

**JOSÉ LINCOLN LOPES CAVALCANTI**

**PROPOSTA DE ANÁLISE DA CONTRIBUIÇÃO DOS  
COMPONENTES DO CONJUNTO PROPULSOR DE UM  
VEÍCULO EM ACELERAÇÃO NO RUÍDO EXTERNO  
GERADO (*PASS-BY NOISE*) – ESTUDO DE CASO COM  
VEÍCULO COMERCIAL LEVE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para  
obtenção do Título de Mestre junto ao  
Mestrado Profissional em Engenharia  
Automotiva.

São Paulo

2005

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**JOSÉ LINCOLN LOPES CAVALCANTI**

**PROPOSTA DE ANÁLISE DA CONTRIBUIÇÃO DOS  
COMPONENTES DO CONJUNTO PROPULSOR DE UM  
VEÍCULO EM ACELERAÇÃO NO RUÍDO EXTERNO  
GERADO (*PASS-BY NOISE*) – ESTUDO DE CASO COM  
VEÍCULO COMERCIAL LEVE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para  
obtenção do Título de Mestre junto ao  
Mestrado Profissional em Engenharia  
Automotiva.

Área de Concentração:  
Engenharia Automotiva.

Orientador:  
Prof. Dr. Sylvio R. Bistafa.

São Paulo

2005

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Cavalcanti, José Lincoln Lopes**

**Proposta de análise da contribuição dos componentes do conjunto propulsor de um veículo em aceleração no ruído externo gerado (*pass-by noise*) – estudo de caso com veículo comercial leve / J.L.L. Cavalcanti. -- São Paulo, 2005.**

**57 p.**

**Trabalho de curso (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.**

**1.Propulsão 2.Veículos comerciais 3.Veículos leves sobre pneus 4.Estudo de caso I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica II.t.**

À Beatriz, minha mulher, pelo apoio e pelo incentivo e por ter “segurado a onda”  
em casa, nas muitas horas em que me dediquei a este mestrado.

Aos nossos filhos Isabel, Matheus e Miguel, com o profundo desejo que possam ir  
mais longe.

À minha mãe, Pilar, por ter me transmitido a herança que não recebeu.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Dr. Sylvio Bistafa, pela orientação, dicas, paciência, bom-humor e companheirismo. Pelo interesse, incomum no meio acadêmico, de mergulhar nos problemas práticos da indústria.

A todos os meus colegas do Laboratório de Ruídos e Vibrações do Campo de Provas da General Motors do Brasil, pela ajuda prestada na elaboração do estudo de caso, em especial, ao Alexandre Nunes, Fernando Ooki, Rodrigo Rosa e Vinicius Castello, que tiveram participação direta neste trabalho.

Aos meus superiores, Mauro Giória e José Fernando Penteado, e aos que os antecederam, Reinaldo Sarquez e Edgar de Luccas, por todo o apoio e o estímulo para que esta pequena obra se concretizasse.

Aos meus colegas, Flávio Garzeri e Henedino Gutierrez, que se dispuseram a participar da minha banca examinadora, enriquecendo este trabalho e muito me honrando.

Ao Diretor da Engenharia de Desenvolvimento e Validação da General Motors do Brasil, Luciano Santos, pela oportunidade de dar mais este passo. Mais uma vez, muito obrigado !

## RESUMO

O presente trabalho revisa os métodos empregados atualmente pela indústria automobilística no desenvolvimento do ruído externo gerado por veículos, segundo o procedimento de teste descrito pela norma ISO 362 – Ruído gerado por veículos automotores em aceleração (*pass-by noise* – PBN). Nesta revisão contrasta-se os métodos convencionais, que partem da medição com o próprio protótipo ou veículo funcional, com os métodos propostos por publicações mais recentes, que fazem uso da simulação a partir de dados experimentais. É dada ênfase nesta segunda categoria de métodos, pela possibilidade de predição do valor de ruído do veículo a partir de dados de ruído dos componentes do seu sistema propulsor. É apresentada uma proposta de método a ser seguido para a predição do nível global de *pass-by noise* (PBN) do veículo a partir dos valores de potência sonora de seus componentes, bem como um estudo de caso com um veículo comercial leve utilizando o método proposto. Finalmente, é apresentada uma análise crítica dos resultados e são apresentadas as sugestões para a melhoria do método.

## **ABSTRACT**

This paper revises the methods currently used by the automotive industry for developing the pass-by noise (PBN) according to the ISO 362 test procedure. In this revision, conventional methods based on measurements performed with functional prototypes or vehicles are compared with methods proposed by more recent publications, which use experimental simulation. This second methodology, which enables the prediction of the vehicle pass-by noise from noise radiation data from its powertrain components, is emphasized. A method using the radiated noise power from powertrain subsystems to predict the pass-by noise (PBN) is proposed and a case study using this method with a mid size pick up is presented. Finally, a critical analysis of the experimental data is carried out and improvements for the method are proposed.

# SUMÁRIO

LISTA DE QUADROS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE SIMBOLOS

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	MÉTODOS CORRENTES DE DESENVOLVIMENTO DO PASS-BY NOISE (PBN) - LIMITAÇÕES.....	6
2.1	Análise do espectro de frequência .....	8
2.2	Método do encapsulamento. ....	9
2.3	Método da intensidade sonora .....	14
2.4	Estado da arte.....	15
2.4.1	Medição de pressão sonora junto às fontes de ruído do veículo.....	15
2.4.2	Método da quantificação das fontes de ruído por via aérea.....	18
3	DESCRIÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO.....	21
3.1	Determinação da potência sonora emitida pelos componentes do conjunto propulsor.....	22
3.2	Determinação da atenuação do ruído entre os componentes do conjunto propulsor e o microfone de ensaio de PBN.....	24
4	ESTUDO DE CASO – VEÍCULO COMERCIAL LEVE COM SIMULAÇÃO PARA UMA SUB-ÁREA COM POTÊNCIA SONORA CONHECIDA.....	27
4.1	Veículo e equipamentos de medição utilizados.....	28
4.2	Levantamento das funções de transferência entre o monopolo e as sub-áreas do veículo para 5 posições na pista de PBN.....	30
4.3	Determinação da potência sonora da caixa acústica .....	33
4.4	Cálculo da pressão sonora produzida pela caixa acústica no microfone de PBN.....	34
4.5	Resultados.....	15
5	ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS E DO MÉTODO ADOTADO.....	42
5.1	Dispersão do campo sonoro do monopolo .....	44
5.2	Repetibilidade das FRFs medidas.....	15

5.3 Dimensão do monopolo.....	46
5.4 Efeito da câmara semi-aneecóica na calibração do monopolo.....	48
5.5 Efeito da emissão de ruído por mais de uma face da caixa acústica.....	50
6 CONCLUSÕES.....	52
7 BIBLIOGRAFIA .....	56

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1.1. Limites legais de pass by noise para Europa e Brasil (veículos de passageiros com motor ciclo Otto, veículos comerciais leves com motor Diesel de injeção direta .....	3
--	---

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Diferença entre o NPS a 1 m do motor e o pass-by noise de acordo com o tipo de veículo.....	4
Figura 2.1 - O ensaio de PBN segundo a norma ISO 362. ....	7
Figura 2.2 - Espectro em bandas de 1/3 oitava do PBN com destaque do pico devido ao ruído emitido pela ponteira do escapamento e do ruído de banda larga emitido pela vibração do bloco do motor.....	9
Figura 2.3 –Encapsulamento do motor e adição de segundo filtro de ar.....	10
Figura 2.4 – Encapsulamento do carter do motor e do tubo primário do escapamento. ....	11
Figura 2.5 – Encapsulamento do carter do motor e do acionamento dos acessórios. ....	11
Figura 2.6 – Adição de segundo silencioso instalado na caçamba do veículo para eliminar o ruído da ponteira do escapamento.....	12
Figura 2.7 – Encapsulamento do eixo cardan, eixo traseiro, silencioso traseiro e tubo de escape.....	12
Figura 2.8 – Roda recoberta. ....	13
Figura 2.9 – Curvas de PBN levantadas com utilização de telemetria para as condições de veículo encapsulado versus veículo encapsulado com o carter do motor exposto, indicando a contribuição correta do carter do motor $\Delta B1$ e a contribuição incorreta $\Delta B2$ .....	14
Figura 2.10 – Medição de pressão sonora em câmara semi-aneecóica, no campo próximo das sub-áreas associadas às fontes de ruído do conjunto propulsor.....	16
Figura 2.11 – Medição das funções de transferência entre fontes de ruído e ponto de medição do PBN.....	17
Figura 2.12 – Medição das FRFs entre fontes de ruído e ponto de medição do PBN	19
Figura 3.1 – Determinação da potência sonora das sub-áreas do conjunto propulsor, a partir de medições de intensidade sonora do campo próximo.....	23
Figura 3.2 – Determinação da potência sonora das sub-áreas do conjunto propulsor em função da posição do veículo na pista.....	24
Figura 3.3 – FRFs entre a pressão sonora nas sub-áreas do conjunto propulsor e a potência sonora do monopolo.....	25

Figura 3.4 – Pressões parciais de cada sub-área do conjunto propulsor.....	26
Figura 4.1 – Posição do veículo testado na câmara semi-aneecóica.....	29
Figura 4.2 – Disposição dos microfones que simularam as diferentes posições do veículo no teste de PBN. ....	29
Figura 4.3 – Posicionamento do monopolo nas posições do microfone do PBN para medições das FRFs na câmara semi-aneecóica.....	30
Figura 4.4 – Coerência na medição da FRF entre microfone instalado próximo à caixa acústica, no cofre do motor, e o microfone de PBN na posição + 6 m. ....	31
Figura 4.5 – Posicionamento do microfone utilizado na medição da FRF entre monopolo e banco do motorista.....	32
Figura 4.6 - Posicionamento do microfone utilizado na medição da FRF entre monopolo e banco traseiro.....	32
Figura 4.7 - Posicionamento do microfone utilizado na medição da FRF entre monopolo e ponteira do escapamento.....	33
Figura 4.8 – Medição de intensidade sonora da caixa acústica utilizada como sub- área irradiante dentro do cofre do veículo.....	34
Figura 4.9 – FRFs do cofre do motor para cinco posições da pista de PBN.....	35
Figura 4.10 - FRFs da ventoinha do radiador para cinco posições da pista de PBN.....	36
Figura 4.11 - FRFs do banco do motorista para cinco posições da pista de PBN.....	36
Figura 4.12 - FRFs do banco traseiro para cinco posições da pista de PBN.....	37
Figura 4.13 - FRFs da ponteira do escapamento para cinco posições da pista de PBN .....	37
Figura 4.14 - FRFs de várias sub-áreas numa posição fixa da pista de PBN – efeito da oclusão da sub-área pela carroceria.....	38
Figura 4.15 - FRFs do cofre do motor ao longo da pista de PBN – banda de 1/3 oitava de 250 Hz.....	39
Figura 4.16 - FRFs do cofre do motor ao longo da pista de PBN – banda de 1/3 oitava de 1.250 Hz.....	39
Figura 4.17 - FRFs do cofre do motor ao longo da pista de PBN – banda de 1/3 oitava de 6.300 Hz.....	40

Figura 4.18 – NPS em bandas de 1/3 oitava medidos, comparativamente com aqueles obtidos reciprocamente. Caixa acústica instalada no cofre do motor. Posição na pista de PBN – 6 m. ....	40
Figura 4.19 - NPS em bandas de 1/3 oitava medidos, comparativamente com aqueles obtidos reciprocamente. Caixa acústica instalada no cofre do motor. Posição na pista de PBN – 3 m. ....	41
Figura 4.20 - NPS em bandas de 1/3 oitava medidos, comparativamente com aqueles obtidos reciprocamente. Caixa acústica instalada no cofre do motor. Posição na pista de PBN 0 m. ....	41
Figura 4.21 - NPS em bandas de 1/3 oitava medidos, comparativamente com aqueles obtidos reciprocamente. Caixa acústica instalada no cofre do motor. Posição na pista de PBN + 3 m. ....	42
Figura 4.22 - NPS em bandas de 1/3 oitava medidos, comparativamente com aqueles obtidos reciprocamente. Caixa acústica instalada no cofre do motor. Posição na pista de PBN + 6 m. ....	42
Figura 5.1 – Dispersão de 6 medições do NPS a 1 m do monopolo, utilizadas como referência nas medições das FRFs. ....	44
Figura 5.2 – Dispersão no NPS medido a 1 m do monopolo em diferentes posições	45
Figura 5.3 – FRFs entre 5 sub-áreas do veículo e o monopolo, medidas em duplicata para a posição de PBN de + 3 m. ....	46
Figura 5.4 – Monopolo construído a partir de um driver de compressão, que pode ser construído suficientemente pequeno a fim de que possa ser considerado como fonte pontual em médias e altas frequências. ....	47
Figura 5.5 – Índice de diretividade de uma fonte pontual. ....	48
Figura 5.6 – Tentativa de eliminação da reflexão no piso da câmara semi-anecóica com materiais fonoabsorventes (colchões e manta de feltro fenólico). ....	49
Figura 5.7 – Efeito do piso reflexivo sob o monopolo, indicando que a influência da adição de material de absorção foi menor do que a dispersão encontrada. ....	50
Figura 5.8 – Intensidade sonora nas faces da caixa acústica, indicando a alta participação das faces encapsuladas nas baixas frequências. ....	51

## **1 - INTRODUÇÃO**

## 1 – INTRODUÇÃO

O ruído urbano vem se tornando um grave problema em muitas cidades industrializadas. Entre outros efeitos como irritação, desconforto e dificuldade para concentração, o ruído causa reações de *stress* no sistema cardiovascular, como alterações da pressão arterial, do batimento cardíaco e contração dos vasos sanguíneos periféricos mesmo após curtas exposições a níveis da ordem de 60 dB(A) (GOTTLOB, 1996). Apesar do progresso já alcançado, o ruído veicular contribui significativamente para a poluição sonora dos centros urbanos devido à crescente densidade do tráfego. A redução do ruído do tráfego, sem restrição da mobilidade, só é possível, portanto, através de uma maior redução do nível de ruído veicular. Conseqüentemente, as legislações que limitam o ruído emitido pelos veículos automotores vêm impondo restrições cada vez maiores aos fabricantes de veículos. O Quadro 1.1 apresenta as reduções dos limites de ruído emitido por veículos de passageiros e de carga em aceleração (*pass-by noise* - PBN), na última década, para os mercados brasileiro e europeu, cujo modelo, tanto no que se refere à norma de ensaio, quanto ao que se refere aos limites de ruído emitido, vêm sendo seguido pelo Brasil (observada uma defasagem de aproximadamente dez anos para a implementação dos limites).

Quadro 1.1: Limites legais de PBN para Europa e Brasil (veículos de passageiros com motor ciclo Otto, veículos comerciais leves com motor ciclo Diesel injeção direta)

	Veículos Passageiros	Veículos Comerciais (PBT)		
		< 3,5 t	> 3,5 t	
			< 150 kW	> 150 kW
ECE até 1996 Brasil até 2005	77	80	83	84
ECE a partir de 1997 Brasil a partir de 2006	74	78	78	80

Veículos de passageiros tiveram seu limite de ruído emitido em aceleração reduzido em 3 dB(A) e veículos de carga tiveram reduções de até 5 dB(A). Estas reduções dos limites de ruído traduzem-se em grandes dificuldades técnicas a serem superadas pelos fabricantes de veículos, haja vista que uma redução de 3 dB(A) significa 50% de redução na potência sonora emitida.

Tipicamente, a avaliação do PBN é feita muito tardiamente no ciclo de desenvolvimento do veículo, quando qualquer alteração demanda altos custos. Altamente desejável, portanto, seria uma maneira pela qual os fabricantes pudessem prever com razoável aproximação o nível global do PBN de um veículo a partir das informações sobre a emissão de ruído dos vários componentes e sistemas que integram este veículo e da atenuação provocada pela carroceria na transmissão do ruído gerado.

Brandl (1992) apresentou uma relação empírica, dependente do tipo de veículo, dada pela diferença entre o nível de pressão sonora medida a 1 m do motor, em câmara semi-anecóica, na condição de potência máxima e o PBN global do veículo equipado com este motor, conforme ilustra a Figura 1.1. Assim, para a atual legislação

européia, vigente desde 1996, e para a futura legislação brasileira, que entrará em vigor a partir de 2006, seria necessário que o ruído a 1m do motor estivesse no intervalo entre 94 a 96 dB(A) para se chegar aos valores de 74dB(A) para veículos de passageiros e 78 dB(A) para pick-ups.

Nas diferenças indicadas na Figura 1.1 está implícita a hipótese de que o motor é a principal fonte de ruído do veículo, o que pode não ser verdade, se os demais componentes e subsistemas do veículo não estiverem no mesmo patamar tecnológico. Como esta relação empírica não possui todos os modelos de veículos comumente comercializados, como, por exemplo, pick-ups médias e grandes, vans, jipes, etc., sua utilização não é viável no desenvolvimento do PBN destes veículos, servindo apenas como uma primeira estimativa da emissão de ruído desejada para os motores.

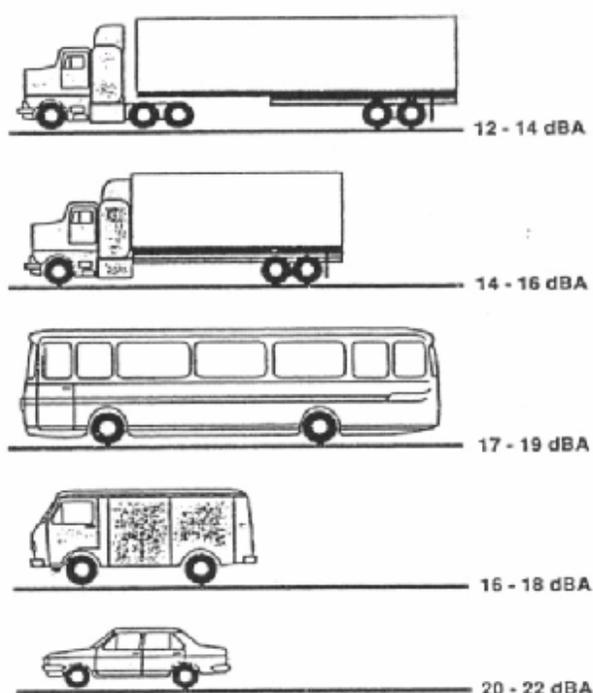


Figura 1.1: Diferença entre o NPS<sup>1</sup> a 1 m do motor e o pass by noise de acordo com o tipo de veículo.

---

<sup>1</sup> Nível de Pressão Sonora.

A principal motivação deste trabalho é a de aperfeiçoar a proposta de Brandl (1992), a fim de prever, com boa aproximação, o PBN do veículo a partir de medições de emissão sonora do conjunto propulsor em bancada, e do levantamento das curvas de atenuação da carroceria do veículo em função da sua posição na pista.

## **2 - MÉTODOS CORRENTES DE DESENVOLVIMENTO DO PBN**

## 2 MÉTODOS CORRENTES DE DESENVOLVIMENTO DO PBN

A norma ISO 362 (1998) estabelece o método de ensaio do PBN, que consiste na medição da pressão sonora emitida pelo veículo, em condição de aceleração, em ambos os lados de uma pista de 20 m de extensão, com microfones distantes 7,5 m da linha de centro da pista, numa altura de 1,2 m acima do solo, conforme Figura 2.1. O veículo deve aproximar-se da linha AA com velocidade constante de 50 km/h ou com rotação do motor constante de 75% da rotação de potência máxima, utilizando aquela que fornecer a menor velocidade. Ao cruzar a linha AA e até atingir a linha BB, deve-se imprimir aceleração máxima (WOT<sup>2</sup>) ao veículo. O valor declarado de PBN é o maior nível de pressão sonora observado neste trecho, entre as linhas AA e BB, independentemente do lado do veículo em que o nível máximo ocorra.

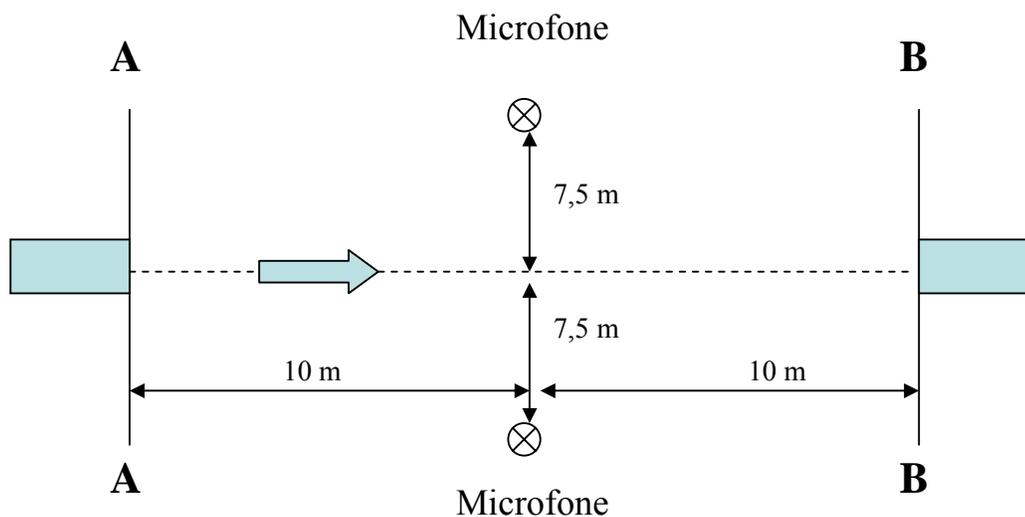


Figura 2.1: O ensaio de PBN segundo a norma ISO 362.

---

<sup>2</sup> Wide Open Throttle.

Durante o desenvolvimento do veículo, tendo em vista o atendimento do limite de PBN, torna-se portanto necessária a hierarquização das fontes de ruído do veículo. Rust; Brandl (1993) afirmaram que em qualquer programa de redução de ruído, quanto menor for o limite a ser alcançado, mais preciso deve ser o conhecimento das contribuições individuais de cada fonte no ruído total do veículo. São apresentadas a seguir as técnicas usualmente empregadas pelas montadoras neste desenvolvimento.

## **2.1 Análise do espectro de frequência**

A simples análise do espectro de frequência em bandas de 1/3 oitava ou até com resoluções maiores, correspondente ao valor máximo do PBN, pode fornecer um indicativo da principal fonte de ruído. Fontes tipicamente fáceis de serem detectadas são aquelas que contribuem em frequências relativamente baixas (o ruído emitido pelo bocal de saída do escapamento, o ruído de passagem das pás do ventilador do sistema de arrefecimento e o ruído de aspiração do filtro de ar), bem como aquelas que contribuem em frequências relativamente altas, como o ruído de passagem das pás do compressor ou turbina do turboalimentador do motor, pois se situam em frequências bem acima daquelas predominantes, em torno de 1kHz. Neste método, pode-se comprovar a participação do componente pela direta aplicação de alguma medida de redução de ruído ou mesmo pela sua simples remoção durante o teste. A Figura 2.2 apresenta o espectro em bandas de 1/3 oitava do PBN com destaque do pico devido ao ruído emitido pela ponteira do escapamento, e do ruído de banda larga emitido pela vibração do bloco do motor.

A limitação do método de simples inspeção do espectro do PBN está na impossibilidade de detecção de fontes com emissão de ruído em banda larga, típico do conjunto propulsor, onde ocorre a superposição de várias fontes e não se pode determinar a contribuição de cada uma. Outra limitação é a alteração do comportamento do veículo, quando da remoção de alguns componentes, para se comprovar sua participação - por exemplo o turboalimentador, cuja remoção implicaria em queda de desempenho. Uma outra dificuldade é que se trata de método

totalmente dependente da experiência do analista, que deverá “selecionar” possíveis fontes correspondentes aos picos de frequência encontrados.

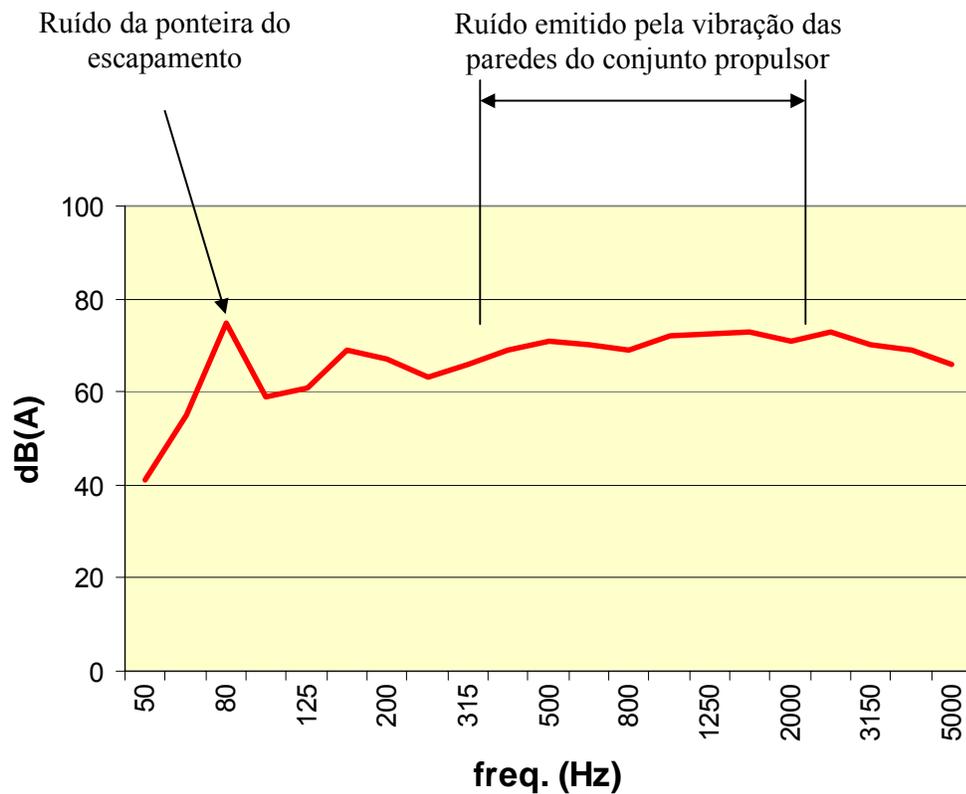


Figura 2.2: Espectro em bandas de 1/3 oitava do PBN com destaque do pico devido ao ruído emitido pela ponteira do escapamento, e do ruído de banda larga emitido pela vibração do bloco do motor.

## 2.2 Método do encapsulamento

Como indica o próprio nome, consiste no encapsulamento e/ou amortecimento das principais superfícies radiantes do veículo, e na sua subsequente remoção, expondo cada uma das fontes isoladamente, para se avaliar a sua contribuição individual. Apesar de largamente utilizado pela indústria automobilística, é bastante trabalhoso, exigindo o encapsulamento de grandes superfícies, como a do motor, com grandes quantidades de materiais de absorção - usualmente feltro fenólico ou espuma de poliuretano - recoberto com material isolante acústico - mantas de chumbo,

usualmente. Após a remoção do tratamento e medição do ruído emitido por uma determinada superfície, deve-se tomar o cuidado para recobri-la da mesma maneira, a fim de que se possa comparar o ruído emitido pelas diversas superfícies sempre numa mesma condição base de encapsulamento. As tomadas fotográficas das Figuras 2.3 a 2.8 ilustram exemplos de encapsulamento e/ou amortecimento de alguns componentes de um veículo comercial leve.



Figura 2.3: Encapsulamento do motor e adição de segundo filtro de ar.



Figura 2.4: Encapsulamento do carter do motor e do tubo primário do escapamento.

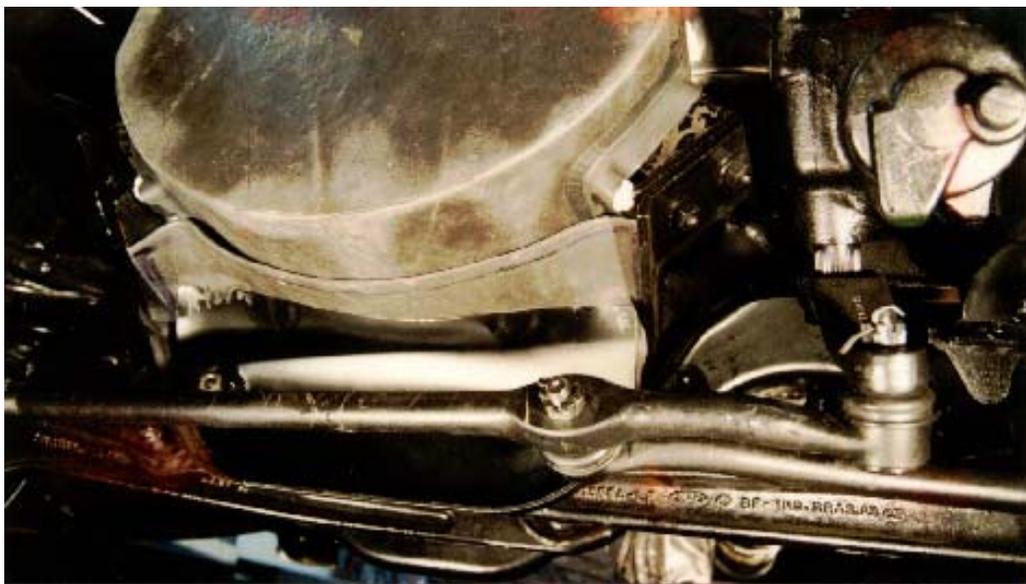


Figura 2.5: Encapsulamento do carter e do acionamento dos acessórios.



Figura 2.6: Adição de segundo silencioso instalado na caçamba para eliminar o ruído de ponteira de escapamento.

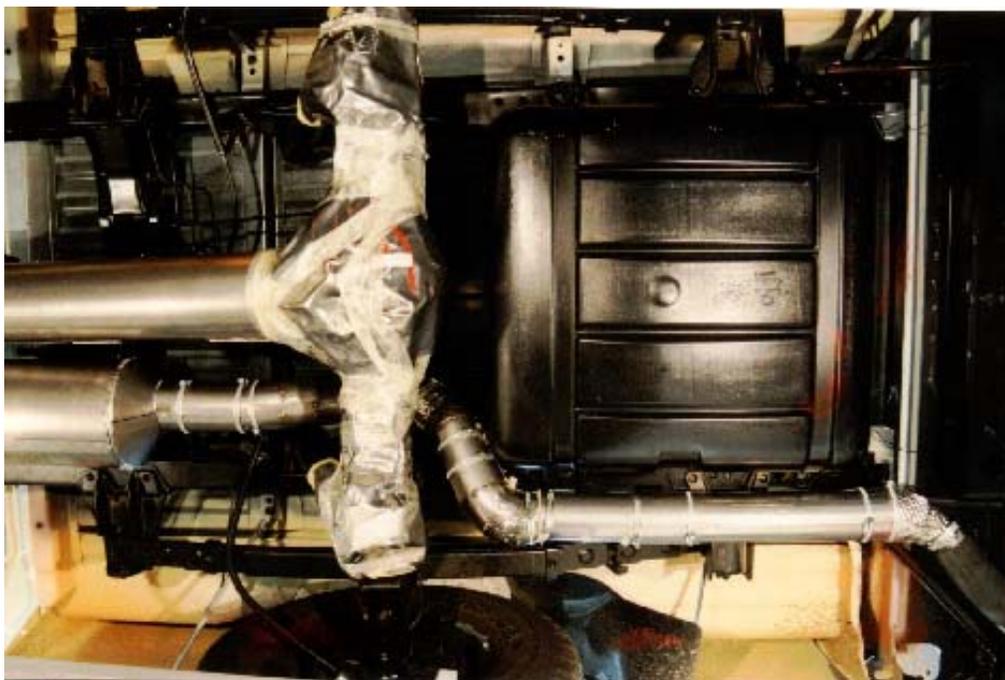


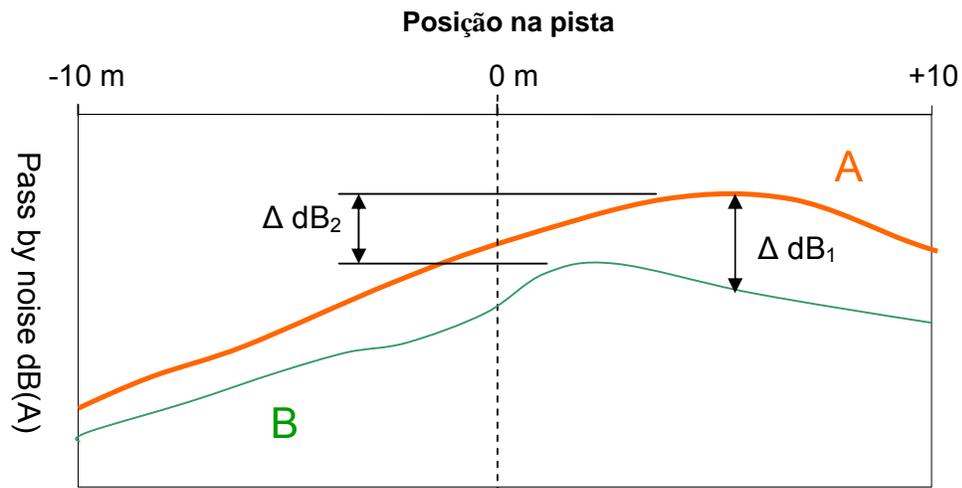
Figura 2.7: Encapsulamento do eixo cardan, eixo traseiro, silencioso traseiro e tubo de escape.



Figura 2.8: Roda recoberta.

Apesar de não ser prática comum, o método de encapsulamento deve ser realizado com apoio de telemetria, para que se possam determinar as posições do veículo em relação à pista onde ocorrem os picos de PBN, referentes a cada superfície exposta, e para que se possa também compará-los com o PBN na condição encapsulado, respeitando-se o mesmo posicionamento do veículo. Isto é necessário porque o veículo encapsulado apresenta em geral pico de PBN em posição de pista distinta daquela referente às superfícies expostas. A Figura 2.9 apresenta um exemplo de determinação da contribuição do carter do motor com telemetria ( $\Delta \text{dB}_1$ ) e sem telemetria ( $\Delta \text{dB}_2$ ). A contribuição do componente é estimada incorretamente quando obtida através dos níveis máximos obtidos em cada teste (sem telemetria).

Uma limitação do método é a interferência inevitável dos grandes volumes de material de encapsulamento utilizado, que absorvem e/ou isolam em parte o ruído emitido pela superfície exposta.



A – Carter do motor exposto    B – Veículo encapsulado  
 $\Delta \text{dB}_1$  – Parcela de ruído devida ao carter do motor  
 $\Delta \text{dB}_2$  – Valor incorreto da parcela de ruído do carter

Figura 2.9: Curvas de PBN levantadas com utilização de telemetria para as condições de veículo encapsulado versus veículo encapsulado com o carter do motor exposto, indicando a contribuição correta do carter do motor  $\Delta \text{dB}_1$  e a contribuição incorreta  $\Delta \text{dB}_2$ .

### 2.3 Método da intensidade sonora<sup>3</sup>

Consiste na medição de intensidade sonora dos principais componentes e subsistemas emissores de ruído na condição de pico do PBN. O produto da intensidade pela área do componente fornece a potência sonora por ele irradiada, o que permite a hierarquização dos diversos componentes e subsistemas segundo a potência sonora. Trata-se de método que requer a utilização de telemetria para se determinar a rotação do motor na condição de pico de PBN, e dinamômetro de chassis, para se medir a intensidade sonora do componente do veículo em regime estacionário, em bancada, nesta condição de pico.

<sup>3</sup> Potência sonora por unidade de área ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

O método, que consiste na procura de componentes ou superfícies emissoras de ruído que irradiem alta potência sonora nas bandas de 1/3 oitava predominantes no espectro do PBN, tendo que não considera a atenuação sofrida pelo ruído entre a fonte e o microfone de PBN. Não fornece, portanto, informações sobre a importância que deve ser atribuída a cada componente ou superfície emissora na composição do PBN.

## **2.4 Estado da arte**

Publicações mais recentes apresentam métodos que utilizam a medição direta ou indireta de pressão sonora próxima às fontes geradoras de ruído em conjunto com as funções de transferência destes pontos de medição em relação à posição do microfone no teste de PBN. Estes métodos, que utilizam conceitos simples, tornaram-se viáveis com a popularização dos aparelhos de medição de ruído com múltiplos canais. São apresentados abaixo dois métodos propostos, que, porém, não são ainda utilizados pela indústria automobilística brasileira.

### **2.4.1 Medição de pressão sonora junto às fontes de ruído do veículo**

Pflueger; Bodlund (2001) utilizam medições de pressão sonora no campo próximo de sub-áreas associadas às fontes de ruído. Estes autores sugerem que as medições sejam feitas em câmara semi-anecóica, com o conjunto propulsor instalado em dinamômetro de bancada. São realizadas medidas de pressão sonora para cada uma das sub-áreas, em função da rotação do motor (Fig. 2.10). O cálculo do PBN total do veículo considera as sub-áreas como monopolos<sup>4</sup> mutuamente independentes.

---

<sup>4</sup> Um monopolo é uma fonte sonora pontual e omnidirecional, que irradia ondas esféricas com simetria esférica.

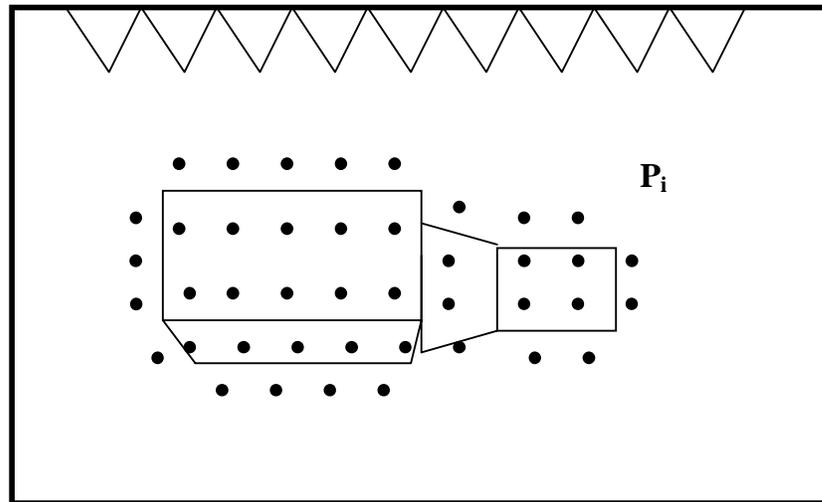


Figura 2.10 – Medição de pressão sonora em câmara semi-aneecóica, no campo próximo das sub-áreas associadas às fontes de ruído do conjunto propulsor.

Paralelamente, para cada um destes monopolos é determinada a função de resposta em frequência (frequency response function – FRF), também chamada de função de transferência, obtida de maneira inversa, pelo Princípio da Reciprocidade, isto é, coloca-se um alto-falante na posição do microfone do teste de PBN, com um microfone de referência junto ao alto-falante, e outro microfone próximo às sub-áreas (Fig. 2.11). A FRF  $H_i$  para cada monopolo  $i$  é calculada pela relação das duas pressões sonoras medidas:

$$H_i = \frac{P_r}{P_f} \quad , \quad (2.1)$$

onde  $p_f$  é a pressão sonora junto ao alto-falante e  $p_r$  é a pressão sonora produzida junto à sub-área  $i$ .

Uma vez obtidos os diversos  $H_i$  para cada monopolo ao longo das várias posições da pista de PBN, é possível determinar-se a curva de FRF de cada um dos monopolos ao

longo da pista. Esta medição deve ser realizada com o veículo nas condições de aplicação do powertrain, isto é, com todos os componentes instalados que possam servir como barreira acústica ou como absorvedores ou refletores sonoros.

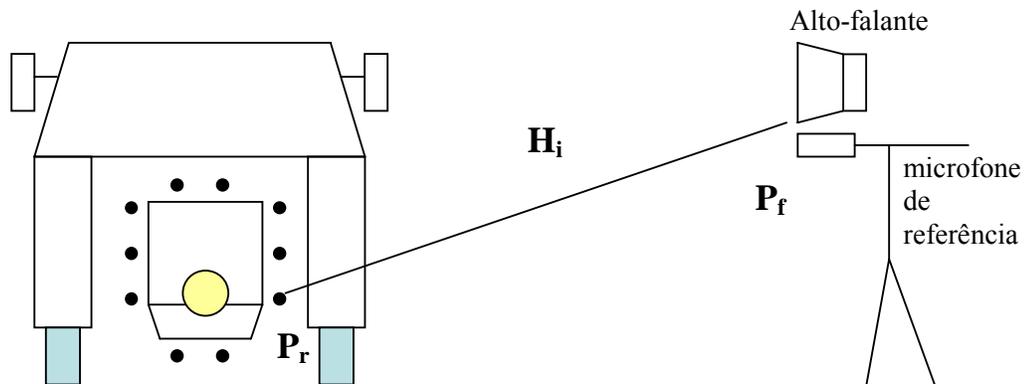


Figura 2.11 – Medição das funções de transferência entre fontes de ruído e ponto de medição do PBN.

O procedimento de estimativa do PBN consiste na ponderação do ruído emitido por cada monopolo pela sua respectiva FRF, seguida da soma algébrica de cada uma destas parcelas (Eq. 2.2).

$$PBN_{Estimado} = \sum P_i \cdot H_i \quad (\text{N/m}^2) \quad (2.2)$$

Pflueger; Bodlund (2001) não mencionaram qual deve ser o tamanho das sub-áreas, já que a subdivisão do conjunto propulsor num maior número de sub-áreas implicaria num aumento irreal do ruído emitido simulado.

### 2.4.2 Método da quantificação das fontes de ruído por via aérea - ASQ (Airborne Source Quantification)

Fleszar *et al.* (2001) utilizaram o método de ASQ, que tem por base o fato de que qualquer sistema de transmissão acústica pode ser descrito por um modelo fonte-meio-receptor. A fonte “f” é qualquer componente que emita ruído por via aérea e é quantificado em termos de *velocidade de volume*  $Q_f$  (m<sup>3</sup>/s) de um monopolo equivalente. Para aplicar ASQ na modelagem do ruído externo, a trajetória do ruído é considerada como sendo exclusivamente por via aérea ou via aérea-estrutural-aérea e a respectiva FRF,  $H_{fr}$ , é quantificada em termos de pressão sonora sobre velocidade de volume:

$$H_{fr} = \frac{P_r}{Q_f} \quad (\text{Ns/m}^5) \quad (2.3)$$

A pressão sonora total em qualquer receptor r (interno ou externo) pode ser descrita pela soma das pressões parciais individuais  $P_f$ . A pressão parcial é definida como a pressão sonora que existiria num receptor em particular se somente a fonte em questão estivesse ativa. Matematicamente ela é definida como a velocidade de volume  $Q_f$  multiplicada pela função de transferência acústica  $H_{fr}$  entre fonte e receptor.

Para um sistema complexo como o conjunto propulsor, o sistema é subdividido em pequenas superfícies de mesma área, para as quais se associam fontes pontuais. Se cada uma destas fontes pontuais for assumida como sendo independente das demais, a pressão total num receptor, devido a estas fontes pode ser reformulada usando-se uma abordagem de energia:

$$P_r^2 = \sum H_{fr}^2 \cdot Q_r^2 \quad (\text{N}^2 / \text{m}^4) \quad (2.4)$$

Para se estimar o PBN basta utilizar as FRF  $H_{fr}$  de cada sub-área em relação à posição do microfone do teste de PBN, conforme descrito na seção 2.4.1. Adicionalmente, deve-se determinar a velocidade de volume de cada sub-área, a qual pode ser calculada a partir da velocidade normal de cada uma das sub-áreas, ou determinada invertendo a Equação 2.4 - no chamado *Método do inverso da pressão*. Este método é também baseado no conceito de um sistema fonte-meio-receptor, porém que para determinação das velocidades de volume utiliza-se uma formulação inversa. Isto é, dadas as pressões sonoras num conjunto de “indicadores” (receptores) e as funções de transferência acústicas, as velocidades de volume desconhecidas podem ser calculadas invertendo-se a matriz de funções de transferência e multiplicando-a pelas pressões sonoras conhecidas, medidas nos indicadores.

$$\{Q_p^2\} = [H_{fr}^2]^{-1} \cdot \{P_i^2\} \quad (2.5)$$

Note-se que neste cálculo deve-se determinar todos os elementos da matriz das FRFs entre os indicadores e as sub-áreas, isto é, para cada posição do monopolo, deve-se determinar todas as FRFs entre o monopolo e as sub-áreas (Fig. 2.12).

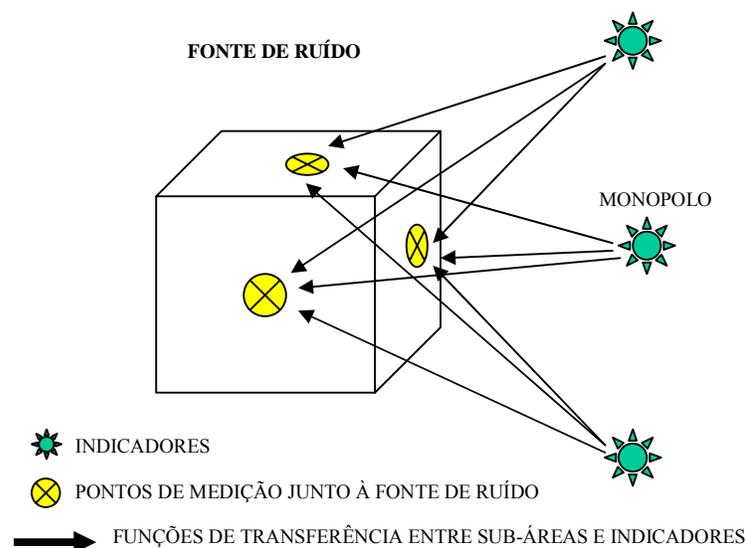


Figura 2.12 – Medição das funções de transferência entre fontes de ruído e ponto de medição do PBN.

Finalmente, deve-se determinar as pressões sonoras nos indicadores com o veículo em funcionamento num dinamômetro de chassis, simulando-se a aceleração obtida durante o teste de PBN. Como as velocidades de volume são independentes das condições de contorno, a sua determinação pode ser feita no veículo, nas condições de uso, ou separadamente com o conjunto propulsor num dinamômetro de bancada. A dificuldade deste método reside na necessidade de uma fonte pontual (monopolo) com velocidade de volume conhecida.

### **3 - DESCRIÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO**

### 3 DESCRIÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Apresenta-se a seguir uma proposta de método de estimativa do PBN, que consiste na utilização de dados experimentais obtidos por medições já utilizadas pela indústria automobilística – pressão sonora, intensidade sonora e função de transferência. O método contempla também a utilização de cálculo que expresse a posição do veículo na pista de PBN em função da rotação do motor (programas ou rotinas de cálculo de desempenho do veículo).

Esta proposta recomenda um trabalho em parceria montadora/fornecedores, segundo suas especializações e recursos, o que sempre é altamente desejável do ponto de vista de rapidez na obtenção de resultados e no sentido de obter-se um compromisso entre os agentes envolvidos no desenvolvimento do PBN.

#### **3.1 Determinação da potência sonora emitida pelos componentes do conjunto propulsor.**

Atividade a ser realizada pelos fornecedores do conjunto propulsor, preferencialmente pelo fornecedor de motores, pela facilidade – dinamômetro – já existente em suas instalações.

A potência sonora deve idealmente ser determinada pela medição da intensidade sonora em campo próximo, usualmente numa distância de aproximadamente 50 mm das superfícies radiantes. Conforme a Figura 3.1, os subsistemas são subdivididos em pequenas sub-áreas (retalhos) da ordem de 100 mm x 100 mm a 300 mm x 300 mm, observando-se o compromisso entre tempo (custo) e resolução para identificação de fontes mais significativas. Conforme ilustra a Figura 3.1, a potência sonora de uma subárea  $i$  ( $PS_i$ ) é determinada pela multiplicação da intensidade sonora ( $IS_i$ ) pela respectiva área ( $SA_i$ ).

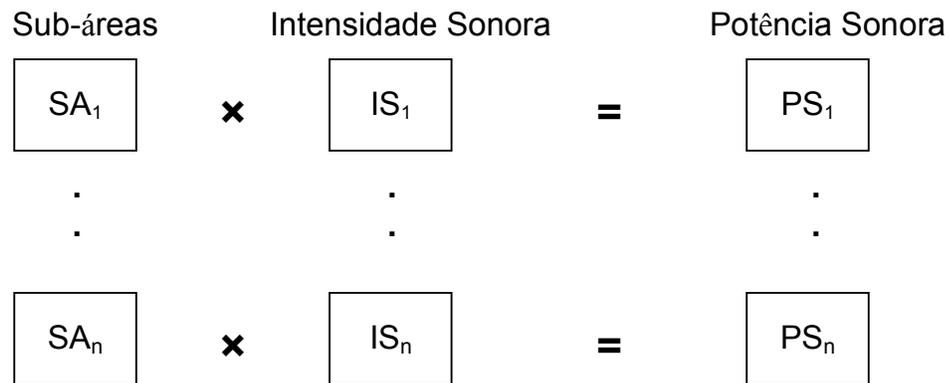


Figura 3.1: Determinação da potência sonora das subáreas do conjunto propulsor, a partir de medições de intensidade sonora no campo próximo.

O mapeamento da intensidade sonora irradiada pelo conjunto propulsor deve ser realizada em bancada, para várias rotações do motor, na faixa de velocidades determinadas pela ISO 362 - aproximadamente de  $\frac{3}{4}$  da rotação de potência máxima até a rotação de corte<sup>5</sup>. Este ensaio em bancada deve ser realizado na condição WOT e deve cobrir as marchas especificadas pela norma ISO 362 – na maioria dos casos, 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> marchas.

Conforme indica o fluxograma da Figura 3.2, com estes resultados e com as curvas de desempenho do veículo (determinadas pela potência do motor, eficiência da transmissão e perdas de potência por atrito do vento e de rolagem), pode-se levantar as curvas de potência sonora irradiada por cada sub-área em função da velocidade do veículo ou em função da sua posição na pista.

<sup>5</sup> Rotação na qual o módulo eletrônico de controle do motor interrompe a ignição ou a alimentação de combustível ao motor. Rotação máxima que se atinge com um motor em bancada, na condição sem carga.

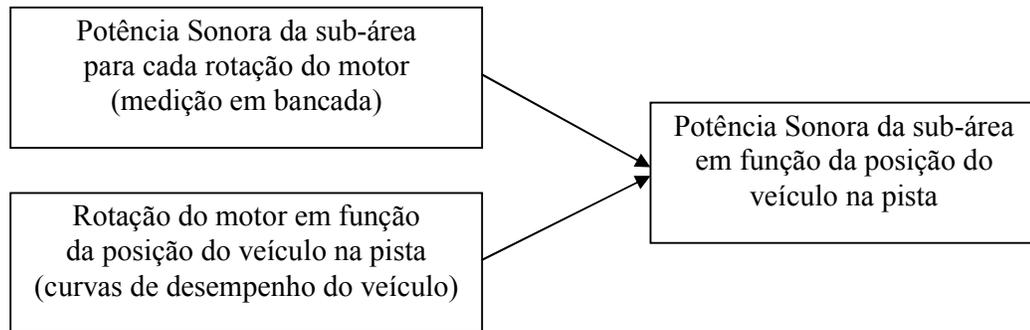


Figura 3.2: Determinação da potência sonora das subáreas do conjunto propulsor em função da posição do veículo na pista.

### 3.2 Determinação da atenuação do ruído entre os componentes do conjunto propulsor e o microfone do ensaio de PBN

Atividade a ser realizada pela montadora, que deverá gerar as *curvas de atenuação* para o ruído que se propaga do conjunto propulsor até o microfone de PBN. Estas curvas poderão ser geradas de duas maneiras :

1 - A partir de um veículo já existente, no caso de projetos envolvendo mudanças não significativas na carroceria (*face lift*) ou mudanças do conjunto propulsor.

2 - A partir de um veículo similar, no caso de projetos envolvendo veículo totalmente novo. Neste caso, é necessário uma verificação e refinamento quando se dispuser dos primeiros protótipos representativos do projeto, não sendo necessário protótipo confeccionado com ferramental definitivo. Deve-se no entanto observar que a utilização crescente desta metodologia permitirá a verificação da influência de pequenas variações de estilo de carroceria e layout do conjunto propulsor nas curvas de atenuação de ruído.

Em ambas as situações, e conforme indica a Figura 3.3, deve-se determinar a FRF ( $H_i$ ) entre a potência sonora emitida por uma fonte sonora do tipo monopolo ( $PS_m$ ), situada na posição do microfone do ensaio do PBN, e a pressão sonora ( $p_i$ ), produzida por esta fonte, medida no campo próximo das sub-áreas do conjunto propulsor:

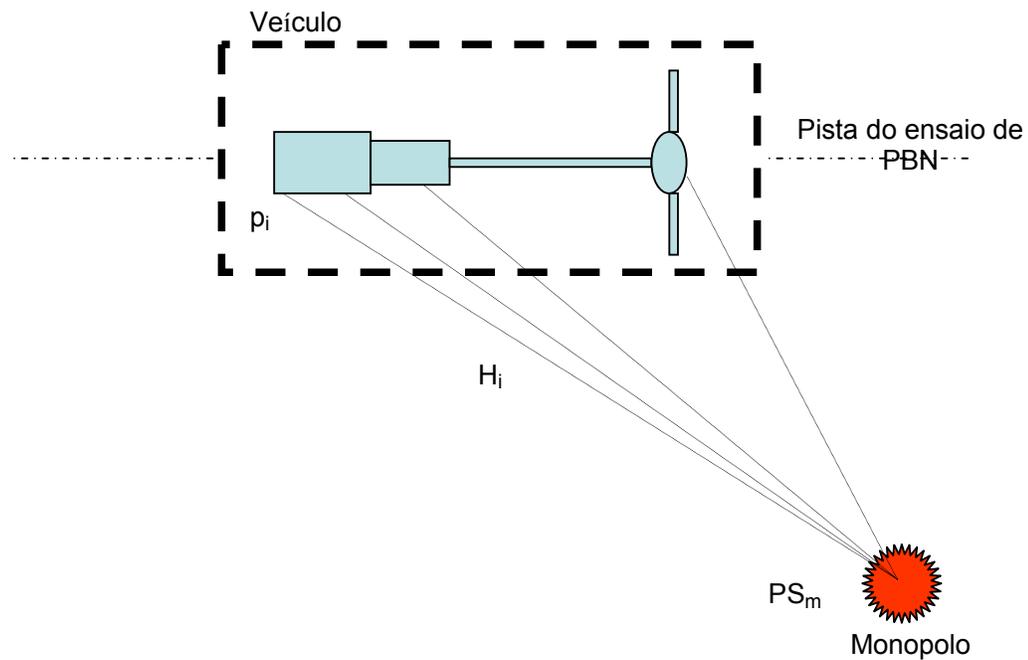


Figura 3.3 Funções de transferência entre a pressão sonora nas sub-áreas do conjunto propulsor e a potência sonora do monopolo.

$$H_i = \frac{P_i}{PS_m} \quad (3.1)$$

Pelo *princípio da reciprocidade*, apresentado em detalhes por Lord Rayleigh (1896) no “Theory of sound”: *“a pressão sonora em um fluido no ponto A, produzida por um monopolo em um ponto B, é igual à pressão sonora no ponto B, produzida pelo monopolo no ponto A, mesmo na presença de obstáculos (dinamicamente lineares) entre os pontos A e B”*. Se considerarmos as sub-áreas como monopolos independentes (não correlacionados), o que é uma boa aproximação em conjuntos propulsores em médias e altas frequências, de acordo com Fleszar *et al.* (2001), podemos utilizar as FRFs determinadas experimentalmente de uma maneira inversa, determinando-se as pressões sonoras na posição do microfone do PBN ( $p_{pbi}$ ), geradas pela potência sonora emitida por cada uma das sub-áreas radiantes do conjunto propulsor ( $PS_i$ ) (Fig. 3.4; Eq. 3.2).

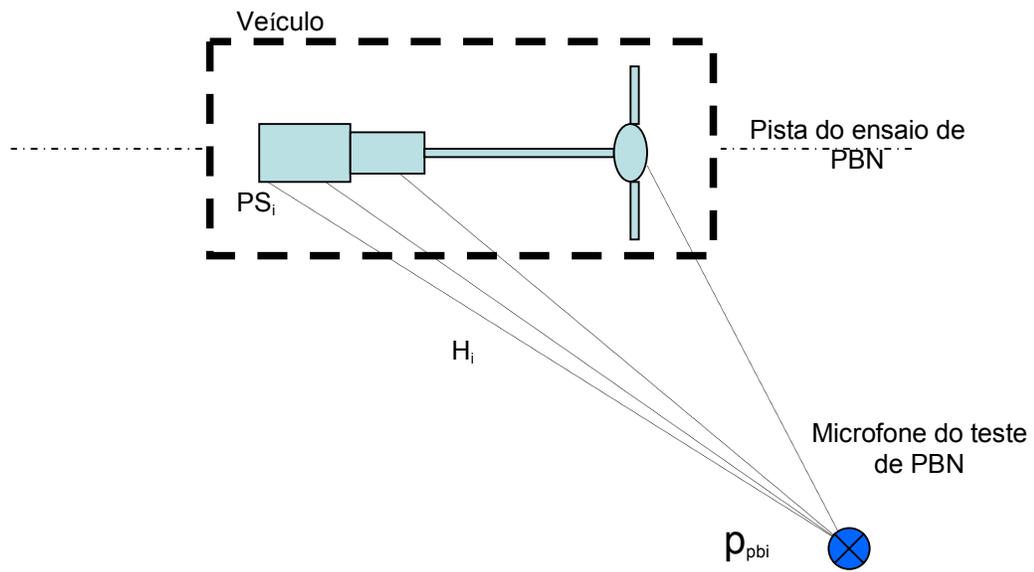


Figura 3.4: Pressões parciais de cada sub-área do conjunto propulsor.

$$P_{pi} = H_i \cdot PS_i \quad (3.2)$$

O somatório em energia das pressões sonoras parciais de cada subárea fornece a pressão sonora total,  $p_t$ , na posição do microfone do PBN, referente àquela posição do veículo:

$$P_t = \left( \sum (p_{pbi})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

Repetindo-se este procedimento para as várias posições do veículo na pista, é possível levantar a curva da pressão sonora gerada pelo veículo no microfone do PBN.

**4 - ESTUDO DE CASO – VEÍCULO COMERCIAL LEVE COM  
SIMULAÇÃO PARA UMA SUB-ÁREA COM POTÊNCIA  
SONORA CONHECIDA**

#### **4 ESTUDO DE CASO – VEÍCULO COMERCIAL LEVE COM SIMULAÇÃO PARA UMA SUB-ÁREA COM POTÊNCIA SONORA CONHECIDA**

O objetivo deste estudo de caso foi o de levantar as diferenças entre funções de transferência de sub-áreas distintas e verificar a validade do método para uma subárea com potência sonora conhecida – um alto-falante instalado no cofre do motor. Esta verificação consistiu na comparação entre o nível de pressão sonora produzido pelo alto-falante, medido na posição do microfone do PBN, com o nível de pressão sonora na mesma posição obtida pelo método descrito no Capítulo 3.

##### **4.1 Veículo e equipamentos de medição utilizados**

Foi utilizada uma pick up S10 turbodiesel 4x4, cabine dupla, modelo 2005, que permaneceu desligada e estacionada junto a uma das paredes da câmara semi-aneecóica, para viabilizar a distância de 7,5 m entre o microfone e a linha central do veículo, prescrita pela ISO 362. A foto da Figura 4.1 mostra a posição do veículo testado.

Já que o veículo permaneceu estacionado durante todo o teste, foram dispostos 5 microfones ao longo de uma linha paralela ao eixo do veículo, a 7,5 m deste, nas posições - 6 m, - 3 m, 0, + 3 m e + 6 m, para simular as condições de teste na pista de PBN. A foto da figura 4.2 mostra a disposição dos microfones que simularam as posições dos microfones no teste de PBN.

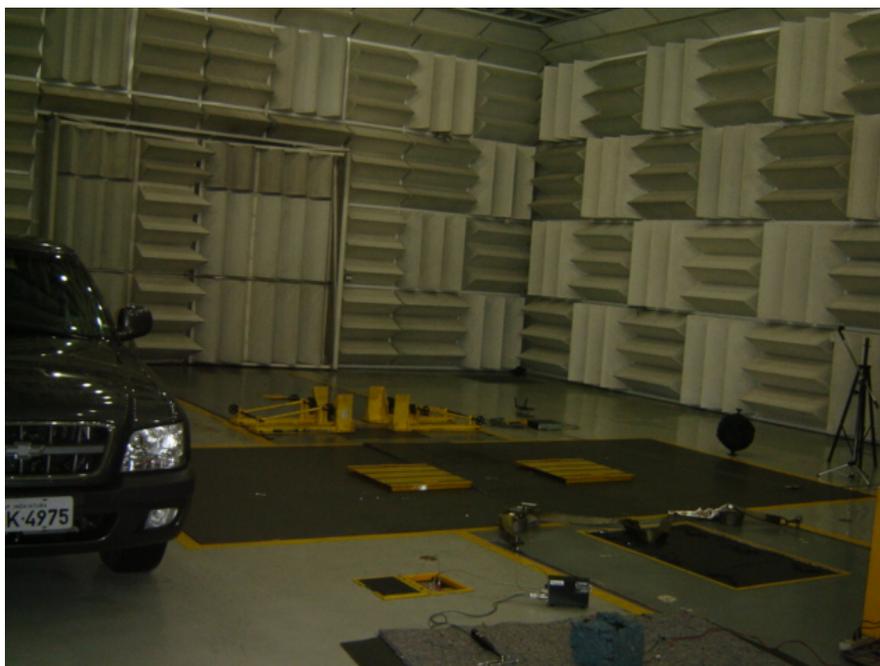


Figura 4.1: Posição do veículo testado na câmara semi-aneecóica.



Figura 4.2: Disposição dos microfones que simularam as diferentes posições do veículo no teste de PBN.

Nas medições acústicas foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Calibrador acústico BK 4231
- Sistema de aquisição LMS (CADA X - Fast Fourier Transform)
- Microfones BK 4189
- Fonte para microfones BK 5966
- Sonda de intensidade sonora BK 3545
- Par de microfones para intensidade sonora BK 4183
- Calibrador de intensidade sonora BK 3541
- Caixa acústica com 1 alto-falante, encapsulada em todas as faces exceto a face da tela com feltro fenólico e manta de borracha
- Fonte sonora dodecaédrica omnidirecional com 12 alto-falantes

#### 4.2 Levantamento das FRFs entre o monopolo e as sub-áreas do veículo para 5 posições na pista de PBN

As FRFs entre as sub-áreas e para cada posição de microfone de PBN foram levantadas de maneira inversa, colocando-se o monopolo nas posições dos microfones de PBN e medindo-se a pressão sonora no campo próximo das sub-áreas. O esquema da Figura 4.3 ilustra o posicionamento do monopolo nas posições dos microfones no teste de PBN, indicadas com as distâncias de -6, -3, 0, +3 e +6 m e com o microfone posicionado numa das sub-áreas, dentro do cofre do veículo.

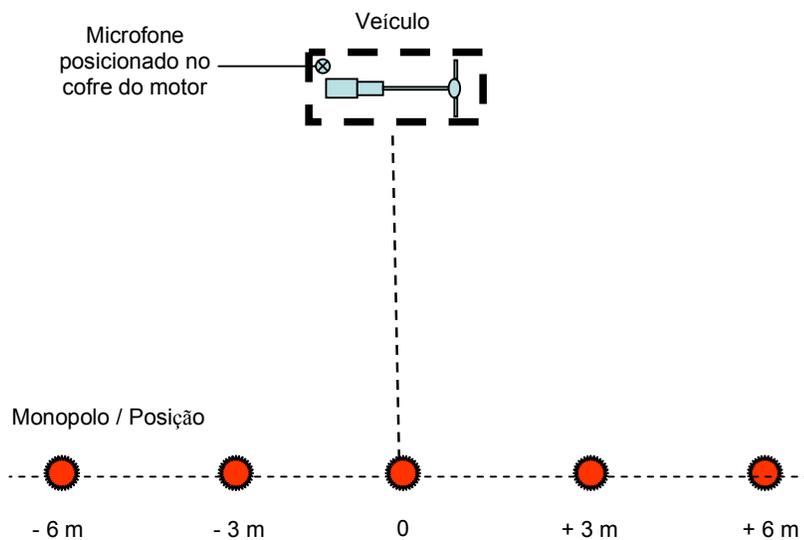


Figura 4.3: Posicionamentos do monopolo nas posições do microfone do PBN para medições das FRFs na câmara semi anecóica.

Cada FRF é dada pela razão, expressa em dB, entre a pressão sonora no campo próximo da subárea do veículo e a pressão sonora a um metro do centro do monopolo. As medições foram realizadas com médias de 30 segundos, com banda de largura de 0,5 Hz, e apresentaram boa coerência – acima de 0.9 na faixa de frequências de interesse de 250 a 6300 Hz, conforme ilustra a Figura 4.4. Após a medição, os dados foram expressos em dBs, em bandas de 1/3 oitavas.

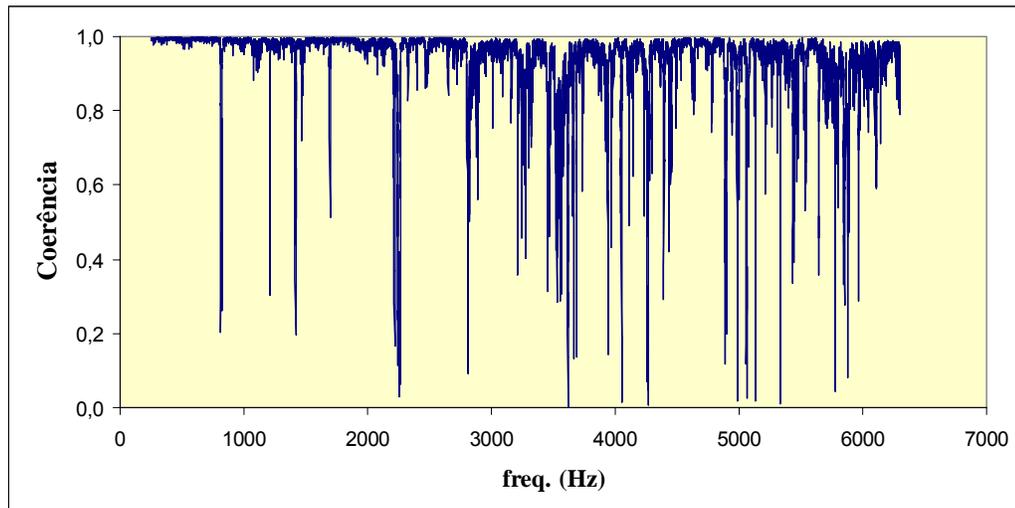


Figura 4.4: Coerência na medição da FRF entre microfone instalado próximo à caixa acústica, no cofre do motor, e o microfone de PBN na posição + 6 m.

A fim de se realçar as diferenças entre as FRFs medidas, foram escolhidas posições relacionadas e não relacionadas ao conjunto propulsor. Os microfones foram posicionados simulando-se sub-áreas no compartimento do motor, ventoinha do radiador, banco do motorista, banco traseiro e ponteira do escapamento. O vidro dianteiro esquerdo da pick up permaneceu aberto durante as medições no interior da cabine. As fotos apresentadas nas Figuras 4.5 - 4.7 mostram o posicionamento dos microfones utilizados no levantamento de algumas das FRFs.



Figura 4.5: Posicionamento do microfone utilizado na medição da FRF entre monopolo e banco do motorista.



Figura 4.6: Posicionamento do microfone utilizado na medição da FRF entre monopolo e banco traseiro.



Figura 4.7: Posicionamento do microfone utilizado na medição da FRF entre monopolo e ponteira do escapamento.

#### 4.3 Determinação da potência sonora da caixa acústica

A potência sonora da caixa acústica (que foi utilizada com o objetivo de simular uma sub-área irradiante no cofre do veículo) foi determinada a partir da medição da intensidade sonora medida a 100 mm de suas superfícies. Os valores médios de intensidade sonora para cada face da caixa acústica multiplicados pelas respectivas áreas das faces forneceram os valores de potência sonora irradiados por cada face. A idéia original era simular uma fonte de ruído com uma única face radiante; por este motivo, as 5 faces não radiantes da caixa acústica foram recobertas com material absorvente/isolante formando uma barreira acústica. As medições de intensidade sonora, entretanto, demonstraram que as parcelas de potência sonora oriundas das faces recobertas não eram desprezíveis, logo, o cálculo da potência sonora da caixa acústica incluiu todas as suas faces. A foto da Figura 4.8 mostra a medição de intensidade sonora na caixa acústica.



Figura 4.8: Medição de intensidade sonora da caixa acústica utilizada como sub-área irradiante dentro do cofre do veículo.

#### 4.4 – Cálculo da pressão sonora produzida pela caixa acústica no microfone de PBN

A potência sonora do monopolo,  $W_M$ , foi calculada através de (Gerges 1992):

$$W_M = \frac{P_M^2 \cdot 4\pi R^2}{\rho c} \quad (4.1)$$

onde :

$P_M$  : pressão média medida a um metro do monopolo

$R$  : raio onde foi realizada a medição da pressão sonora do monopolo, escolhida como 1 metro

$\rho$  : densidade do ar ( $1,21 \text{ kg/m}^3$ )

$c$  : velocidade do som no ar ( $344 \text{ m/s}$ )

As relações pressão sonora / potência sonora ( $H_{ca}$ ), para cada uma das cinco posições na pista de PBN, foram multiplicadas pela potência sonora da caixa acústica ( $PS_{ca}$ ),

determinada conforme descrito seção 4.3, fornecendo assim as pressões sonoras devidas à caixa acústica ( $PBN_{ca}$ ), ao longo da pista de PBN:

$$PBN_{CA} = H_{CA} \bullet PS_{CA} \quad (4.2)$$

A fim de verificar-se a adequação do método proposto, os valores de  $PBN_{ca}$  foram confrontados com os valores obtidos através da medição direta da pressão sonora produzida pela caixa acústica nos cinco pontos da pista de PBN.

#### 4.5 – Resultados obtidos

Os gráficos das Figuras 4.9 - 4.13 apresentam os módulos das FRFs, em dB, para as bandas de 1/3 oitava compreendidas entre 250 e 6300 Hz, para 5 posições na pista de PBN para as seguintes subáreas, respectivamente: cofre do motor, ventoinha do radiador, banco do motorista, banco traseiro e ponteira do escapamento.

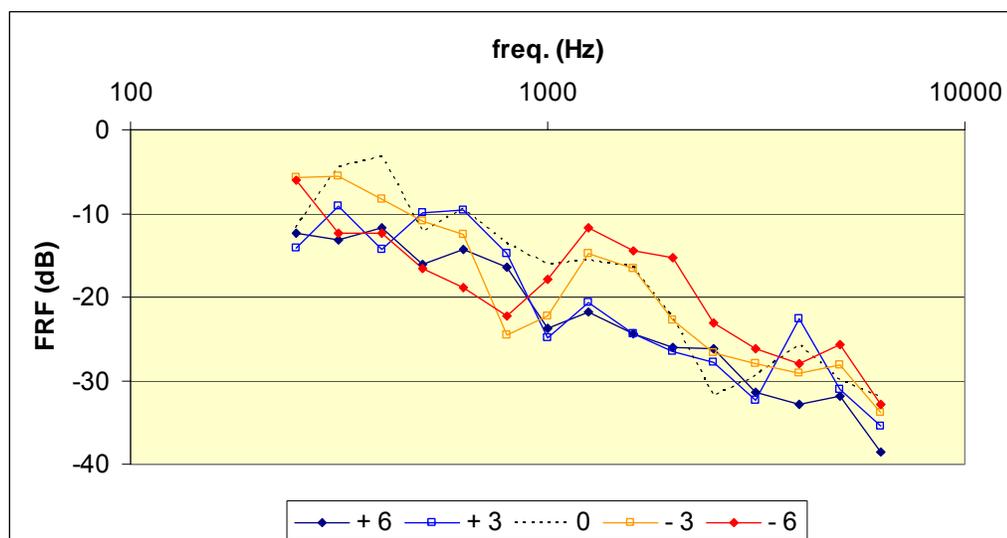


Figura 4.9: FRFs do cofre do motor para cinco posições da pista de PBN.

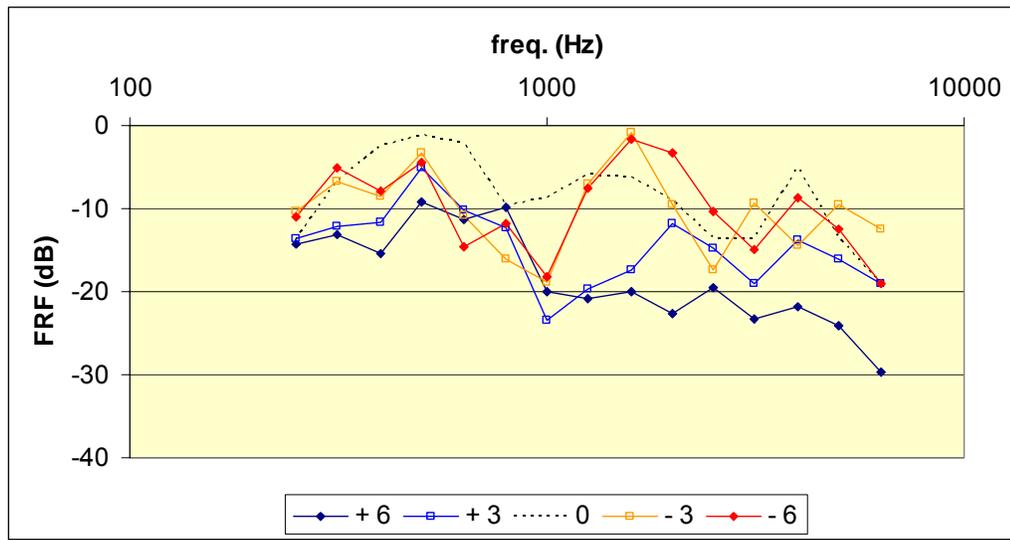


Figura 4.10: FRFs da ventoinha do radiador para cinco posições da pista de PBN.

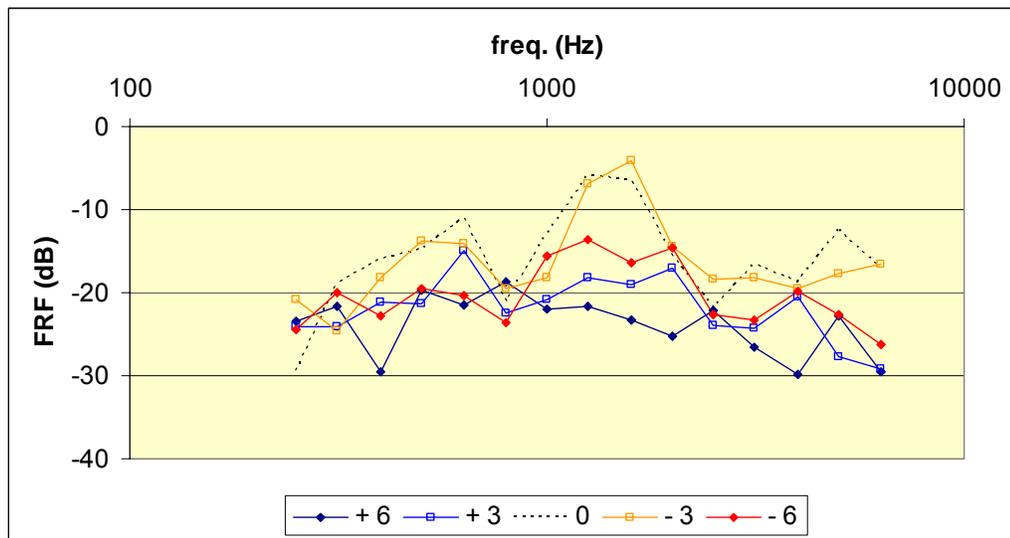


Figura 4.11: FRFS do banco do motorista para cinco posições da pista de PBN.

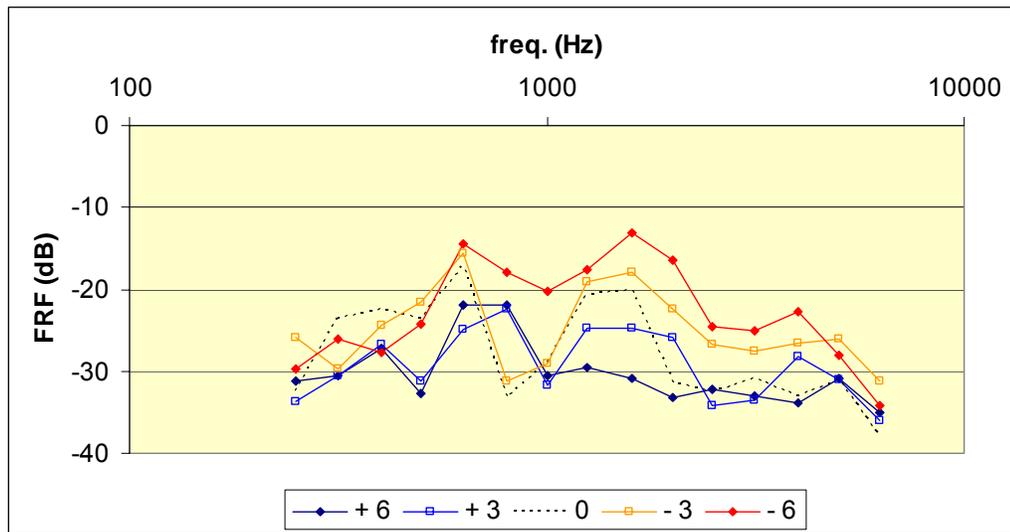


Figura 4.12: FRFs do banco traseiro para cinco posições da pista de PBN.

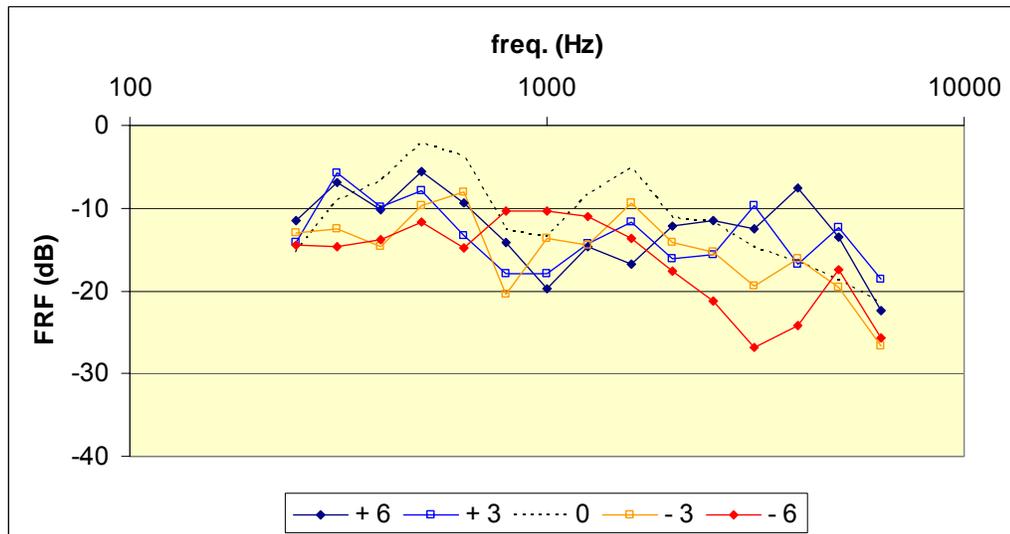


Figura 4.13: FRFs da ponteira do escapamento para cinco posições da pista de PBN.

Nas FRFs obtidas, podemos verificar a influência da posição da subárea em relação ao veículo; subáreas mais ocultas pela carroceria, como por exemplo o cofre do motor e o banco traseiro, apresentam maiores atenuações (FRFs mais negativas); subáreas desprotegidas, como a ponteira do escapamento e a ventoinha do motor, apresentam menores atenuações (FRFs menos negativas). Este efeito é mostrado nas FRFs da Figura 4.14, para a posição 0 do teste de PBN.

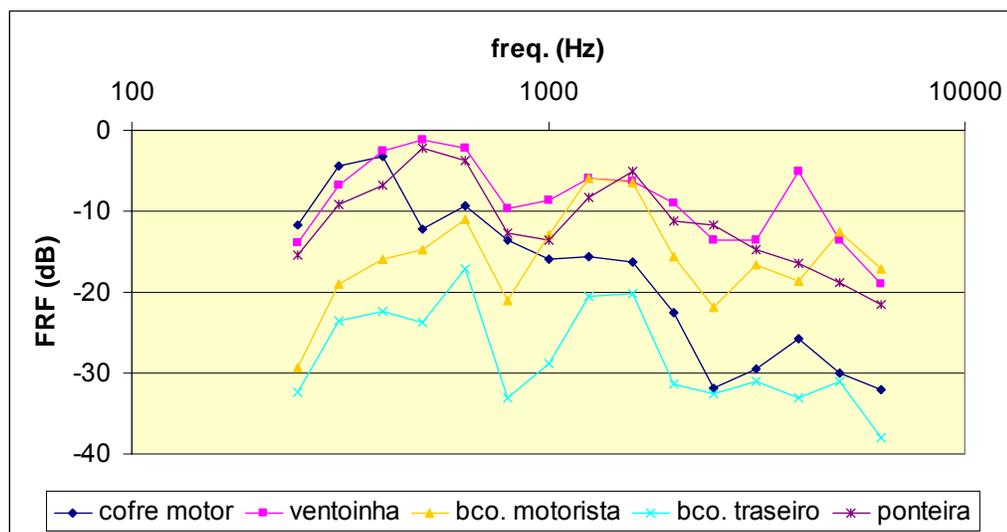


Figura 4.14: FRFs de transferência de várias subáreas na posição fixa de 0 m na pista de PBN – efeito da oclusão da subárea pela carroceria.

Pode-se observar também o efeito da posição do veículo na pista de PBN nas FRFs. As FRFs das Figuras 4.15 - 4.17 mostram este efeito para a sub-área localizada no cofre do motor, para três diferentes bandas de 1/3 oitava.

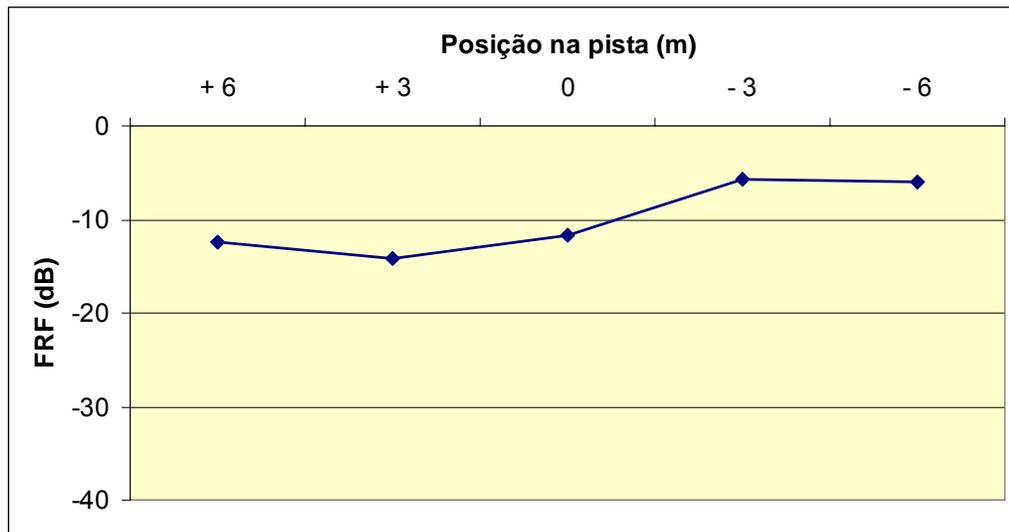


Figura 4.15: FRFs do cofre do motor ao longo da pista de PBN – banda de 1/3 oitava de 250 Hz.

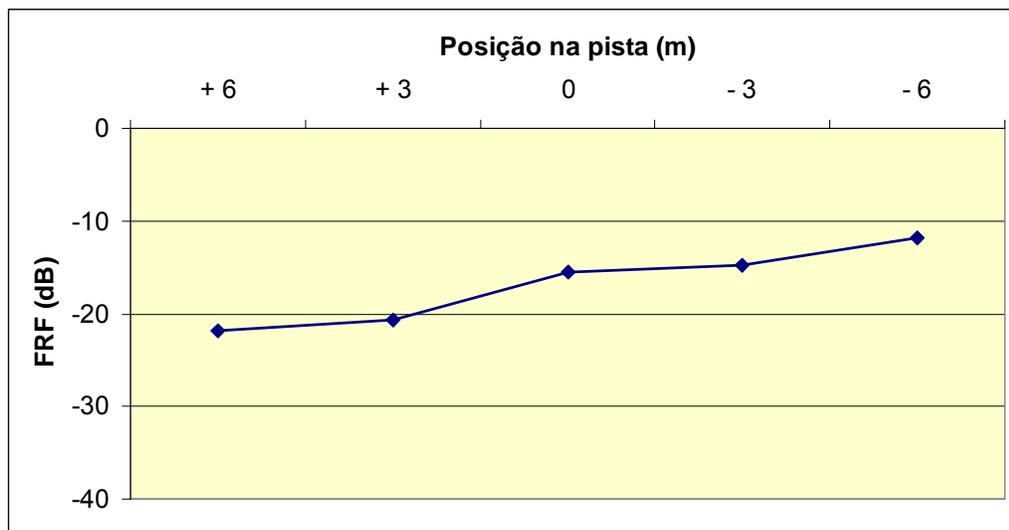


Figura 4.16: FRFs do cofre do motor ao longo da pista de PBN – banda de 1/3 oitava de 1.250 Hz.

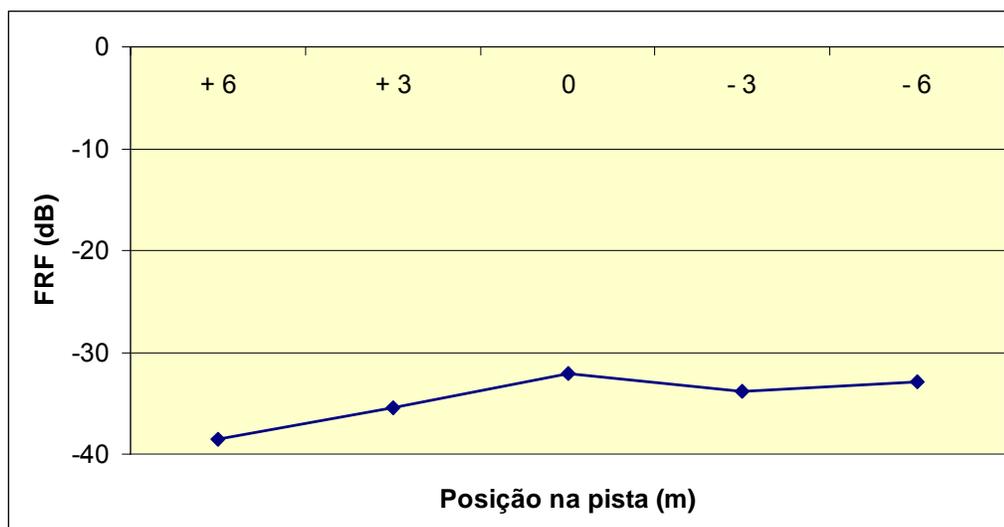


Figura 4.17: FRFs do cofre do motor ao longo da pista de PBN – banda de 1/3 oitava de 6.300 Hz.

As FRFs das Figuras 4.18 - 4.22 apresentam níveis de pressão sonora em bandas de 1/3 oitava medidos, comparativamente com aqueles obtidos reciprocamente com a caixa acústica instalada no cofre do motor, para cinco posições na pista de PBN, onde pode-se notar discrepâncias da ordem de 5 dB(A).

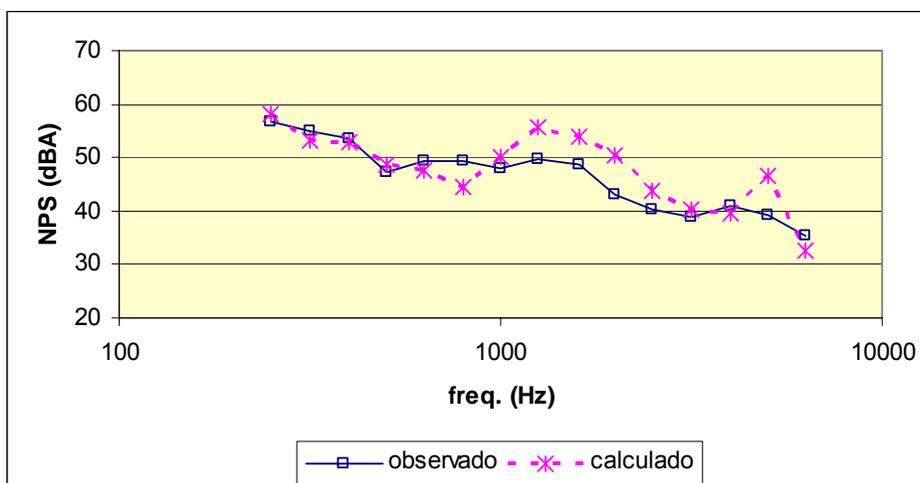


Figura 4.18: NPS em bandas de 1/3 oitava medidos, comparativamente com aqueles obtidos reciprocamente. Caixa acústica instalada no cofre do motor. Posição na pista de PBN – 6 m.

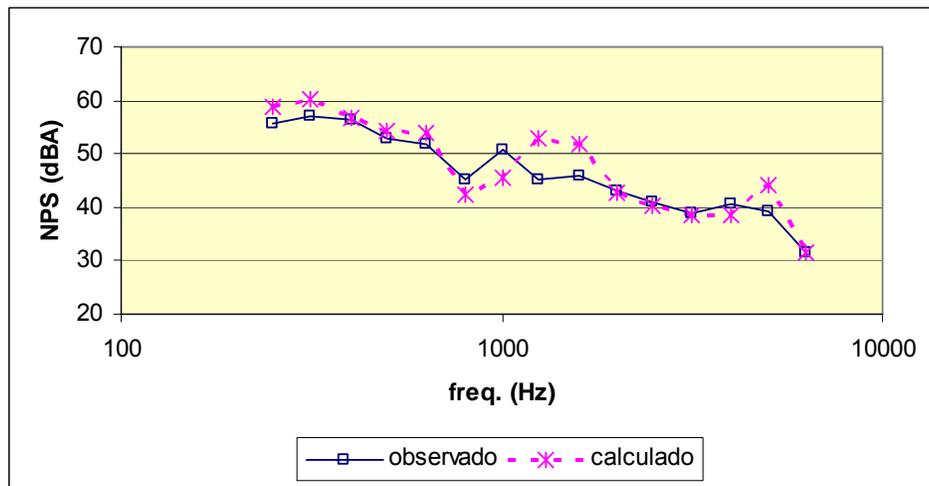


Figura 4.19: NPS em bandas de 1/3 oitava medidos, comparativamente com aqueles obtidos reciprocamente. Caixa acústica instalada no cofre do motor. Posição na pista de PBN – 3 m.

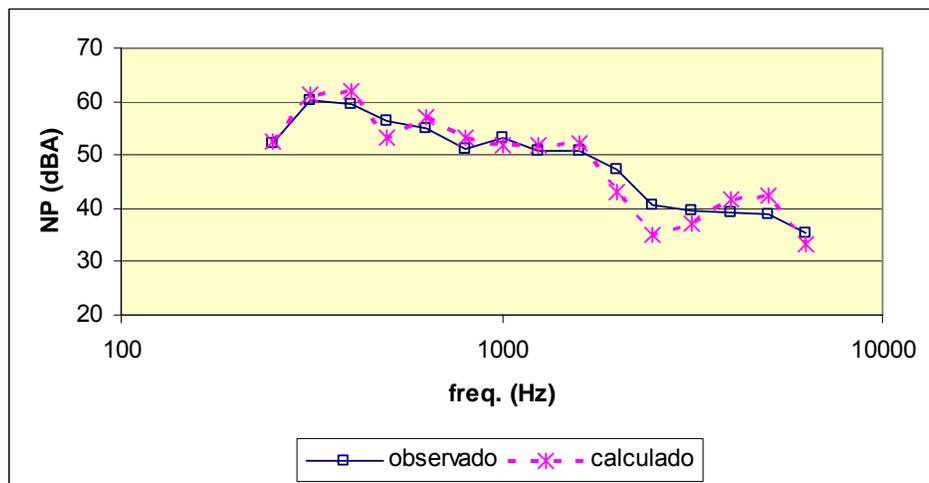


Figura 4.20: NPS em bandas de 1/3 oitava medidos, comparativamente com aqueles obtidos reciprocamente. Caixa acústica instalada no cofre do motor. Posição na pista de PBN 0 m.

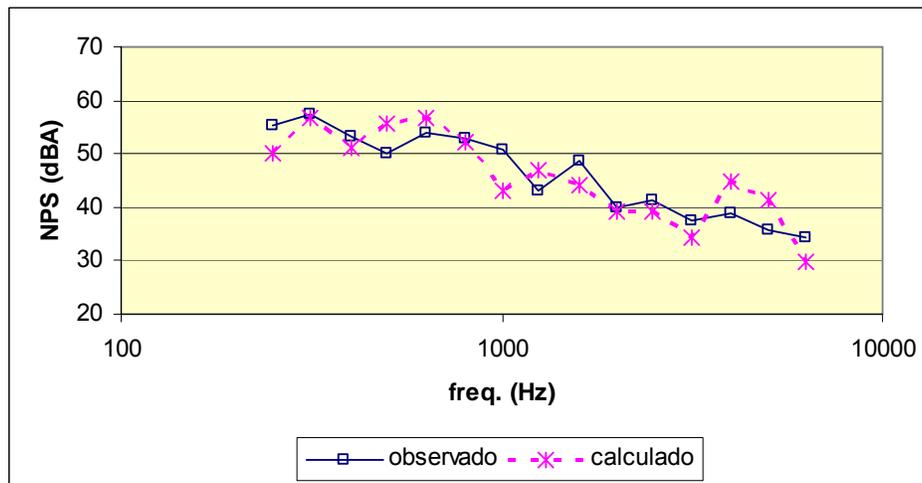


Figura 4.21: NPS em bandas de 1/3 oitava medidos, comparativamente com aqueles obtidos reciprocamente. Caixa acústica instalada no cofre do motor. Posição na pista de PBN + 3 m.

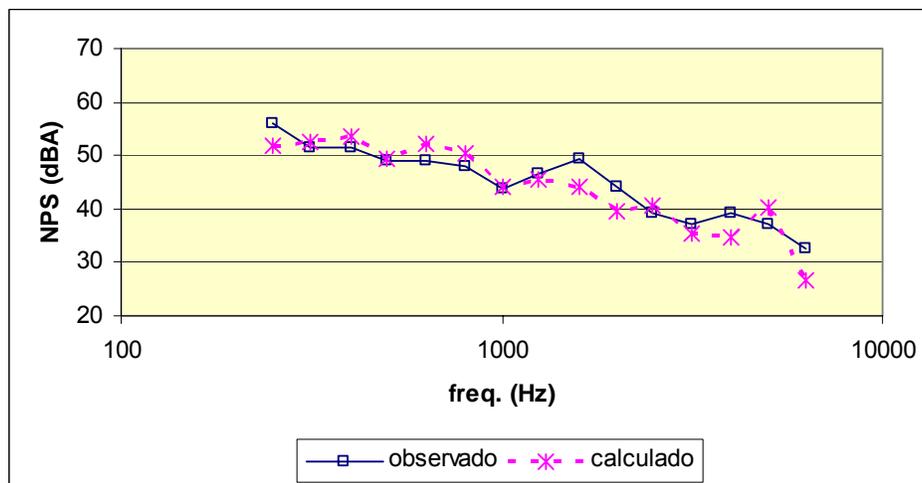


Figura 4.22: NPS em bandas de 1/3 oitava medidos, comparativamente com aqueles obtidos reciprocamente. Caixa acústica instalada no cofre do motor. Posição na pista de PBN + 6 m.

## **5 - ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS E DO MÉTODO ADOTADO**

## 5 ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS E DO MÉTODO ADOTADO

A seguir são discutidos os motivos mais prováveis para os desvios encontrados entre os níveis de pressão sonora em bandas de 1/3 oitava medidos e aqueles calculados pelo método sugerido no Capítulo 3. Também são sugeridas alterações no equipamento e método de medição utilizados visando uma maior precisão no método de simulação do PBN.

### 5.1 – Dispersão do campo sonoro do monopolo

O monopolo utilizado para a obtenção das funções de transferência apresentou uma boa repetibilidade. Os espectros da figura 5.1 mostram 6 medições do NPS a 1 m do monopolo, tomadas com mesma posição relativa entre microfone e monopolo.

:

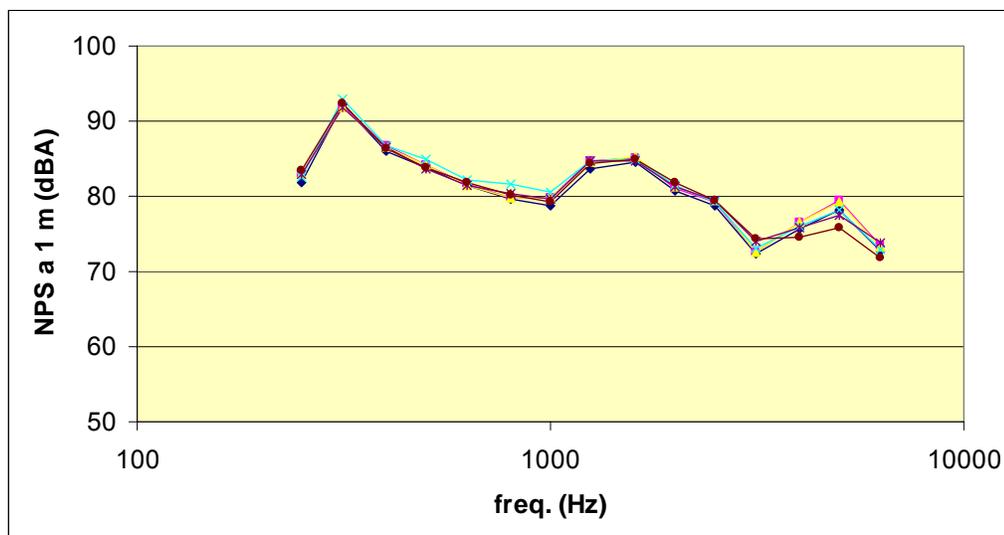


Figura 5.1: Dispersão de 6 medições do NPS a 1m do monopolo, utilizadas como referência nas medições das FRFs.

Entretanto, quando levantamos a dispersão do NPS a 1 m, em torno do monopolo, encontramos grandes desvios, principalmente em médias e altas frequências, conforme mostrado no gráfico da Figura 5.2.

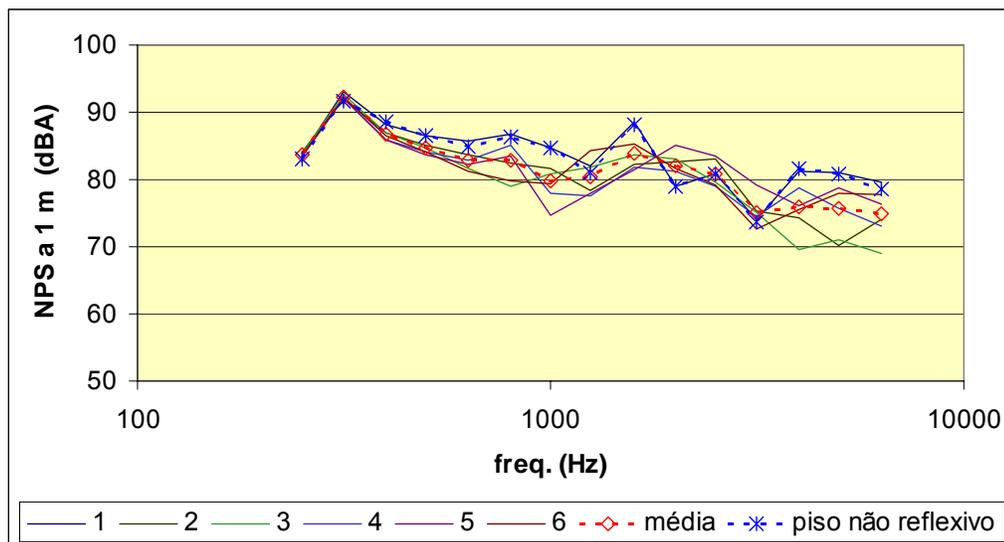


Figura 5.2: Dispersão no NPS medido a 1 m do monopolo em 6 diferentes posições.

## 5.2 – Repetibilidade das FRFs medidas

As FRFs medidas apresentaram boa repetibilidade. A Figura 5.3 apresenta as FRFs levantadas em duplicata para a posição + 3m da pista de PBN, para as cinco sub-áreas do veículo, onde pode-se observar que as curvas são coincidentes.

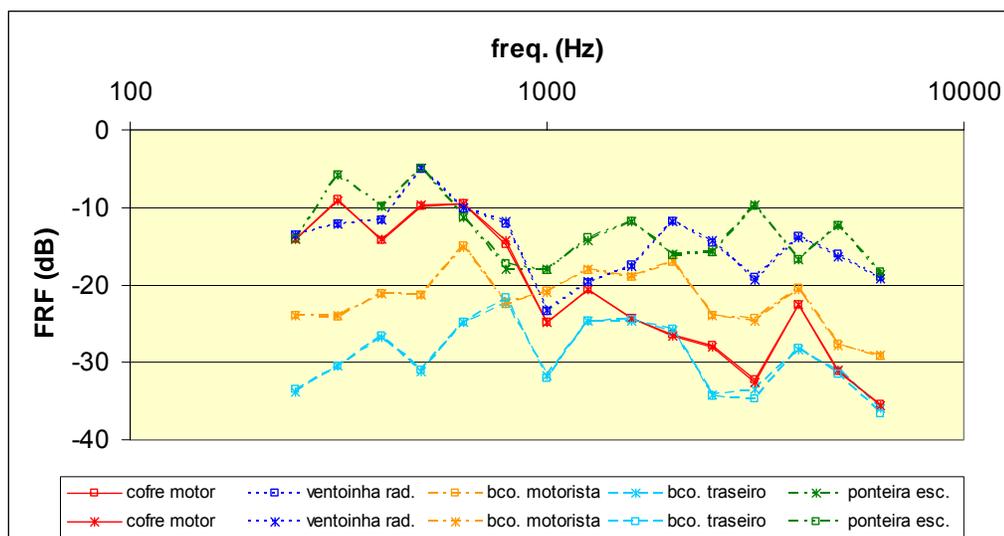


Figura 5.3 : FRFs entre 5 sub-áreas do veículo e o monopolo, medidas em duplicata para a posição de PBN de + 3 m.

### 5.3 – Dimensão do monopolo

A principal causa das discrepâncias, da ordem de 5 dB(A), encontradas entre os níveis de pressão sonora em bandas de 1/3 oitava medidos comparativamente com aqueles obtidos reciprocamente com a caixa acústica instalada no cofre do motor, para cinco posições na pista de PBN, reside no fato de que a fonte sonora utilizada (dodecaedro com 12 alto-falantes) não é um monopolo perfeito. Segundo o procedimento de teste da GM – GMN5807TP – (2002), para que uma fonte sonora possa ser considerada como um monopolo a seguinte condição deve ser atendida:  $ka < 1$ . Aqui  $k = \omega / c$  é o número de ondas,  $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular em rad/s,  $f$  é a frequência em Hz.,  $c$  é a velocidade do som, e  $a$  é o raio do monopolo. O dodecaedro com 12 alto-falantes utilizado nos experimentos tem um raio em torno de 0,20 m, o que requer  $k < 5$ , para que o dodecaedro irradie como um monopolo. Ao admitir-se arbitrariamente  $k = 5$ , obtém-se o limite superior de frequências  $f = 5c / 2\pi \cong 300$  Hz. Este resultado mostra que o dodecaedro não irradia como um monopolo em frequências superiores a 300 Hz.

Fleszar *et al.* (2001) sugerem a utilização de um monopolo de dimensões reduzidas, composto por um driver de compressão, um adaptador e um tubo, conforme mostrado na Figura 5.4.



Figura 5.4: Monopolo construído a partir de um driver de compressão, que pode ser construído suficientemente pequeno a fim de que possa ser considerado como fonte pontual em médias e altas frequências.

A Figura 5.5 apresenta a curva de diretividade da fonte (GM STANDARDS, 2002 ). Para 10 kHz,  $k = 2\pi f / c = 183$  e com o raio do tubo  $a = 6,35$  mm, obtém-se  $ka = 1,16$ . Para este valor de  $ka$ , a Figura 5.5 fornece o índice de diretividade em torno de 3dB. Já para  $ka = 0,5$ , o que corresponde a  $f = 4,3$  kHz, o índice de diretividade é de apenas 1.1 dB. Isto significa que esta fonte poderá ser considerada como pontual para frequências de até 4,3 kHz.

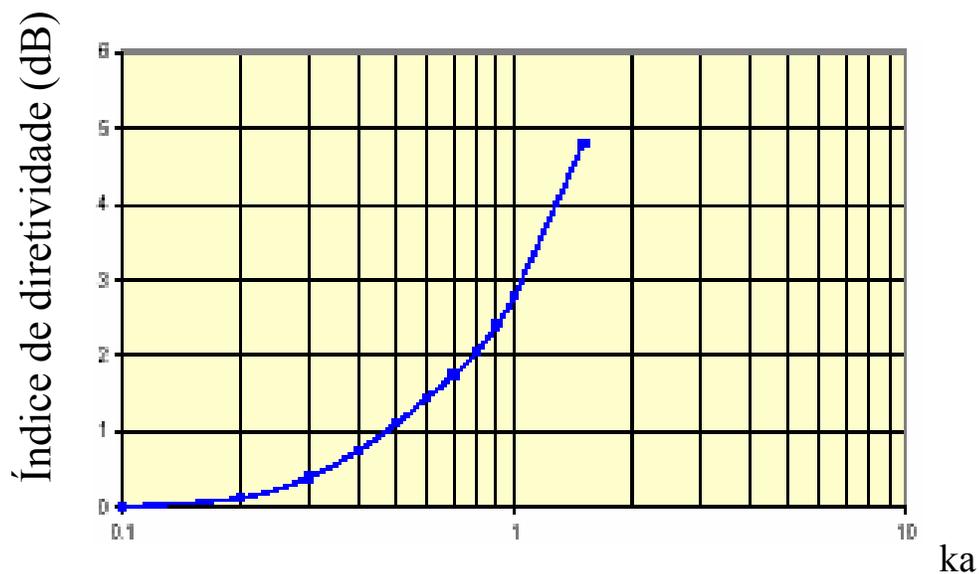
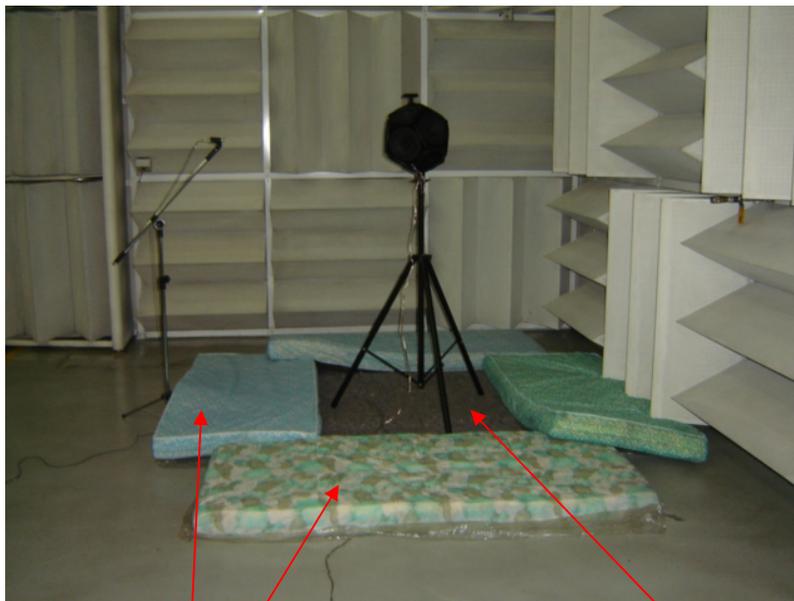


Figura 5.5: Índice de diretividade de uma fonte pontual.

#### 5.4 – Efeito da câmara semi-aneecóica e a calibração do monopolo

A calibração do monopolo deveria idealmente ser realizada em uma câmara anecóica, onde não ocorreria o efeito da reflexão no piso. Este efeito foi investigado através da medição do NPS a 1m do monopolo com a adição de material fonoabsorvente (manta de feltro fenólico e colchões) sobre o piso na região do pedestal do monopolo, conforme mostra a Figura 5.6.



colchões

manta de feltro fenólico

Figura 5.6: Tentativa de eliminação da reflexão no piso da câmara semi-aneecóica com materiais fonoabsorventes (colchões e manta de feltro fenólico).

Pode-se observar, pela comparação direta entre o espectro do NPS a 1m do monopolo, nesta condição anecóica, e a dispersão dos espectros em condição semi-aneecóica (Figura 5.7), que a dispersão (na condição semi-aneecóica) teve um peso maior do que a condição anecóica (piso não reflexivo) nas discrepâncias encontradas. Embora não essencial, recomenda-se que o monopolo seja previamente calibrado em câmara anecóica.

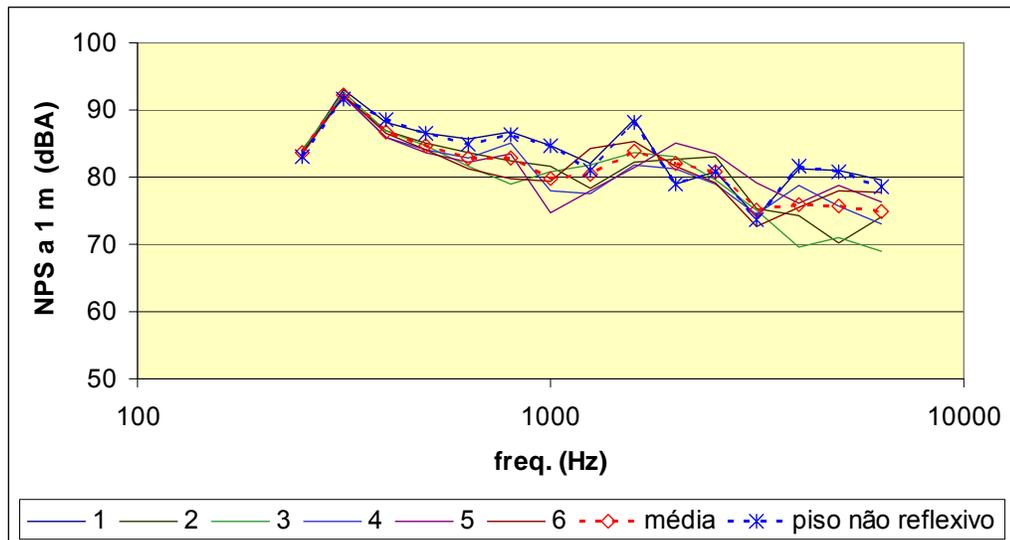


Figura 5.7: Efeito do piso reflexivo sob o monopolo, indicando que a influência da adição de material de absorção foi menor do que a dispersão encontrada.

### 5.5 – Efeito da emissão de ruído por mais de uma face da caixa acústica

Era desejado que a fonte de ruído conhecida – a caixa acústica – simulasse o efeito de uma simples sub-área do conjunto propulsor, emitindo ruído ortogonalmente a uma das suas faces. Entretanto, o encapsulamento que foi promovido não foi eficiente em baixas frequências. Este efeito foi o de tornar imprecisas as medições das FRFs entre a caixa acústica e o microfone de PBN, nas cinco posições da pista, pois o microfone de referência da caixa acústica foi posicionado em frente à face de maior emissão, levando a valores imprecisos das FRFs para as demais faces emissoras.

O espectro da figura 5.8 apresenta os valores de intensidade sonora para as 6 faces da caixa acústica, indicando a maior participação das faces encapsuladas, para as bandas de 1/3 oitava menores.

A caixa acústica foi utilizada para simular uma sub-área irradiante (com potência sonora conhecida) de fontes emissoras de ruído do veículo. Na realidade, esta simulação se afastou da condição proposta, o que prejudicou os resultados obtidos.

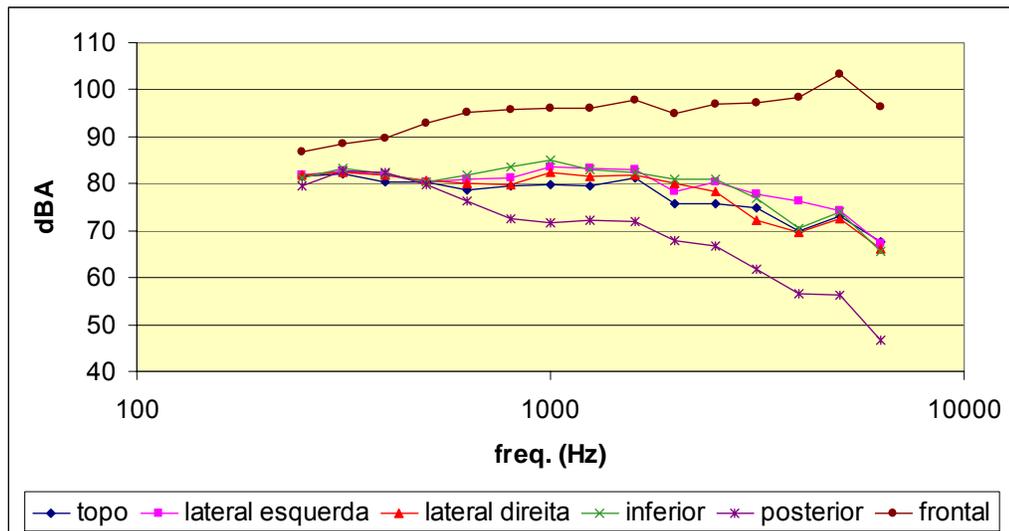


Figura 5.8: Intensidade sonora das seis faces da caixa acústica, indicando a maior participação das faces encapsuladas nas baixas frequências.

## **6 - CONCLUSÕES**

## 6 CONCLUSÕES

As legislações internacionais que limitam o ruído externo gerado por veículos automotores devem continuar impondo restrições crescentes aos fabricantes de veículos. Consequentemente, a observação de tais limites, como requisito legal, implicará em requisitos técnicos cada vez mais severos para novos produtos da indústria automobilística.

Os métodos atualmente utilizados para o desenvolvimento do PBN partem da observação direta do produto funcional, na maioria das vezes construído com uma grande parcela de ferramental definitivo. Esta metodologia implica em riscos de não observância dos limites legais, podendo somente ser detectada em fases avançadas do ciclo de projeto do produto, quando as alterações implicam em atrasos e altos custos.

Os procedimentos de testes atuais ainda não possibilitam a predição do PBN do veículo, mesmo para pequenas alterações do desenho da carroceria ou alteração do conjunto propulsor.

O ônus da descoberta tardia da não observância dos limites de PBN tem recaído atualmente sobre o fabricante de veículos, embora seja consequência das características do veículo e dos subsistemas do conjunto propulsor, o que implica numa co-responsabilidade dos fornecedores dos subsistemas para a montadora.

Assim, é altamente desejável o domínio de uma técnica que possibilite a predição do PBN de um veículo.

Trabalhos recentes mostram ser viável a predição do PBN de um veículo a partir de dados de emissão sonora de seus componentes.

O método proposto no Capítulo 3 apresentou um bom potencial para a estimativa do PBN, como ficou demonstrado através do estudo de caso em um veículo comercial leve apresentado no Capítulo 4.

Adicionalmente, o método proposto apresenta a vantagem de melhor equilibrar a necessária parceria entre montadora e fornecedores no desenvolvimento de PBN, através da distribuição de esforços na obtenção dos dados experimentais necessários à simulação.

Apesar do bom potencial apresentado pelo método proposto, os níveis de discrepância encontrados, entre valores simulados pelo método e valores observados, não o habilitam para o uso definitivo como ferramenta de predição de PBN. Faz-se necessário o seu aprimoramento, no sentido de obter-se maior precisão nos resultados.

O monopolo utilizado mostrou-se pouco preciso para a faixa de frequências de interesse – 250 a 6300 Hz – introduzindo erros pela distorção do campo acústico produzido (alta diretividade), principalmente em médias e altas frequências. Seu princípio de construção, baseado na montagem de 12 alto-falantes num dodecaedro, levou a dimensões que o afastaram da condição de monopolo na faixa de frequências de interesse.

A fonte sonora descrita em algumas publicações recentes, construída com driver de compressão e tubo de emissão aproxima-se da condição de fonte pontual para frequências de até 4,3 kHz e adequa-se à aplicação do método proposto. Um primeiro passo no sentido do aprimoramento do método proposto deve ser no sentido de construir-se ou adquirir-se uma fonte pontual segundo este projeto.

Apesar dos maiores erros experimentais terem sido causados pela alta diretividade do monopolo utilizado, o método proposto pode ser melhorado através da prévia calibração do monopolo em câmara anecóica.

O domínio do método proposto no sentido da obtenção de boa precisão no PBN simulado para uma sub-área deve necessariamente ser expandido para várias subáreas das fontes emissoras de ruído do veículo, até se chegar à situação desejada da simulação completa de um conjunto propulsor.

## **7 BIBLIOGRAFIA**

## 7 BIBLIOGRAFIA

BRANDL, F. K. Low Noise Engine Concepts to meet Future Legislative Vehicle Requirements. In: EUROSYPHOSEUM - THE MITIGATION OF TRAFFIC NOISE IN URBAN AREAS, Nantes, France, 1992

FLESZAR, A. R. et al. Combining Vehicle and Test-Bed Diagnosis Information to Guide Vehicle Development for Pass-By Noise. SAE PAPER 2001-01-1565

GENERAL MOTORS North American Engineering Standards – Test Procedure GMN5807TP. 2002. *Documento interno da GM.*

GERGES, S. N. Y. Radiação de ruído de uma esfera pulsante. In: **Ruído - Fundamentos e Controle**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1992, 131-136.

GOTTLÖB, D. Verkehrslärmmissionen - Gesundheitliche Auswirkungen, Gesetzgebung in Deutschland. In: AVL TAGUNG MOTOR UND UMWELT 96, Graz, Áustria, 1996. **Proceedings**. Graz, Áustria: AVL LIST GmbH, 1996. p. 7 - 14.

PFLUEGER, M.; BODLUND, K. Pass-by Noise Prediction for Trucks Based on Powertrain Test-Cell Measurements. SAE PAPER 2001-01-1564.

INTERNATIONAL STANDARD. ISO 362: Acoustics – Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles – Engineering method. Suíça, 1998.

RUST, A; BRANDL, F. K. Proven Strategies for vehicle noise reduction. In AVL SEMINAR, Seoul, Coréia, 20-21 Abril de 1993.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)