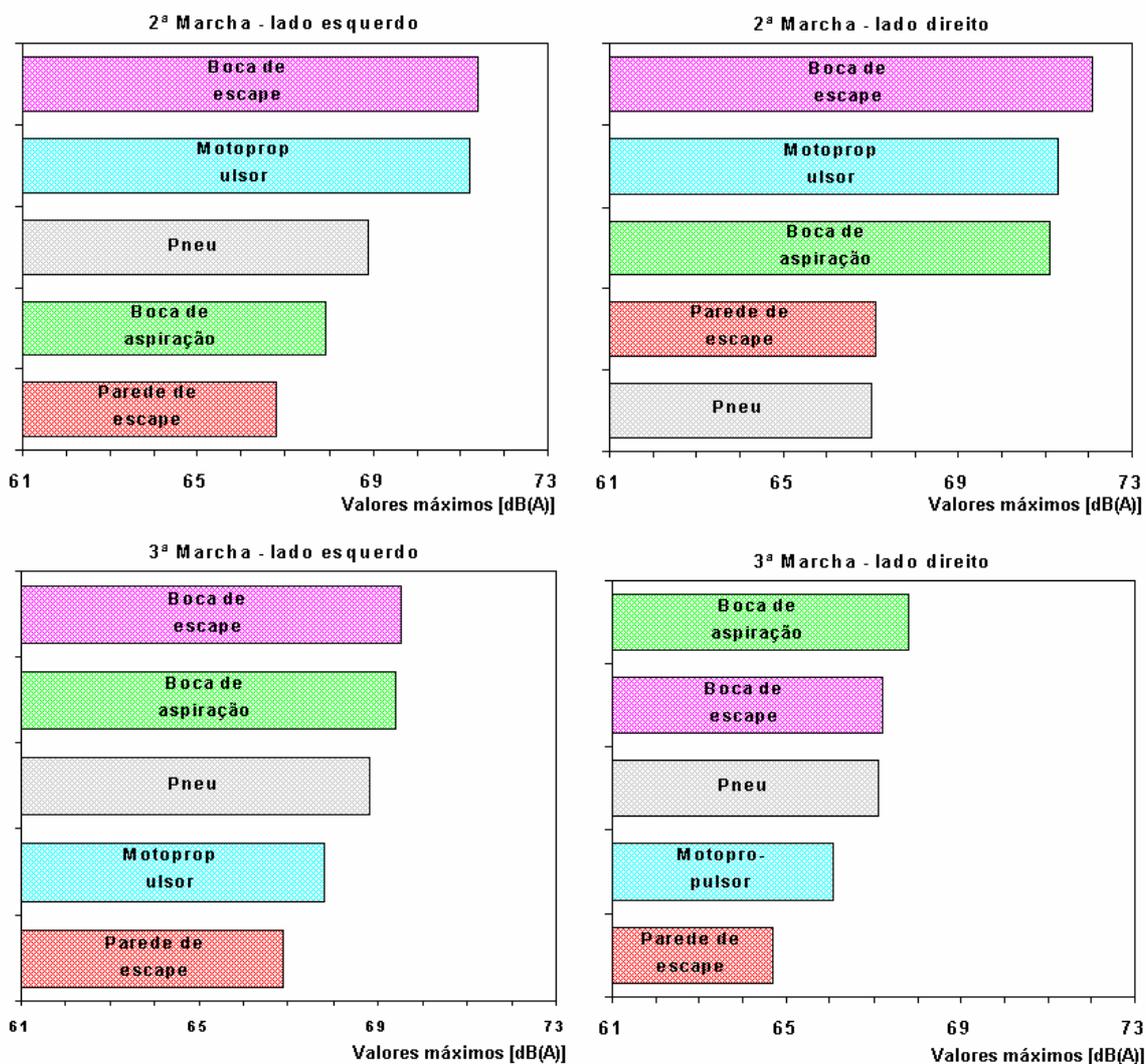


Figura 5.31 Classificação das fontes sonoras em 2ª e 3ª marchas isoladamente – metodologia quiet car

Já por esta análise, verifica-se com maior clareza que a boca de escape apresenta um potencial bem maior de redução do nível global de ruído, pois o ruído emitido por esta fonte predomina tanto na 2ª como na 3ª marcha, praticamente nas duas laterais medidas. Já o sistema de aspiração, que demonstrou ter um bom potencial no ranking inicialmente elaborado, demonstra nesta análise pouco potencial de redução, pois a atenuação deste ruído

praticamente não afetaria o ruído global em 2ª marcha. Portanto, conclui-se que a elaboração do ranking das fontes apenas pela média dos maiores valores não é adequado, sendo necessárias informações bem mais detalhadas sobre a influência das fontes em cada lateral medida, nas provas em 2ª e 3ª marcha.

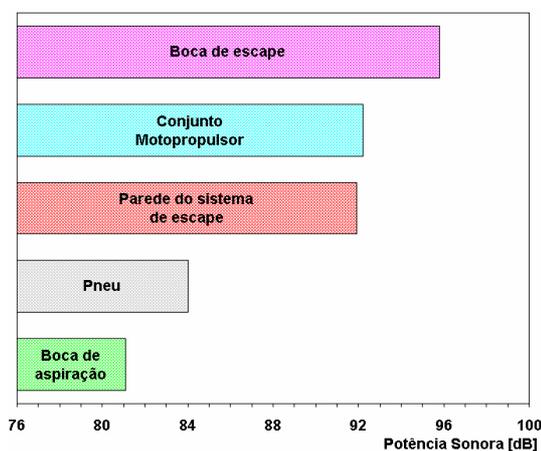
5.4 Correlação dos resultados obtidos nas duas metodologias

A correlação entre as duas metodologias foi realizada através do confronto de alguns resultados comuns às duas metodologias avaliadas. Sendo assim, para manter uma coerência nestes confrontos, os resultados obtidos pela metodologia *quiet car* utilizados para confronto foram apenas os da medição em 2ª marcha do lado esquerdo.

5.4.1 Confronto dos ranking

Os rankings das fontes sonoras, por serem os principais resultados apresentados, permitem estabelecer o principal confronto desta análise, conforme a Fig 5.32.

a) Intensidade sonora



b) "Quiet car"

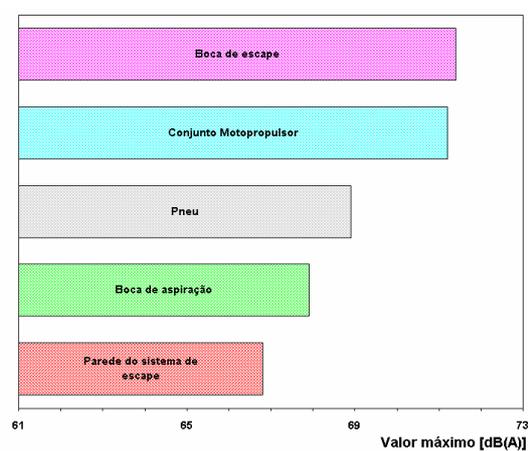
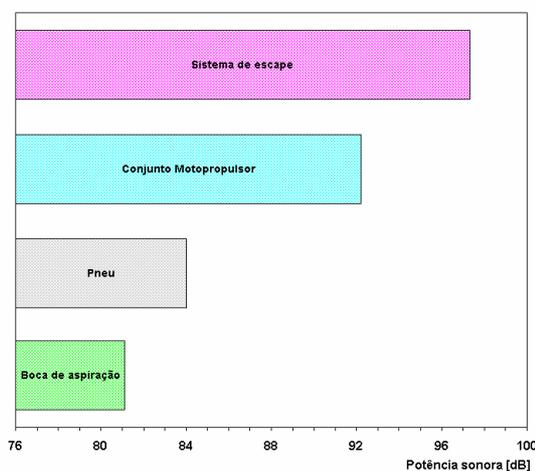


Figura 5.32 Confronto entre os rankings obtidos pelas duas metodologias

Verifica-se neste confronto uma boa correlação nas duas primeiras fontes identificadas, o que pode ser considerado um resultado inicial bastante satisfatório, pois são as duas primeiras fontes que apresentam o maior potencial de redução de ruído externo.

Verifica-se, porém, uma inversão na classificação da fonte referente ao ruído de parede de escape, que ocorreu devido à evidente influência do volume adicional adotado para abafamento do ruído de boca de escape. De certa forma, esta classificação indevida pode ser corrigida se, na elaboração do *ranking*, o sistema de escape for considerado como uma única fonte, englobando o ruído emitido pela parede e pela boca de escape, conforme apresentado na Fig 5.33, o que é justificável, pois qualquer intervenção de melhoria neste componente para redução de ruído causa influência direta nestas duas fontes individuais.

a) Intensidade sonora



b) “Quiet car”

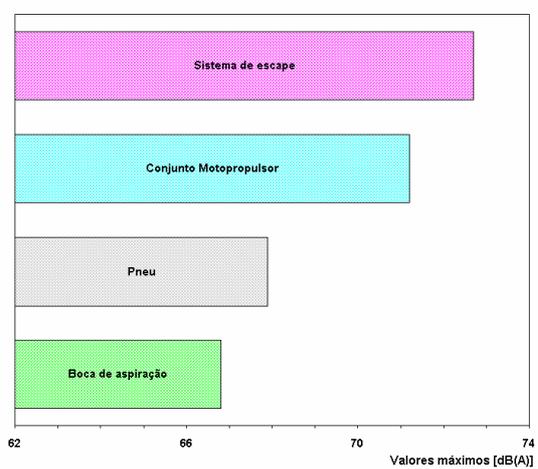


Figura 5.33 Confronto entre os rankings obtidos pelas duas metodologias, considerando a boca e parede de escape como uma fonte única

5.4.2 Confronto dos espectros

Nesta análise são confrontados os espectros de intensidade sonora com os respectivos espectros de ruído obtidos pela metodologia *quiet car*, conforme as Fig. 5.34 a 5.38, na mesma faixa de rotações. Como as distâncias de medição são totalmente diferentes nas duas metodologias, não serão comparados os valores absolutos, e sim os valores relativos. Esta correlação foi possível mantendo fixas as escalas dos eixos em todos os espectros confrontados, uma vez determinadas escalas proporcionais nas duas grandezas utilizadas.

Boca de escape

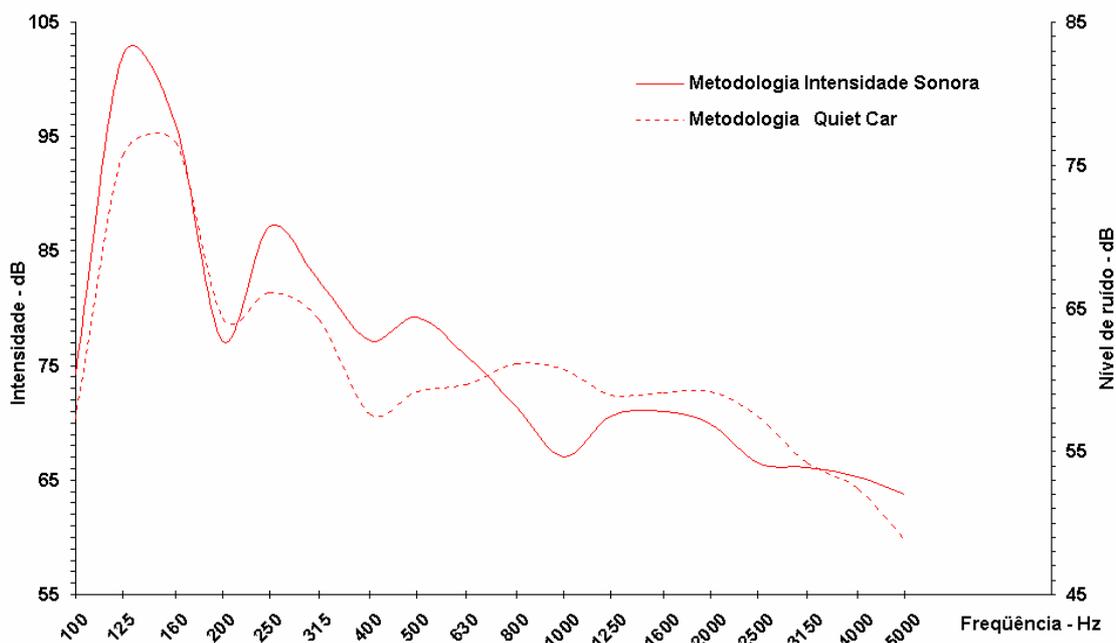


Figura 5.34 Comparativo entre espectros obtidos das medições da boca de escape

Sistema de aspiração

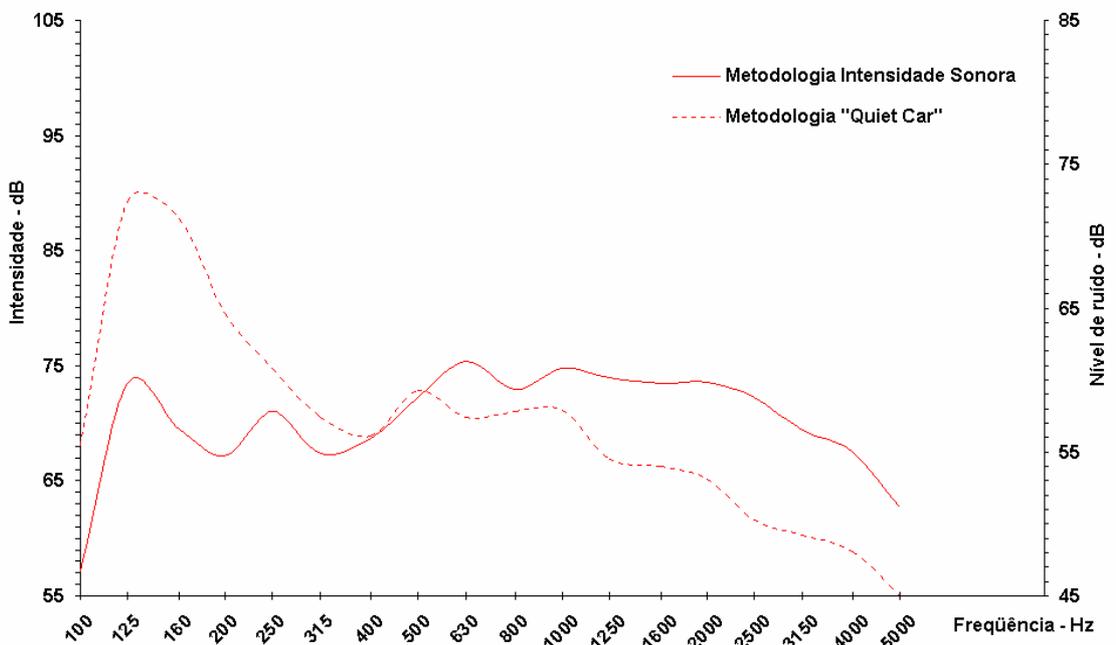


Figura 5.35 Comparativo entre espectros obtidos das medições do sistema de aspiração

Conjunto motopropulsor

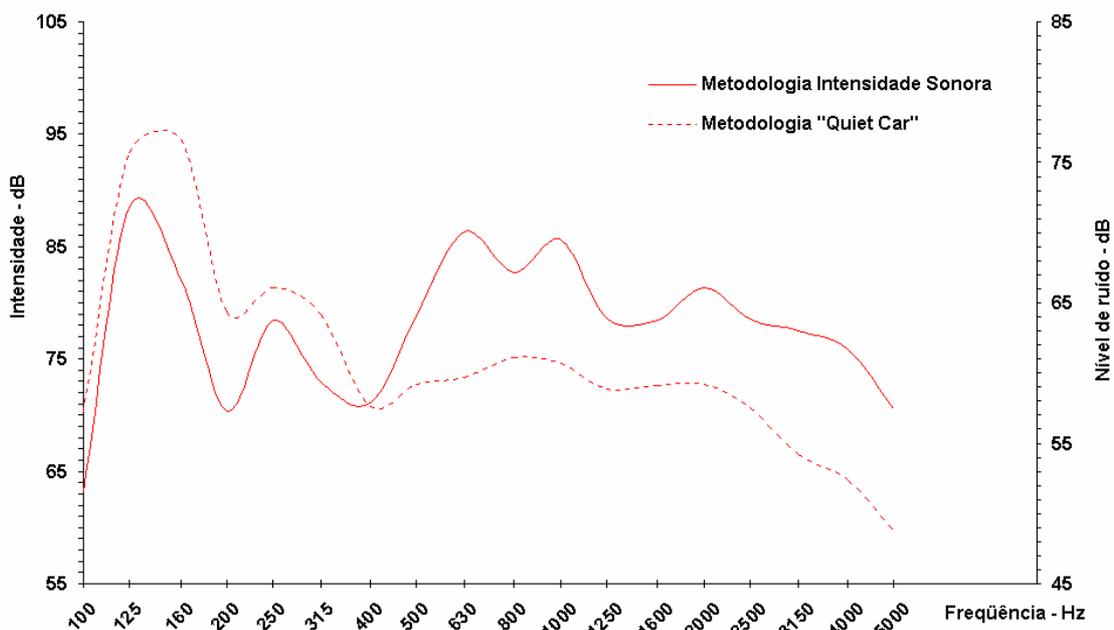


Figura 5.36 Comparativo entre espectros obtidos das medições do conjunto motopropulsor

Parede de escape

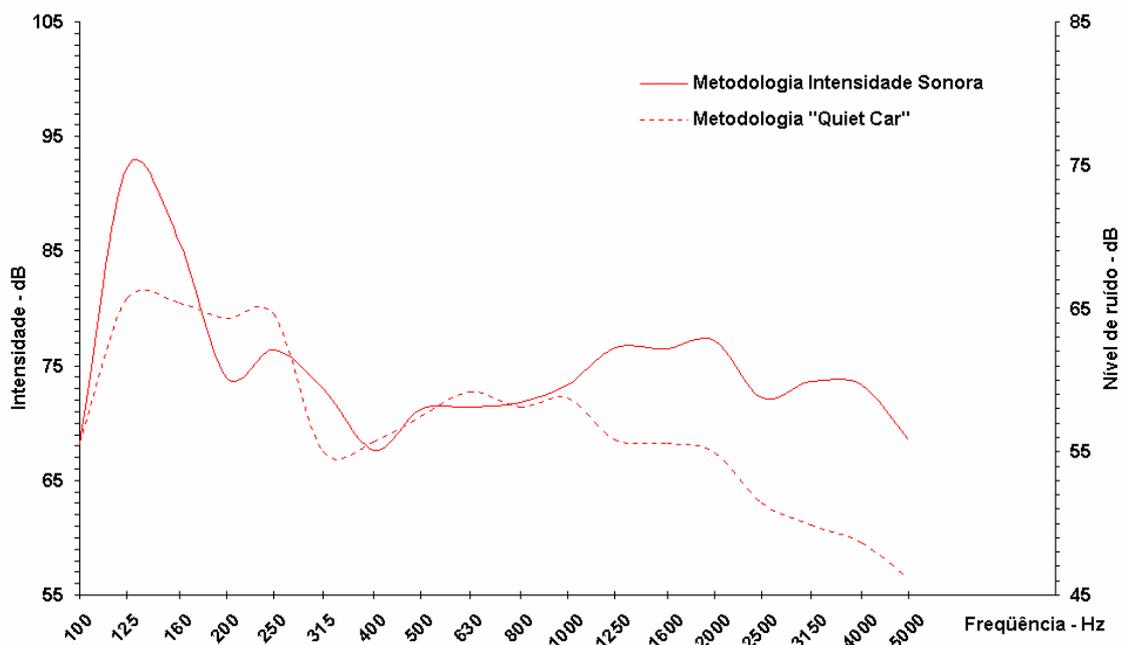


Figura 5.37 Comparativo entre espectros obtidos das medições da parede de escape

Pneus

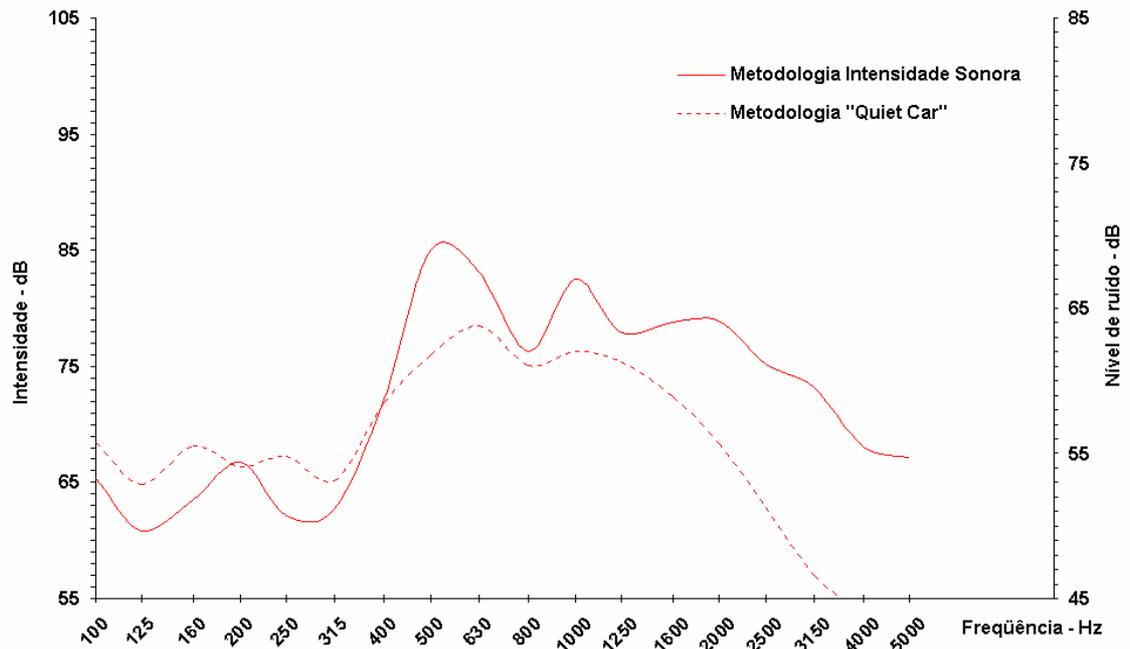


Figura 5.38 Comparativo entre espectros obtidos das medições dos pneus

Nesta análise também foi constatada uma correlação bastante satisfatória em praticamente todos os espectros confrontados, tendo em vista que os espectros confrontados de cada fonte mantiveram sempre as mesmas tendências, além de não variar significativamente a diferença dos valores relativos entre elas. Esta boa correlação foi possível devido às características vetoriais da técnica de intensidade sonora que permite medições localizadas, sem a influência das demais fontes próximas.

5.4.3 Direcionalidade do Fluxo de Intensidade Sonora

Outra importante análise realizada no confronto dos resultados foi a correlação entre os dados relativos à direcionalidade do fluxo de energia sonora, fornecidos pelos mapas de vetores, e a curva de ruído em função da posição relativa do veículo durante a passagem pela linha dos 20 m na prova de ruído de passagem, conforme Fig 5.39. O confronto foi focado apenas na fonte de maior predominância identificada pelas duas metodologias (ruído de boca de escape).

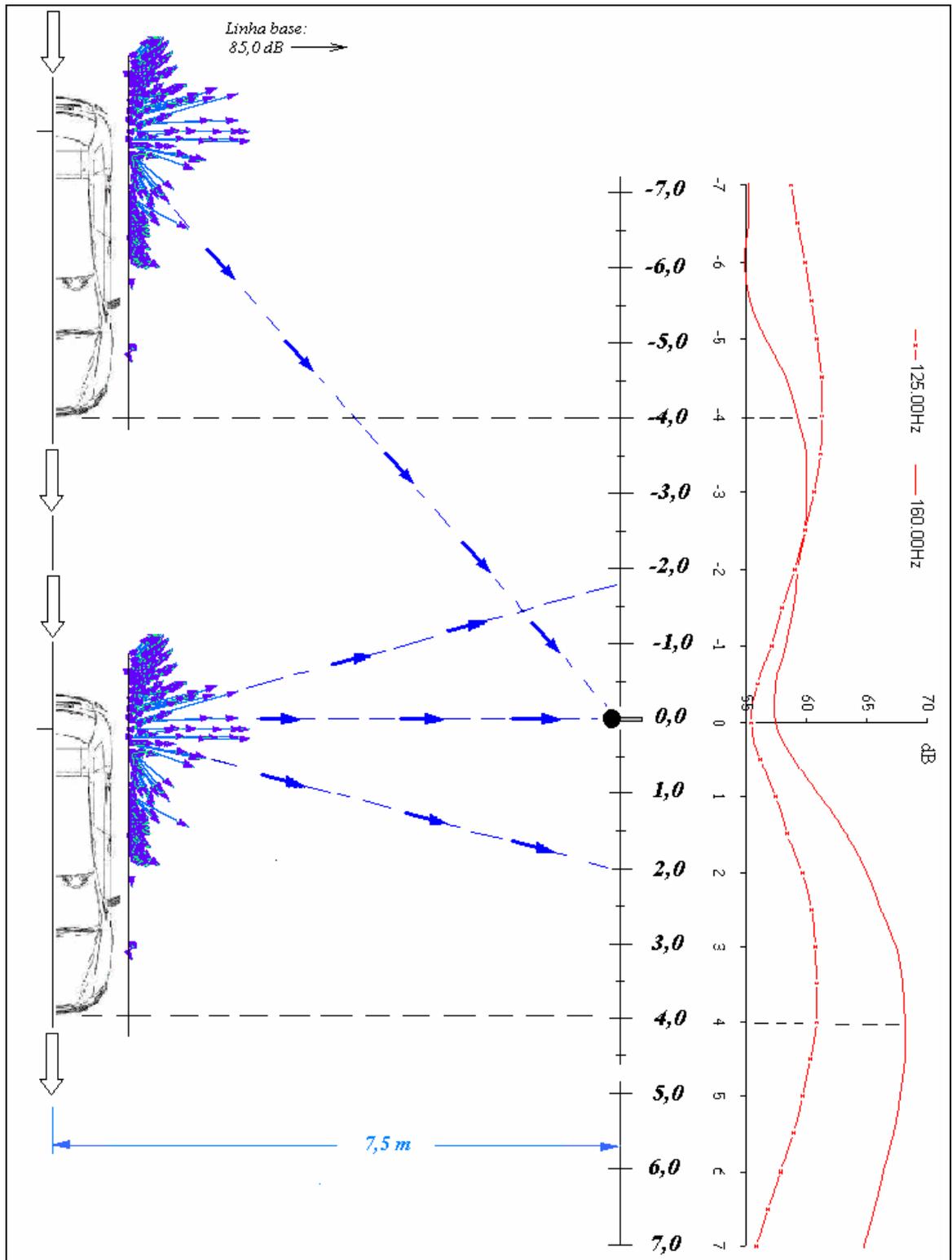


Figura 5.39 Vista superior do mapa de vetores sobreposto indicando a direção do fluxo de intensidade sonora correlacionado com a curva de ruído

A Fig. 5.39 demonstra, em escala proporcional às dimensões reais, uma vista superior das posições relativas do veículo durante a prova de ruído de passagem, nos pontos onde ocorreram os maiores níveis emitidos pela boca de escape individualmente, tendo como referência os pontos de máximos das curvas de ruído (- 4,0 m e + 4,0 m) nas frequências de 125 e 160 Hz, as quais corresponde à frequência de 2ª ordem. Ressalta-se que a referência utilizada pelo sistema telemétrico para determinar as posições do veículo é a extremidade dianteira do veículo. Através de uma sobreposição do mapa de vetores, também na mesma faixa de frequência, observa-se que, na posição em que ocorre o valor máximo de ruído (+ 4,0 m), o principal fluxo de energia emitido na região onde se posiciona a boca de escape incide diretamente sobre o microfone. Verifica-se também que o fluxo de energia diverge formando um ângulo que abrange toda a extensão da curva (aproximadamente 4,0 m). Na posição em que ocorre outro ponto de máximo da curva de ruído, (- 4,0 m), porém de menor magnitude, verifica-se também um fluxo de energia direcionado para a região frontal do microfone, de intensidade proporcionalmente menor, também proveniente da região da boca de escape. A Fig. 5.40 demonstra, em vista lateral, o fluxo de energia sonora, emitido por esta fonte em direção ao microfone, obtido pela sobreposição do mapa de vetores na mesma faixa de frequência citada.

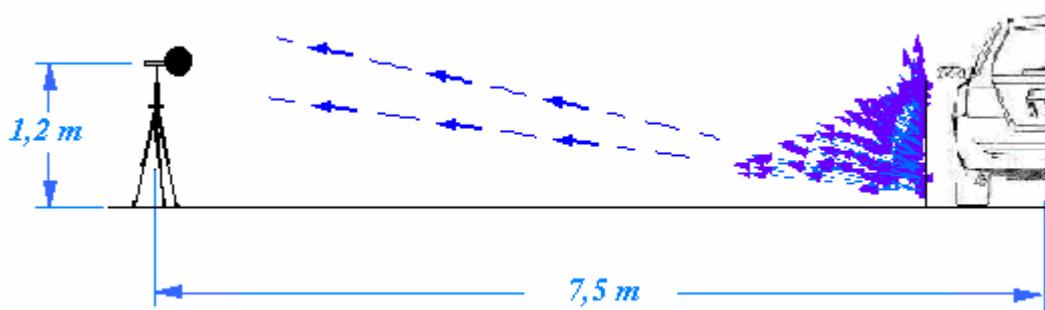


Figura 5.40 Vista lateral do mapa de vetores sobreposto indicando a direção do fluxo de intensidade sonora

Capítulo 6

APLICAÇÃO PRÁTICA

6.1 Avaliação do Comportamento Acústico do Veículo Após Modificação da Principal Fonte Identificada

Nesta seção será avaliado o efeito causado no nível de ruído externo global após realizada uma intervenção de melhoria no sistema de escape, principal fonte identificada, visando à redução do ruído emitido pela saída dos gases. Este intervento foi realizado pelo fornecedor deste componente, no sentido de atenuar o ruído predominante de baixa frequência. Após esta correção, o veículo foi submetido a uma nova prova de ruído de passagem, sendo confrontados os resultados com os medidos na situação inicial.

6.1.1 Descrição das Modificações do Sistema de Escape

As modificações no sistema de escape, cujo enfoque foi atenuar o ruído de baixa frequência predominante na 2ª ordem, foram executadas principalmente no silencioso traseiro, conforme abaixo descritas, por ser este o principal componente diretamente relacionado a tal tipo de ruído:

- Restrição do diâmetro do tubo perfurado no interior do silencioso intermediário;
- Restrição do tubo de ligação do silencioso intermediário ao silencioso traseiro;
- Aumento de volume do silencioso traseiro, de forma a atingir um fator que melhor define a razão entre a cilindrada do motor e o volume total do sistema de escape;

- Modificação da posição de saída da boca de escape, com conseqüente redução do seu comprimento. A configuração anterior, embora favorável na atenuação do ruído de jato de saída dos gases, não era adequada para o tipo de ruído de baixa freqüência.

A Fig. 6.1 ilustra as modificações acima citadas.

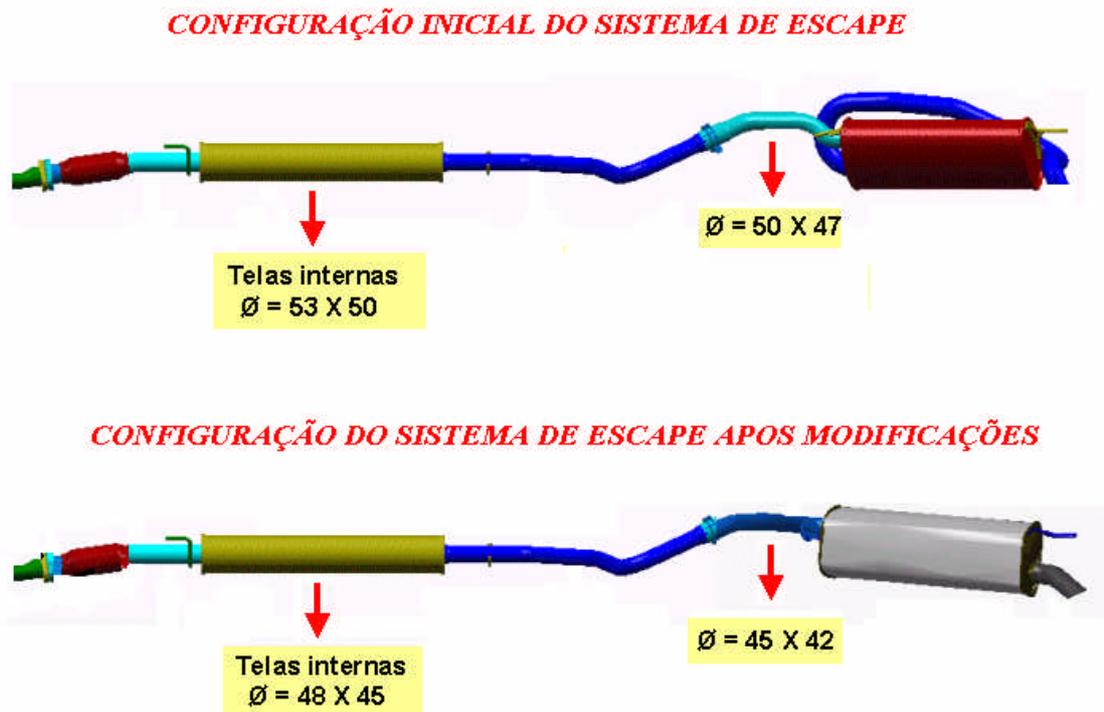


Figura 6.1 Modificações do sistema de escape

6.1.2 Medições dos Níveis de Ruído Externo

As Fig. 6.2 e 6.3 demonstram os níveis de ruído de passagem em 2ª e 3ª marcha respectivamente, medidos novamente sobre o mesmo veículo, já com a nova configuração do sistema de escape. Nestes gráficos estão também inclusos os respectivos registros dos valores de velocidades e rotações de provas.

Prova em 2ª marcha

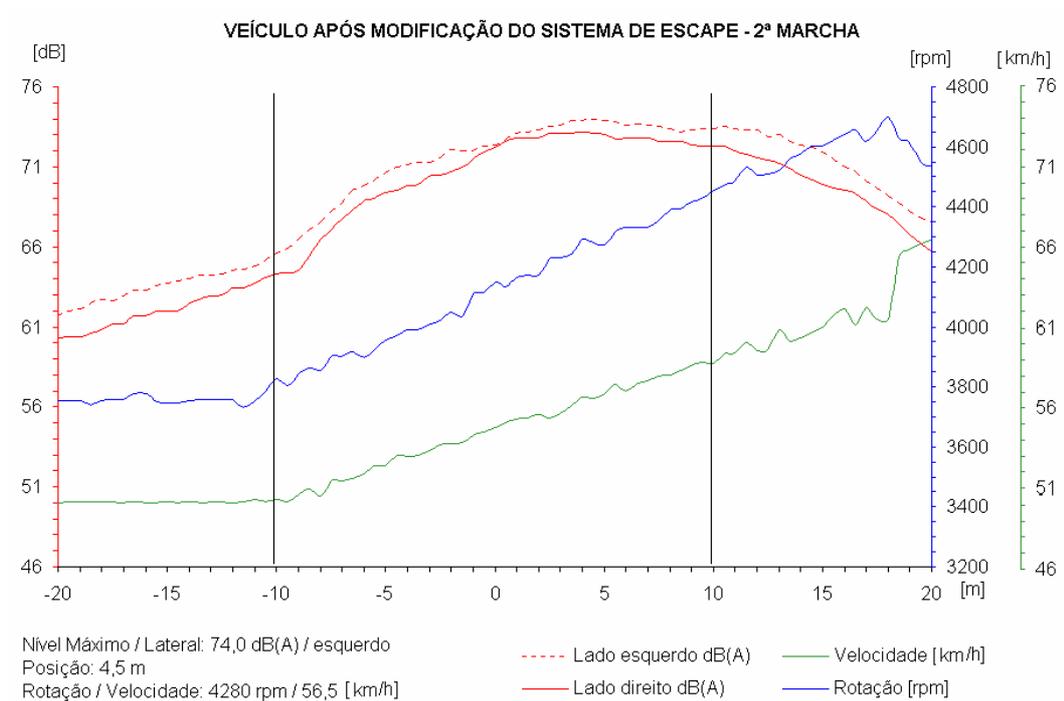


Figura 6.2 Níveis de ruído externo em 2ª marcha após modificação do sistema de escape

Prova em 3ª marcha

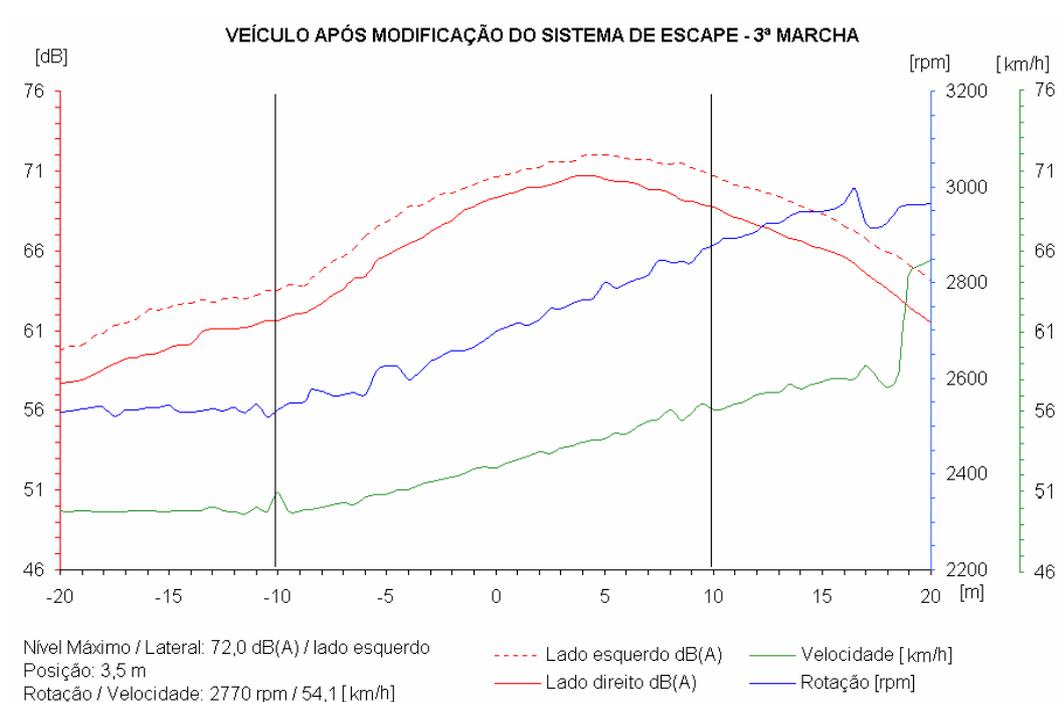


Figura 6.3 Níveis de ruído externo em 3ª marcha após modificação do sistema de escape

A Fig. 6.4 demonstra o confronto entre os níveis de ruído obtidos nesta nova condição e os níveis obtidos na condição base.

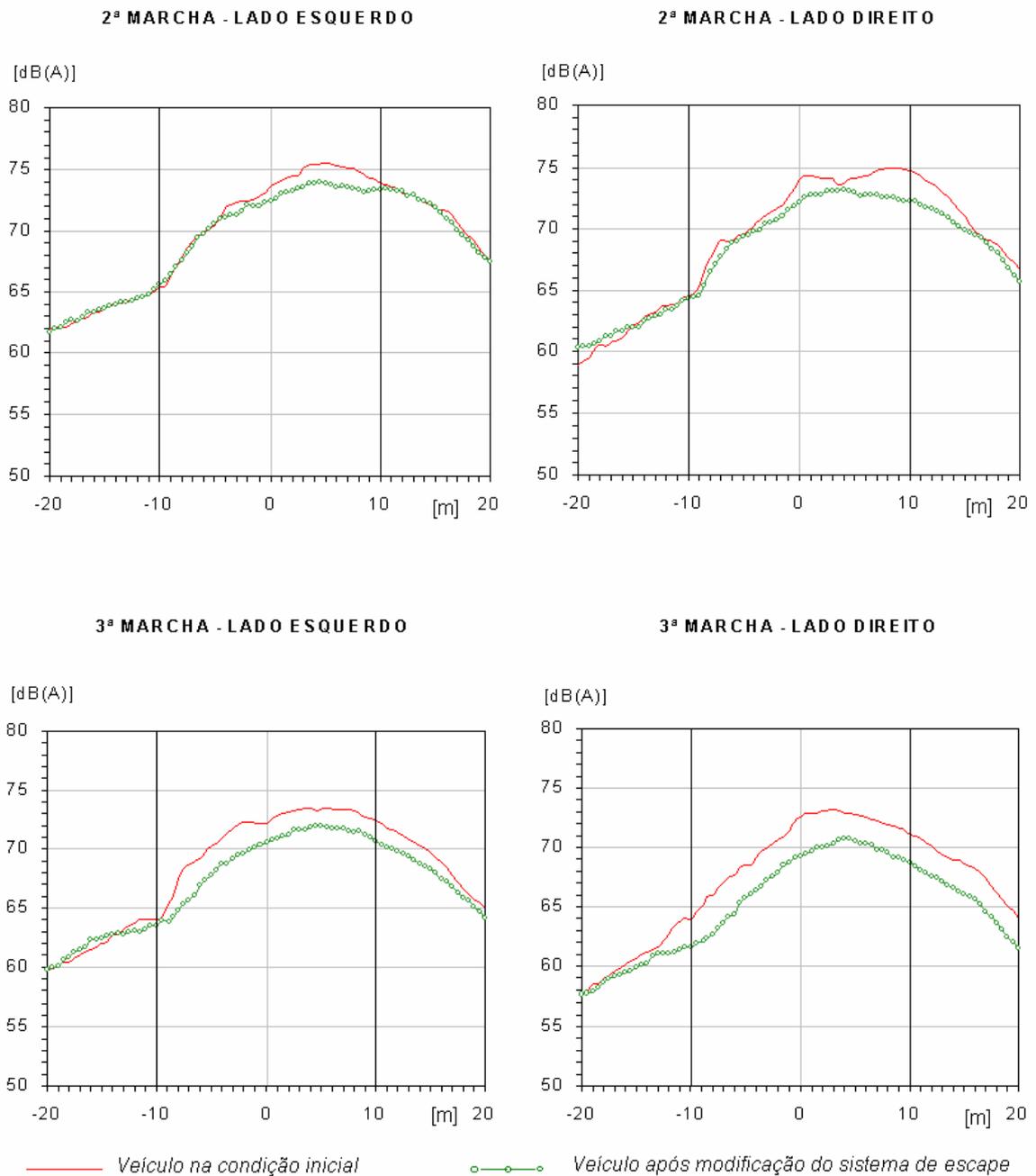


Figura 6.4 Confronto dos níveis de ruído externo entre condição inicial e após modificação do sistema de escape

Observa-se neste confronto uma redução considerável dos níveis de ruído global, tanto em 2ª como em 3ª marcha, obtida apenas com as modificações realizadas no sistema de escape. Tal êxito deve-se ao fato de que, com estas modificações, foram atenuados tanto o ruído de boca de escape como o ruído

irradiado pelas paredes do escape, que também demonstraram compor uma fonte em potencial. Estes resultados demonstram a importância de aplicar uma técnica eficaz para identificação de fontes em um trabalho de redução de ruído externo.

6.1.3 Resultado Final

O resultado final, conforme Resolução CONAMA 01/93, foi obtido pela média dos valores máximos dos níveis de ruído em 2ª e 3ª marcha respectivamente. A Fig. 6.5 demonstra resultados obtidos, antes e após a modificação do sistema de escape. Ressalta-se que os valores abaixo já estão descontados de 1,0 dB(A), conforme permitido pela referida resolução.

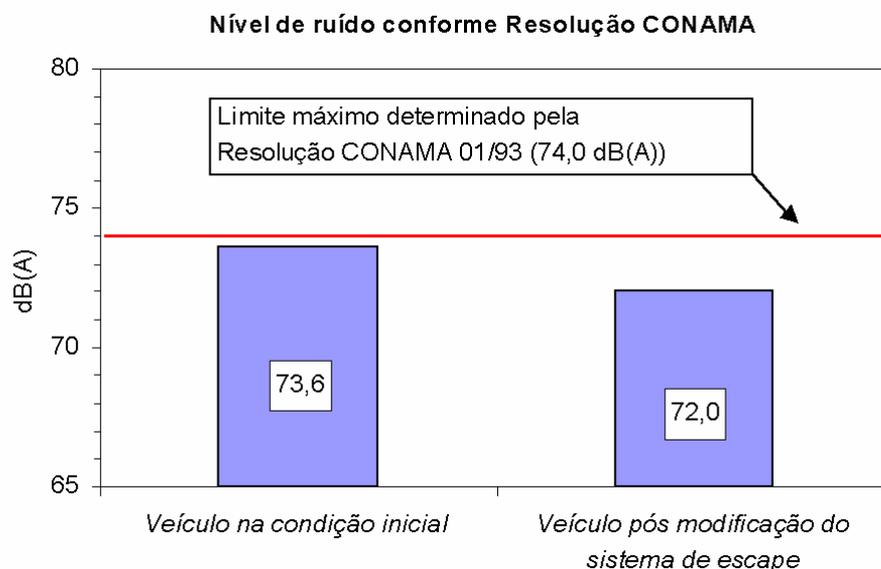


Figura 6.5 Resultados de ruído de passagem conforme Resolução CONAMA

Observa-se que o veículo, na condição inicial, embora atendesse ao limite determinado, encontrava-se em situação pouco cômoda em relação à legislação, devido à proximidade do nível encontrado ao limite imposto. Logo, qualquer dispersão que porventura ocorresse em produção, poderia ocasionar o não atendimento à legislação. Já na nova condição, o veículo encontra-se em uma situação bem mais cômoda, pois os níveis de ruído atendem com relativa folga aos limites determinados.

Capítulo 7

CONCLUSÕES

A intensidade sonora, que vem comprovando ser um dos melhores parâmetros para identificação de fontes de ruído em aplicações das mais variadas possíveis, demonstrou ser também um bom parâmetro quando aplicada na identificação de fontes de ruído externo de um veículo, desde que utilizados parâmetros adequados. Esta eficácia foi comprovada pela boa correlação com os resultados obtidos através da metodologia *quiet car*, comprovando assim que medições realizadas em campo próximo às fontes representam com confiabilidade as mesmas condições de medições em campo distante. Além disto, através desta metodologia foram obtidas informações de grande utilidade, tanto para uma análise completa do comportamento acústico individual das fontes sonoras, como para direcionamento das ações corretivas da principal fonte identificada.

A metodologia de intensidade sonora demonstrou-se também mais eficaz que a metodologia *quiet car*, em função dos seguintes fatores que viabilizam a sua utilização:

- A metodologia de intensidade sonora dispensa a utilização de aparatos complicados e de difícil obtenção, que inviabilizam em certas situações a utilização da técnica *quiet car*. Como exemplo pode ser citado o pneu *sleek*, peça fundamental para compor o pacote de abafamento das fontes. Na maioria dos casos não se encontra no mercado brasileiro uma configuração deste componente que apresente as mesmas características dimensionais do pneu original.

- O abafamento das fontes adotados na metodologia *quiet car*, em algumas situações, causa forte influência na fonte descoberta, comprometendo os resultados apresentados na caracterização desta fonte, como o ocorrido na caracterização do ruído emitida pela parede de escape, o qual foi influenciada pelo abafamento do ruído de boca.

- O tempo de resposta, fator de extrema importância no desenvolvimento de um projeto, foi significativamente menor na metodologia de intensidade sonora. Isto porque o tempo total dedicado neste experimento, considerando o tempo de preparação, execução das provas e análise dos resultados, foi de aproximadamente 05 dias. Já na metodologia *quiet car* o tempo dedicado foi de aproximadamente 02 meses, além de um maior número de pessoas envolvidas nestas atividades.

Finalmente, a redução dos níveis de ruído externo proporcionado pela modificação da configuração do sistema de escape, demonstrou a importância de se realizar um trabalho preliminar de identificação da principal fonte de ruído de um veículo, quando o mesmo apresentar, em fase de desenvolvimento, níveis elevados de ruído de passagem.

Sugestões para trabalhos futuros

Pretende-se, com base nos estudos realizados, desenvolver os seguintes trabalhos:

- Uma vez validada a metodologia nos testes realizados em 2ª marcha, pretende-se realizar também medições complementares em 3ª marcha, utilizando parâmetros específicos obtidos em provas de ruído de passagem nesta marcha, tendo em vista que algumas fontes, como o sistema de aspiração, são mais predominantes nestas condições de provas. Pretende-se também analisar o comportamento acústico das fontes na outra lateral do veículo, tanto em 2ª como em 3ª marcha, medindo as duas laterais simultaneamente utilizando duas cadeias de medições independentes;

- A metodologia foi aplicada no sentido de caracterizar e identificar as principais fontes de ruído externo, entretanto, os resultados não fornecem informações sobre os níveis em campo distante. Pretende-se, em função disto, definir um procedimento de cálculo que correlacione os níveis de ruído nestas duas condições diversas, através do qual será possível estimar em campo distante, a partir dos dados obtidos em campo próximo, os níveis de ruído externo global do veículo, ou mesmo os níveis emitidos pelas fontes individualmente.

- Aplicar a metodologia na diagnose de anomalias apresentadas por componentes ou acessórios do motor, ou mesmo identificar no compartimento interno do veículo regiões de maior transparência acústica. Estas diagnoses poderão ser efetuadas, da mesma forma, reproduzindo em rolo dinamométrico as mesmas condições em que foram identificadas as respectivas anomalias em situação de rodagem.

Bibliografia

- [01] **Resolução CONAMA Nº 01, de 11 de fevereiro de 1993** - Ministério do Meio Ambiente e da Amazônia Legal - Conselho Nacional do Meio Ambiente

- [02] **Portaria IBAMA Nº 86, DE 17 de outubro de 1996**

- [03] Norma ABNT - NBR 9714 **Ruído Emitido por Veículos Automotores na Condição Parado** – Método de Ensaio

- [04] **Resolução CONAMA Nº 252, de 07 de janeiro de 1999** - Ministério do Meio Ambiente e da Amazônia Legal - Conselho Nacional do Meio Ambiente

- [05] Norma ABNT - NBR 8433 **Ruído Emitido por Veículos Automotores em Aceleração** – Método de Ensaio

- [06] **Pocket Handbook Noise, Vibration, Light, Thermal Comfort**, Brüel & Kjaer Publication 1986

- [07] **Resolução CONTRAN 448/71 de 17 de Novembro de 1971**

- [08] Fábio Oliveira Freitas **Situação Atual e Perspectivas Futuras para o Controle de Ruído Veicular no Brasil e no Mercosul**, Seminário Ruído veicular no Meio Urbano – Avaliação da Situação Atual e Perspectivas para o Futuro, São Paulo 12 de setembro 2000

- [09] **Diretiva CEE 96/20 e 92/97 do Nível Sonoro Permissível** abril de 1992

- [10] **Resolução CONAMA Nº 272, de 11 de setembro de 2000** - Ministério do Meio Ambiente e da Amazônia Legal - Conselho Nacional do Meio Ambiente

- [11] AVL ACOUSTIC TRAINING Vehicle Noise Sources **Características da Fontes de Ruído Veicular** – Ciclo de Workshops I, Parte 4, Brasil 1996
- [12] CROCKER M. J. **The Use of Existing and Advanced Intensity Techniques to Identify on a Diesel Engine** - SAE paper 810694 – 1981
- [13] BLASER D. A.; FELDMAIER D. A. **Acoustic Intensity Measurements of Noise Emission from Engines**, General Motors Research Laboratories Warren, Michigan 1982
- [14] **Automotive Handbook** 4nd edition Robert Bosch Publication GmbH 1996
- [15] GERGES, Samir N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**, 1nd edition, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil 1992
- [16] Fábio G. Leal **Controle de Ruído em Veículos Comerciais** Seminário Ruído veicular no Meio Urbano – Avaliação da Situação Atual e Perspectivas para o Futuro, São Paulo 12 de setembro 2000
- [17] AVL ACOUSTIC TRAINING Vehicle Noise Sources **Legislação de Ruído Automotivo e Redução de Ruído Externo** – Ciclo de Workshops I, Parte 5, Brasil 1996
- [18] FAHY, Frank J. **Sound Intensity**, 1nd edition, Elsevier Science Publishers Ltd., London 1989
- [19] GERGES, Samir N. Y. **Identificação de Fontes de Ruído por Medição de Intensidade Sonora** – Seminário: Acústica Veicular – AEA - 1994
- [20] MULLER, P. P., Unikeller **The Intensity Technique in Vehicle Acoustics** – Unikeller Conference 1989

- [21] RASMUSSEN and Svend GADE, Brüel & Kjaer ***Tyre Noise Measurements on a Moving Vehicle*** - Application Note, Denmark
- [22] NIGEL TAYLOR, Rover Group, UK; RASMUSSEN, Brüel & Kjaer ***Exterior Noise Measurements on a Rover 220 Gsi*** - Application Note, Denmark
- [23] S. GADE ***Sound Intensity (Theory)***, Technical Review N° 3 Bruel & Kjaer Publication 1982
- [24] ***Sound Intensity***, Brüel & Kjaer Publication 1993
- [25] FAHY, Frank J. ***Sound Intensity and Application*** - I Congresso Iberoamericano de Acústica - I Simpósio de Metrologia e Normalização em Acústica e Vibrações do Mercosul 18º Encontro da SOBRAC – Florianópolis – Brasil 1998
- [26] ***Sound Power Measurements***, Application Note 1230 – Hewlett Packard 1992
- [27] ISO9614-1 ***Acoustics - Determination of Sound Power Levels of Noise Sources Using Sound Intensity - Part I: Measurements at Discrete Points***, 1nd edition 1993
- [28] S. GADE ***Validity of Intensity Measurements***, Technical Review N° 4 Bruel & Kjaer Publication 1985
- [29] ***Sound Intensity Calibrator Type 3541***, Technical Documentation Brüel & Kjaer 1990