

**“MEDIÇÃO DA POTÊNCIA SONORA EMITIDA POR ÔNIBUS”**

Victor Henrique Cabral Pinheiro

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

---

Prof. Ricardo Eduardo Musafir, D. Sc.

---

Prof. Jules Ghislain Slama, D. Sc.

---

Prof. Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto, Dr. -Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
AGOSTO DE 2014

## Agradecimentos

A princípio, não pretendia escrever folha de agradecimentos, pois não queria ser injusto ao não mencionar alguém. É tanta gente que nos auxilia nessa trajetória que pensei que, a não ser que escrevesse uma seção de agradecimentos tão grande quanto o próprio projeto, não seria justo.

Mas agora vejo que injusto estaria sendo caso não escrevesse uma. Há pessoas tão importantes para que esse projeto tenha acontecido que me sinto compelido a agradecê-las. São elas o orientador desse projeto, professor Ricardo E. Musafir, a quem devo agradecimentos pela paciência, pelo apoio, pela disponibilidade, pelos conselhos, pela paciência e ainda mais uma vez pela paciência. Acho que amadureci e cresci durante esse projeto, principalmente nessa reta final, portanto, agradeço. Também devo muitos agradecimentos à aluna de mestrado Alexandra Chung, pois realizamos as medições juntos e por ter me auxiliado em muitos aspectos do tratamento dos dados, além de ter me fornecido boa parte das fotos das medições que estão nesse trabalho, além de algumas das figuras.

Certamente não menos importantes, apenas não tão presentes para a execução desse projeto como as duas pessoas que já citei, agradeço à minha mãe Marcilene Cabral, meu pai José Pinheiro Filho e meu irmão Elton Pinheiro pelo apoio, pelo suporte e por terem proporcionado que eu estudasse e pudesse chegar até aqui.

Também foram muito importantes os motoristas dos ônibus, os supervisores que os liberaram para as medições e os funcionários do CENPES que autorizaram as medições na área do estacionamento.

Agradeço também aos amigos de dentro e de fora da faculdade. Aos de dentro, pelo companheirismo durante todo o curso, pelas caronas e por terem tornado essa jornada mais agradável, e aos de fora, pelo encorajamento e pela companhia. Destaco (entre tantos!) um exemplar de cada “categoria”: meu bom amigo Daniel Silva e meu xodó Érica Azevedo; agradeço aos amigos do trabalho, aos professores e funcionários da UFRJ, dentre os quais quero citar o Sr. Tito da secretaria de graduação por ser um excelente funcionário sempre disposto a ajudar os alunos.

# Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Propósito.....	1
1.2.	Características Básicas do Som.....	3
1.3.	Efeitos Nocivos do Ruído Ambiental.....	5
1.4.	Potência Sonora e Métodos de Medição.....	6
1.5.	Legislação Brasileira e Normas Referentes ao Ruído Veicular.....	10
1.5.1.	Legislação Brasileira.....	10
1.5.2.	Normas Brasileiras.....	11
2.	Metodologia.....	13
2.1.	Caixa de Referência.....	15
2.2.	Superfície de medição.....	17
2.3.	Determinação dos Níveis de Potência Sonora.....	21
2.3.1.	Cálculo da Área S.....	24
2.3.2.	Cálculo de <b>K1</b> .....	25
2.3.3.	Cálculo de <b>K2</b> .....	26
3.	Medições.....	27
3.1.	Aparato Experimental.....	30
3.2.	Procedimento Experimental.....	31
4.	Resultados e Discussão.....	35
5.	Conclusão.....	43
6.	Referências Bibliográficas.....	45
	Anexo A – Memórias de Cálculo.....	49

# **1. Introdução**

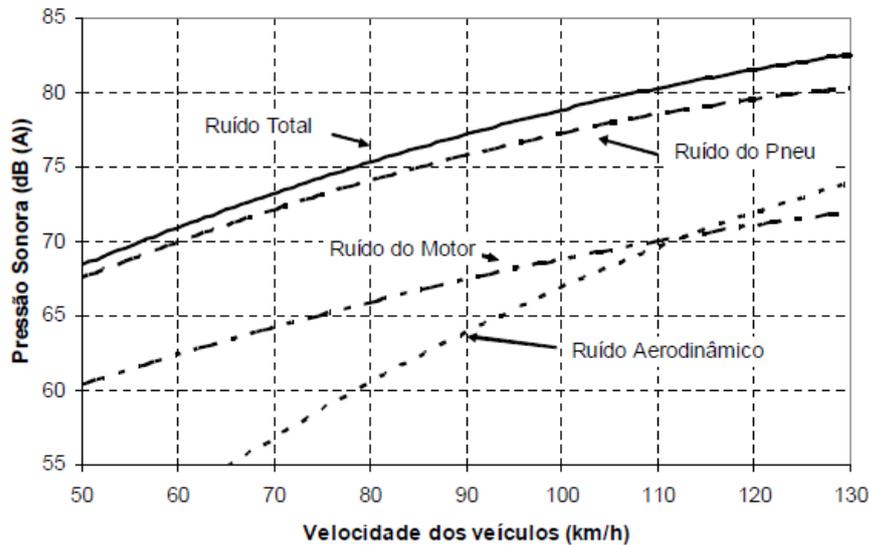
## **1.1. Propósito**

A poluição sonora é considerada pela Organização Mundial da Saúde como uma das mais importantes, juntamente com a poluição do ar, da água e do solo [1], tal é a sua contribuição na degradação da qualidade de vida nos centros urbanos. Portanto, é imprescindível para o bem-estar dos indivíduos que existam órgãos controladores dos níveis de ruído, os quais tendem a aumentar em proporção direta com o crescimento desses centros, bem como formas eficientes de mitigá-lo.

O transporte rodoviário traz grande impacto ambiental, poluindo o ar e sendo uma importante fonte de poluição sonora próximo às estradas e nos grandes centros urbanos. No Brasil, verifica-se um expressivo aumento nas taxas de motorização: de 122 habitantes/veículo na década de 1950 para seis em 1995 [2] e 4,4 habitantes/veículo em 2014 [3]. 97% dos passageiros e 63% das cargas são transportados em rodovias [4], de maneira que tanto a emissão de gases pelos veículos automotores quanto a emissão de ruído têm sido alvos de inúmeros estudos [5].

Particularmente, os veículos rodoviários de grande porte com motores a diesel, como ônibus e caminhões, são responsáveis por boa parte dos níveis de ruído. Esses veículos, mesmo em boas condições, já emitem bastante ruído nas imediações: há ruído proveniente do funcionamento do motor, da transmissão, do escapamento, da vibração da carroceria, do sistema pneumático de abertura das portas (no caso de ônibus), do sistema de refrigeração e da interação entre o pneu e a pista [6] (ver Figura 1). Além disso, fatores (comuns na frota brasileira) como irregularidades e falta de manutenção nos ônibus circulantes (que causam maior ruído na

frenagem e na vibração da carroceria pela falta de troca regular das pastilhas de freio e do sistema de amortecimento) aumentam ainda mais o ruído que é emitido.



**Figura 1 - Influência das diversas fontes no ruído total emitido por veículos em movimento, na faixa de 50-130 km/h [5]**

O ruído total emitido por veículos em movimento é a combinação de três fontes principais: o ruído aerodinâmico, o ruído do motor e o ruído da interação entre o pneu e o pavimento. Em geral, a maior parte do ruído emitido em qualquer velocidade é proveniente da interação pneu/pavimento. Entretanto, para veículos de carga e de grande porte, Sandberg [7] afirma que os ruídos do motor e do escapamento são as principais fontes para acelerações de 0-50 km/h, comuns em ônibus circulando em áreas residenciais, sendo a interação pneu/pavimento e o ruído aerodinâmico mais significativos em acelerações acima de 50 km/h ou velocidades constantes.

Dado que é uma questão de saúde pública manter o ruído que é emitido pelos veículos dentro de um limite aceitável, foram medidos os níveis de potência sonora através de medições de nível de pressão sonora (grandezas definidas a seguir) em alguns

modelos de ônibus — utilizando o método descrito na norma ISO 3744:2010 — e buscar-se-á simplificar a sua relativamente complexa implementação para o caso desses veículos, visando possibilitar que sejam feitas estimativas razoáveis mais rapidamente. As medições foram feitas em colaboração com a aluna de mestrado Alexandra Chung, cuja tese de mestrado está em preparação.

## **1.2. Características Básicas do Som**

O som é um fenômeno físico — as perturbações de pressão produzidas pelas vibrações de corpos sólidos ou do próprio fluido se propagam em forma de ondas em algum meio fluido, usualmente o ar — associado a um fenômeno fisiológico — o aparelho auditivo é capaz de captar essas ondas e transformá-las em sinais elétricos que o cérebro interpreta como a sensação subjetiva do som. — Tais flutuações de pressão, aqui representadas por  $p'$ , são passíveis de serem percebidas pelo ouvido humano jovem e sadio a partir de 20  $\mu\text{Pa}$  (o limiar da audição), sendo que a dor acontece geralmente para  $p'$  da ordem de 20 Pa [8]. Flutuações de pressão podem se manifestar em uma gama muito grande de frequências, mas a audição humana é especialmente sensível às frequências de 20 à 20000 Hz [9].

O ruído, por sua vez, é definido de maneira informal como qualquer som indesejável. Ruído ambiental é como é chamado o ruído proveniente de fontes como o tráfego de veículos e de pessoas, atividades comerciais, animais, etc.

Foi proposto por Weber [10] que a percepção das sensações, inclusive a percepção sonora, em geral varia aproximadamente com o logaritmo da energia dos estímulos. Por isso, no estudo da acústica é utilizada uma escala logarítmica, o decibel (dB), para

medir níveis de diversas grandezas — pressão sonora, potência sonora, intensidade sonora, etc. — de maneira mais representativa.

Com efeito, o nível de pressão sonora (NPS ou  $L_p$ ) é uma grandeza fundamental no estudo da acústica e é definido como dez vezes o logaritmo à base 10 da razão entre o valor quadrático médio da pressão ( $\overline{p'^2}$  ou  $p'^2_{rms}$ ) e o quadrado de um valor de referência, e é expresso em decibéis (dB) [11].

$$L_p = 10 \log \frac{\overline{p'^2}}{p_0'^2} \quad (1)$$

Como a energia transportada por uma onda é proporcional ao quadrado da sua amplitude,  $\overline{p'^2}$  está relacionado à energia sonora existente no ponto de medição. Usualmente,  $p'_0$  é tomado como 20  $\mu\text{Pa}$ , o limiar da audição [9].

O aparelho auditivo é mais sensível a sons em determinadas frequências. Em geral, um som muito grave (de baixa frequência) não será tão percebido ou incomodará tanto quanto outro mais agudo se ambos tiverem a mesma intensidade, pois nosso sistema auditivo percebe melhor esse último. Portanto, algumas ponderações são aplicadas para reduzir o efeito de algumas frequências e realçar outras. Existem vários tipos de ponderações, mas a mais comum e mais útil para a acústica ambiental é a ponderação “A” (Figura 2), e valores expressos usando essa ponderação são identificados por dB(A).

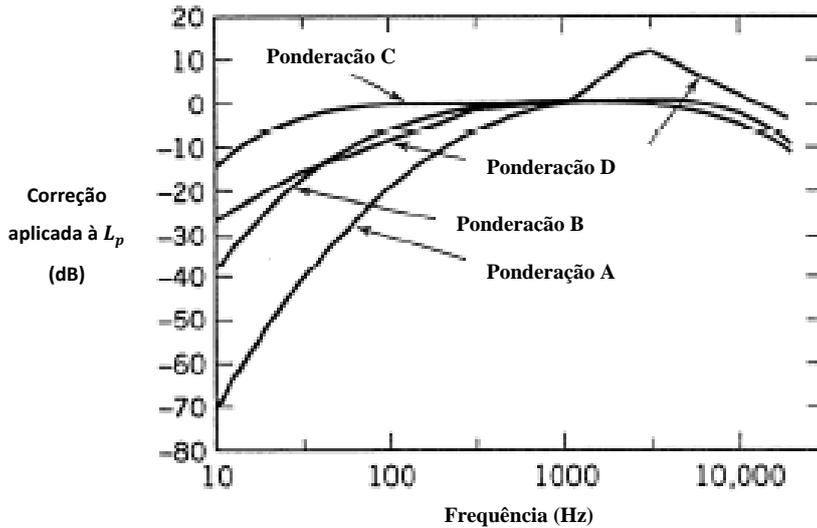


Figura 2 - Curvas padrão de ponderação [12]

### 1.3. Efeitos Nocivos do Ruído Ambiental

Sabe-se que a exposição humana a altos níveis de ruído, ou mesmo a níveis não tão altos por períodos prolongados de tempo (Figura 3), pode ocasionar alterações fisiológicas — como distúrbios gastrointestinais e hipertensão sanguínea — e bioquímicas — por exemplo, alteração nos níveis de glicose no sangue e na produção de adrenalina — nos indivíduos expostos, além da diminuição da capacidade auditiva (que já ocorre naturalmente no processo de envelhecimento para algumas frequências, mas pode ser acelerada e intensificada pela exposição excessiva). Esses problemas levam, entre outros, a perdas no potencial produtivo e aumento nos gastos com saúde [1] [13].

NÍVEL DE RUÍDO dB (A)	MÁXIMA EXPOSIÇÃO DIÁRIA PERMISSÍVEL
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

**Figura 3 - Máxima exposição diária permissível para atividades e operações insalubres, por nível de pressão sonora em dB(A), segundo a NR 15 [14]**

Para minimizar esses danos, todo objeto deveria ser fabricado de maneira que emita apenas o mínimo de ruído necessário (haja vista que há situações em que um pouco deste é adequado, como por exemplo para alertar que um maquinário está em operação ou que um veículo se aproxima, por exemplo), e é por isso que é importante que normas e a legislação estabeleçam limites ao ruído máximo que pode ser emitido (Seção 1.5), bem como métodos confiáveis e validados que sejam simples o suficiente para permitir que seja verificada a conformidade com esses limites de maneira prática (Seção 1.4).

#### **1.4. Potência Sonora e Métodos de Medição**

A intensidade sonora ( $I$ ) é definida como a quantidade de energia acústica transmitida por unidade de área por unidade de tempo. A potência sonora gerada por uma fonte é uma medida da energia sonora emitida por uma fonte por unidade de tempo. Essas duas grandezas estão relacionadas através da integral de área:

$$P = \int_S \bar{\mathbf{I}} \cdot d\mathbf{S} \quad (2)$$

onde  $\bar{\mathbf{I}}$  é o vetor intensidade sonora média [W/m<sup>2</sup>] e  $d\mathbf{S}$  é um elemento diferencial de área vetorial [m<sup>2</sup>].

É definido também um nível de potência sonora ( $L_w$ ), expresso em decibéis, dado por dez vezes o logaritmo à base 10 da razão entre a potência sonora em questão,  $P$ , e um valor de referência,  $P_0 = 1 \text{ pW}$ .

$$L_w = 10 \log \frac{P}{P_0} \quad (3)$$

A potência sonora é uma quantidade que representa a energia acústica por unidade de tempo emitida por uma fonte. Ela é a causa; o campo de pressão sonora é o efeito. Uma boa analogia é um aquecedor que irradia calor (causa) em um determinado ambiente e uma dada temperatura é o efeito: a temperatura do ambiente dependerá de outras fontes no ambiente, da disposição de coisas, de se há isolamento térmico, entre outros, mas a energia térmica irradiada pelo aquecedor é sempre a mesma. De maneira semelhante, a potência sonora de uma fonte é sempre a mesma, ao passo que a pressão sonora em determinado ponto dependerá das circunstâncias ambientais [15]. É possível, inclusive, estimar através dela a pressão sonora que será causada pela fonte a uma dada distância [16].

Entre outras aplicações, a potência sonora é especialmente importante para veículos, pois é dada como entrada em programas de simulação de ruído de tráfego e é um dado interessante para o consumidor avaliar e escolher, entre dois produtos similares, qual será o mais silencioso [15].

É importante ressaltar que é possível medir o nível de potência sonora de uma fonte através de medidas de pressão sonora ou diretamente de intensidade sonora, sendo as medições deste último caso feitas através de um intensímetro. Ambos os métodos são válidos e têm suas peculiaridades, mas como se dispunha de medidores de pressão sonora (descritos na Seção 2), o método da norma ISO referente à medição de potência sonora através da pressão foi utilizado.

Na prática, a relação entre nível de pressão sonora e nível de potência sonora é complicada, sendo difícil determinar com precisão o nível de potência sonora através de medições de pressão. Entretanto, em dois casos ideais – campo livre e campo difuso – o nível de potência sonora está relacionado explicitamente ao nível de pressão sonora. Existem métodos para medição em campo livre (isto é, espaço em que as ondas sonoras podem se propagar em todas as direções sem obstáculos) que podem ser aplicados para determinar o nível de potência sonora com precisão considerável. Métodos de verificação e de engenharia também foram estipulados com menor precisão para medição *in situ* ou em outras situações [17].

Para efeitos de medição de nível de pressão sonora em veículos existem a Norma Brasileira (NBR) 15145 [18], de novembro de 2004: “Medição do ruído emitido por veículos rodoviários automotores em aceleração - método de engenharia” e a NBR 9714 [19], de janeiro de 2000: “Ruído emitido por veículos automotores na condição parado – método de ensaio”.

No que se refere à medição de potência sonora, existem diversas normas da International Organization for Standardization (ISO) que podem ser empregadas. Há a norma ISO 9614-3:2002 [20], que trata de como obter a potência sonora através de medidas de intensidade sonora e as que determinam como medir potência

sonora através do nível de pressão sonora. São essas as ISO de número 3741 até 3747, que variam dependendo do nível de precisão buscado, do ambiente, características do ruído e níveis de potência que podem ser obtidos (Tabela 1). Em particular, a ISO 3744:2010, que será mais bem descrita na Seção 2, foi a adotada para as medições que serão mostradas neste trabalho.

**Tabela 1 - Síntese dos métodos de medição de nível de potência sonora [15]**

<b>Norma ISO</b>	<b>Classificação do método</b>	<b>Ambiente</b>	<b>Níveis de potência sonora obtidos</b>
<i>ISO 3741</i> [21]	Precisão	Câmara reverberante sob condições específicas	Bandas de oitava ou terço de oitava
<i>ISO 3742</i> [22]			
<i>ISO 3743</i> [23] [24]	Engenharia	Câmara reverberante especial	Bandas de oitava
<i>ISO 3744</i> [11]		Ao ar livre ou em um ambiente suficientemente grande	Bandas de oitava ou terço de oitava
<i>ISO 3745</i> [25]	Precisão	Câmara anecóica ou semi-anecóica	
<i>ISO 3746</i> [26]	Verificação	Não necessita de ambiente especial	Bandas de oitava
<i>ISO 3747</i> [27]		Não necessita de ambiente especial; para fontes estacionárias	

## **1.5. Legislação Brasileira e Normas Referentes ao Ruído Veicular**

### **1.5.1. Legislação Brasileira**

A lei 6938 [28], de 31 de agosto de 1981, a qual dispõe sobre a política nacional do meio ambiente, assim declara no seu artigo 6º:

*“Art 6º - Os órgãos e entidades da União, dos Estados, do Distrito Federal, dos Territórios e dos Municípios, bem como as fundações instituídas pelo Poder Público, responsáveis pela proteção e melhoria da qualidade ambiental, constituirão o Sistema Nacional do Meio Ambiente - SISNAMA, assim estruturado:*

*II - órgão consultivo e deliberativo: o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), com a finalidade de assessorar, estudar e propor ao Conselho de Governo, diretrizes de políticas governamentais para o meio ambiente e os recursos naturais e deliberar, no âmbito de sua competência, sobre normas e padrões compatíveis com o meio ambiente ecologicamente equilibrado e essencial à sadia qualidade de vida”*

Com base nisso, a lei 9503 [29], de 23 de setembro de 1997, no seu artigo 104 determina que o CONAMA seja o órgão que deve inspecionar a emissão de ruído de veículos em circulação.

*“Art. 104. Os veículos em circulação terão suas condições de segurança, de controle de emissão de gases poluentes e de ruído avaliadas mediante inspeção, que será obrigatória, na forma e periodicidade estabelecidas pelo CONTRAN para os itens de segurança e pelo CONAMA para emissão de gases poluentes e ruído.”*

### 1.5.2. Normas Brasileiras

O CONAMA lançou várias resoluções tratando do assunto do limite de ruído emitido por veículos automotores. No que se refere ao limite de ruído na condição parado com velocidade de rotação do motor constante, a mais recente delas, que está em vigor com pequenas alterações dadas nas resoluções nº 426, de 2010, nº 435, de 2011, e nº 451, de 2012 — alterações essas não relevantes para o limite de ruído veicular — e que veio revogar as resoluções nº 01, de 1993; nº 15, de 1994; nº 18, de 1995; nº 227, de 1997; nº 252, de 1999 e nº 256, de 1999, é a resolução 418 [30], de 25 de novembro de 2009. Ela estabelece:

*“4. Para todos os veículos automotores, nacionais ou importados, os limites máximos de ruído na condição parado são os valores certificados e divulgados pelo fabricante. Na inexistência desta informação, são estabelecidos os limites máximos de ruído na condição parado da figura.”* (Figura 4)

Ou seja, os limites máximos de ruído na condição parado devem ser certificados e divulgados pelo fabricante quando da liberação do veículo para comercialização, desde que não sejam maiores que os limites estabelecidos na Figura 4. A medição dos níveis de ruído na condição parado com velocidade de rotação do motor constante deve ser feita de acordo com a norma NBR 9714.

CATEGORIA	Posição do Motor	NÍVEL DE RUÍDO dB(A)
Veículo de passageiros até nove lugares e veículos de uso misto derivado de automóvel	Dianteiro	95
	Traseiro	103
Veículo de passageiros com mais de nove lugares, veículo de carga ou de tração, veículo de uso misto não derivado de automóvel e PBT até 3.500 kg	Dianteiro	95
	Traseiro	103
Veículo de passageiros ou de uso misto com mais de 9 lugares e PBT acima de 3.500kg	Dianteiro	92
	Traseiro e entre eixos	98
Veículo de carga ou de tração com PBT acima de 3.500 kg	Todos	101
Motocicletas, motonetas, ciclomotores, bicicletas com motor auxiliar e veículos assemelhados	Todas	99

Observações:

- 1) Designações de veículos conforme NBR 6067.
- 2) PBT: Peso Bruto Total.
- 3) Potência: Potência efetiva líquida máxima conforme NBR ISO 1585.

**Figura 4 - Limites para níveis de ruído veicular (condição parado) segundo a resolução CONAMA n° 418 [30]**

Os limites de níveis máximos de ruído para veículos em aceleração foram contemplados mais recentemente na resolução 272 [31], de 14 de setembro de 2000, que ainda está em vigor. A Figura 5 mostra tais limites. Os níveis de ruído para veículos em aceleração devem ser medidos de acordo com a norma NBR 15145.

CATEGORIA			NÍVEL DE RUÍDO - dB(A)		
DESCRIÇÃO			OTTO	DIESEL	
				Injeção	
				Direta	Indireta
a	Veículo de passageiros até nove lugares		74	75	74
b	Veículo de passageiros com mais de nove lugares	PBT até 2.000 kg	76	77	76
	Veículo de carga ou de tração e veículo de uso misto	PBT entre 2.000 kg e 3.500 kg	77	78	77
c	Veículo de passageiro ou de uso misto com PBT maior que 3.500 kg	Potência máxima menor que 150kW (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 menor que 75 kW (102 cv)	77	77	77
		Potência máxima entre 75 kW (102 cv) e 150 kW (204 cv)	78	78	78
		Potência máxima igual ou superior a 150 kW (204 cv)	80	80	80

Designação do veículo conforme NBR-6067

PBT: Peso Bruto Total

Potência: Potência efetiva líquida máxima (NBR/ISO 1585)

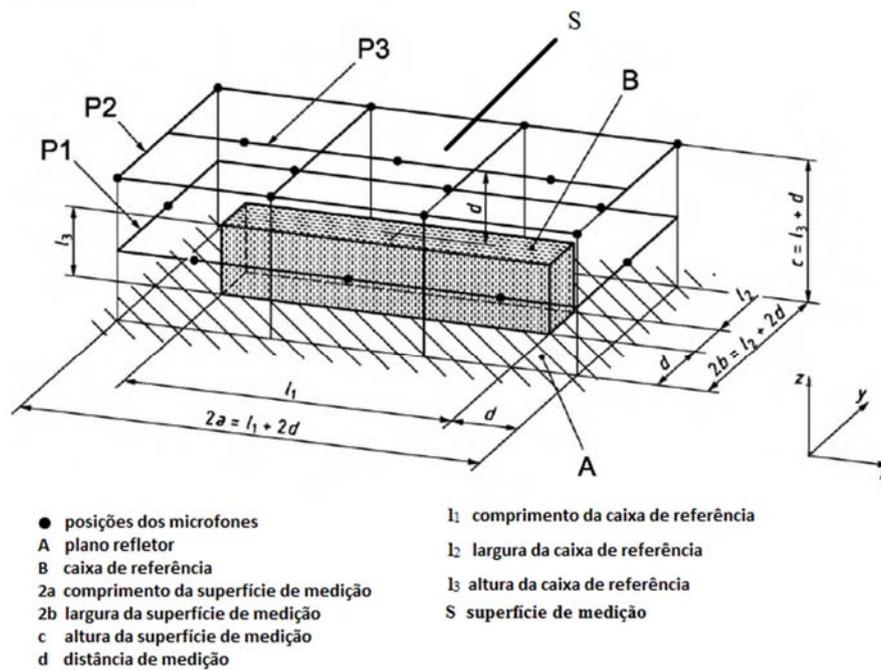
**Figura 5 - Limites para níveis de ruído veicular (em aceleração) segundo a resolução CONAMA n° 272 [31]**

Os ônibus, para efeito de aplicação dessas Resoluções, se enquadram na categoria de veículo de passageiros ou de uso misto com mais de 9 lugares e Peso Bruto Total (PBT) acima de 3500 quilos.

## 2. Metodologia

Para a obtenção do nível de potência sonora dos ônibus foi seguida a norma *ISO 3744:2010, Determination of Sound Power Levels and Sound Energy Levels of Noise Sources Using Sound Pressure*, de 2010 [11], que descreve o método de engenharia para medição de níveis de potência sonora e níveis de energia através da pressão sonora para uma fonte em campo livre — meio homogêneo livre de obstáculos — situada nas proximidades de um, dois ou três planos refletoras — superfície plana refletora de ondas sonoras.

A norma define algumas superfícies geométricas que envolvem a fonte de ruído. São eles a **caixa de referência** (ver Seção 2.1) e a **superfície de medição**, (ver Seção 2.2). É definida também a **distância de medição** ( $d$ ), que marca a distância entre a caixa de referência e o microfone que irá captar a pressão sonora. A Figura 6 mostra um exemplo dessas superfícies para o caso de uma fonte com o perfil geométrico semelhante ao de um ônibus situada sobre um plano refletor.



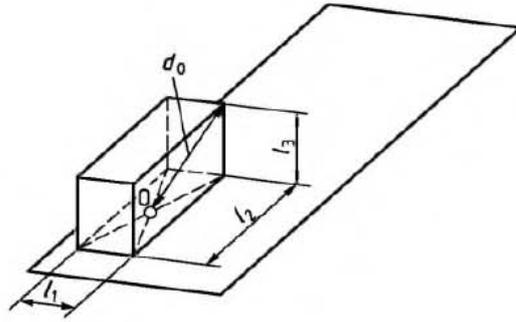
**Figura 6 - Exemplo de superfície de medição com as posições dos microfones segundo a norma ISO 3744[11]**

## 2.1. Caixa de Referência

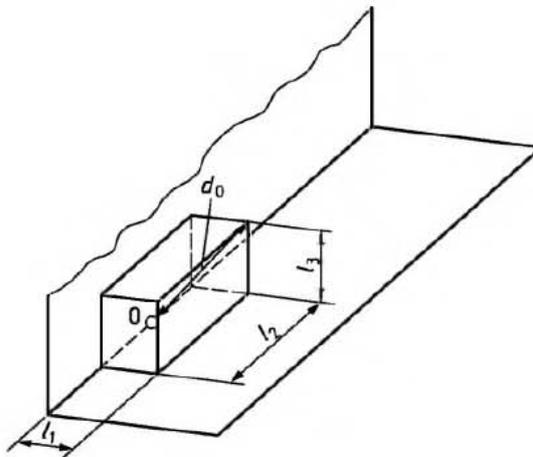
Para facilitar a determinação do formato e das dimensões da superfície de medição, o Item 7.1 da norma nos orienta a primeiramente delinear a caixa de referência. Ela é definida como o menor paralelepípedo possível que envolva a fonte, sendo que elementos constituintes da fonte que se projetem para fora desta, mas não sejam fontes consideráveis de ruído, podem ser descartados.

A norma alerta que a maneira como a fonte é instalada e operada pode ter influência no valor medido de NPS e  $L_w$ , principalmente pela possibilidade de vibração do aparato ou superfície, mas também pela presença de dutos de ar, cabos elétricos ou canos que podem irradiar quantidades razoáveis de energia sonora nas proximidades, influenciando o resultado da medição. Além disso, deve-se tomar o cuidado de determinar, de antemão, quais componentes, montagens, fontes de energia ou equipamentos auxiliares são constituintes da fonte de ruído e devem, portanto, ser envolvidos pela caixa de referência. No caso das medições deste trabalho, como consta na Seção 3, essas considerações foram simples, devido ao formato do ônibus e pelo fato de a medição ter sido realizada ao ar livre.

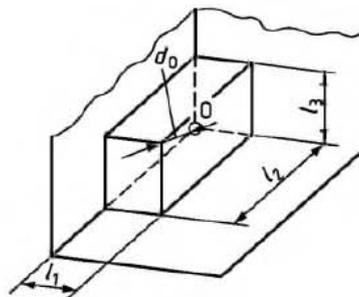
A localização da caixa de referência e da superfície de medição, bem como a posição e orientação dos microfones devem ser determinadas com referência a um sistema de coordenadas com origem no ponto “O”, ponto médio situado na intersecção da caixa de referência com o(s) plano(s) refletor(es), como está exemplificado na Figura 7. A distância  $d_0$  é chamada “distância característica da fonte” e é utilizada para determinar as dimensões da superfície de medição.



a) Caixa de referência em um plano refletor:  $d_0 = \sqrt{(l_1/2)^2 + (l_2/2)^2 + l_3^2}$



b) Caixa de referência em dois planos refletores:  $d_0 = \sqrt{l_1^2 + (l_2/2)^2 + l_3^2}$



c) Caixa de referência em três planos refletores:  $d_0 = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2}$

**Legenda**

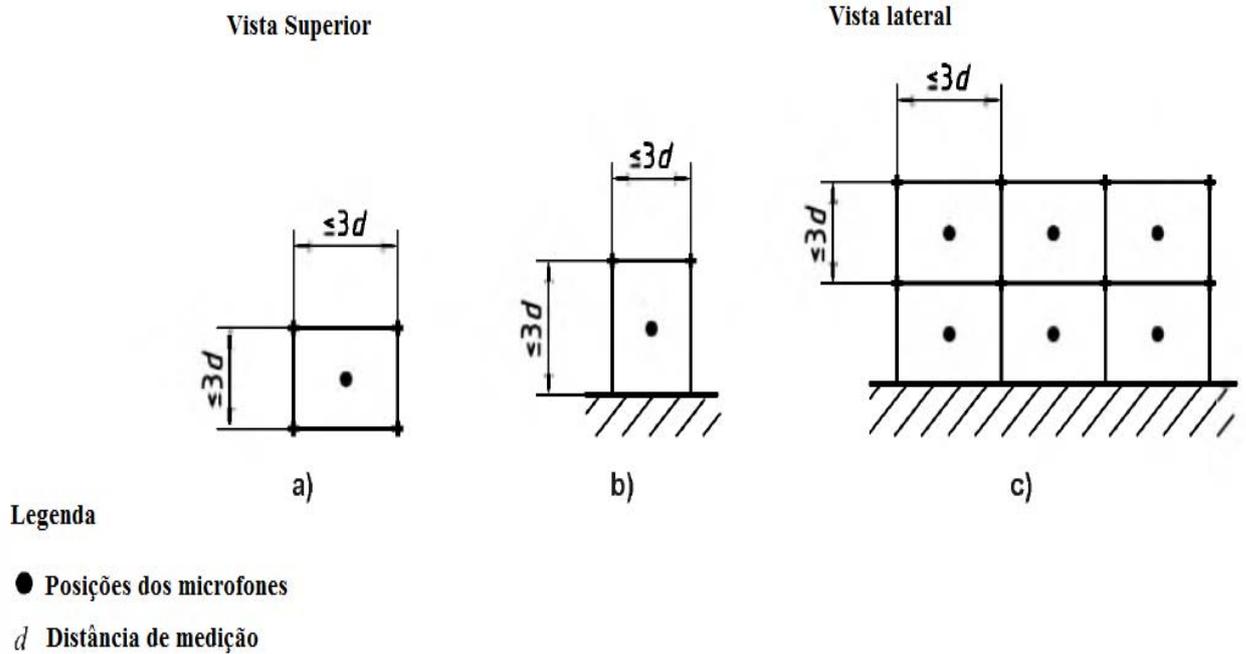
- $d_0$  Distância característica da fonte
- $l_1$  Largura da caixa de referência
- $l_2$  Comprimento da caixa de referência
- $l_3$  Altura da caixa de referência
- O Origem

**Figura 7 - Caixa de referência e coordenadas para um, dois e três planos refletores segundo a norma ISO 3744 [11]**

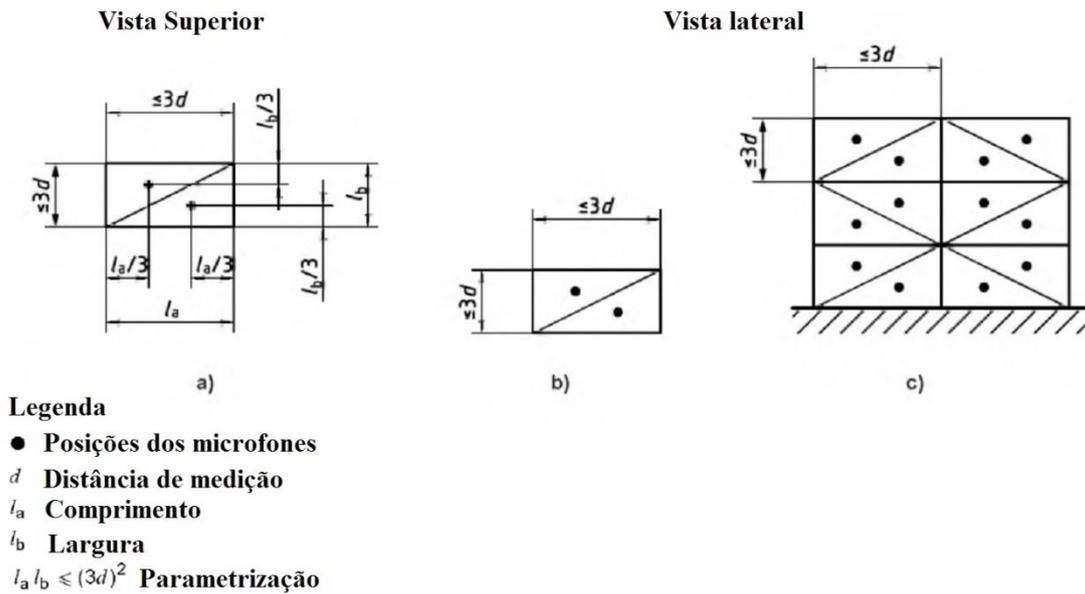
## 2.2. Superfície de medição

A superfície de medição é uma área  $S$ , na qual os microfones dos medidores de pressão sonora estão localizados, que envolve a caixa de referência e termina no(s) plano(s) refletor(es). Ela pode assumir diferentes formas (cilíndrica, esférica, paralelepipedal, ou uma combinação dessas). Em geral, o tipo de superfície de medição que será adotado depende do formato e tamanho da fonte, de maneira que as distâncias entre cada um dos microfones e a fonte sejam aproximadamente as mesmas. Além disso, os níveis de potência sonora obtidos tendem a ser mais exatos quando a maior parte da energia sonora atravessa a superfície de medição com incidência normal. Portanto, para um objeto longo em formato de caixa, como um ônibus, uma superfície paralelepipedal (forma de paralelepípedo) é a mais indicada. De fato, foi essa a superfície adotada e que será, por conta disso, descrita com mais detalhes.

A ideia é que seja feita uma varredura dos níveis de pressão sonora causados pela fonte em distâncias conhecidas. A superfície de medição, como diz a norma em seu Anexo C, deve ser subdividida em retângulos ou triângulos, de maneira que cada um dos seus cinco planos contenha áreas parciais  $S_i$  com comprimento máximo  $3d$ , onde  $d$  é a distância de medição (Figura 8 para retângulos e Figura 9 para triângulos). Os microfones dos medidores de nível de pressão sonora devem ser dispostos de maneira que a sua direção seja normal à superfície de medição. Nas extremidades do paralelepípedo, eles devem ser orientados em direção à origem  $O$  da caixa de referência.



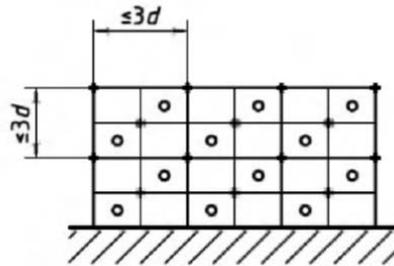
**Figura 8 - Posições dos microfones em uma superfície de medição paralelepipedal com áreas parciais retangulares segundo a norma ISO 3744 [11]**



**Figura 9 - Posições dos microfones em uma superfície de medição paralelepipedal com áreas parciais triangulares segundo a norma ISO 3744 [11]**

Cada uma das subdivisões da superfície de medição (chamadas de  $S_i$ ) pode, ainda, ser dividida em regiões menores, caso posições adicionais de microfones sejam requeridas. Pode-se inserir pontos

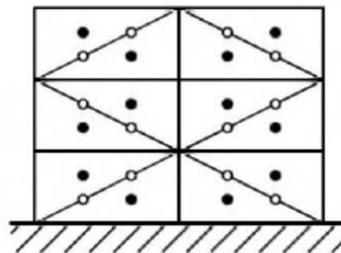
de medição em toda a extensão da superfície de medição (Figura 10 e Figura 11), conforme se deseja maior exatidão no valor de potência sonora



#### Legenda

- Posições básicas dos microfones
- Posições adicionais de microfones
- $d$  Distância de medição

**Figura 10 - Pontos de medição adicionais em um dos planos da superfície de medição com áreas parciais retangulares segundo a norma ISO 3744 [11]**



#### Legenda

- Posições básicas dos microfones
- Posições adicionais de microfones

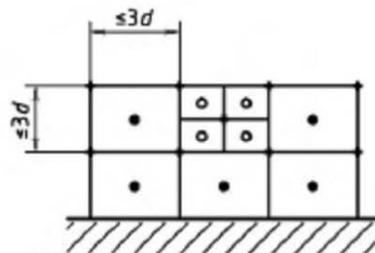
**Figura 11 - Pontos de medição adicionais em toda a superfície de medição com áreas parciais triangulares segundo a norma ISO 3744 [11]**

De fato, a norma preconiza que mais pontos de medição sejam utilizados caso pelo menos uma das seguintes condições seja satisfeita:

- A diferença entre o nível de pressão sonora máximo e mínimo medidos seja maior que o número de pontos de medição;

- A fonte emita ruído com um índice de direcionalidade aparente<sup>1</sup>,  $D_{li} = L'_{pi} - [\overline{L}'_p - K_1]$ , superior a 5 dB(A) em qualquer direção;
- Uma pequena parte da fonte seja responsável por grande parte do ruído emitido.

No segundo e terceiro casos, deve-se concentrar mais pontos de medição na região responsável por essa grande emissão de ruído, como está exemplificado na Figura 12 para áreas parciais retangulares e na Figura 13 para áreas parciais triangulares. De maneira contrária, pontos de medição podem ser descartados se investigações preliminares da própria fonte, ou de outra fonte similar, permitem concluir que o nível de pressão sonora total obtido sem esses pontos a serem desconsiderados não varia mais do que 0,5 dB do obtido com todos os pontos.

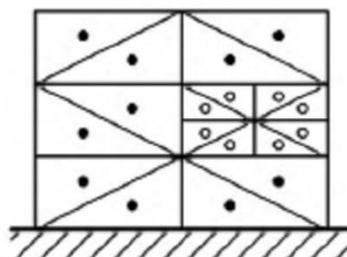


#### Legenda

- Posições básicas de microfones
- Posições extras de microfones para uma região específica
- $d$  Distância de medição

**Figura 12 - Exemplo de posições discretas de medição adicionais em áreas retangulares segundo a norma ISO 3744 [11]**

<sup>1</sup> Mede o quanto a fonte irradia som para o “tíesimo” microfone, em comparação com a irradiação sonora média ao longo da superfície de medição (ver Seção 2.3).



**Legenda**

- Posições básicas de microfones
- Posições extras de microfones para uma região específica

**Figura 13 - Exemplo de posições discretas de medição adicionais em áreas triangulares segundo a norma ISO 3744 [11]**

A distância de medição ( $d$ ) deve ser de no mínimo 0,25 m, mas preferencialmente de pelo menos 1 m. Isso porque, como menciona a norma em seu Item 7.2.4, “uma distância de medição menor que 0,5 m pode limitar a capacidade de captação de baixas frequências.”

Ainda, se a fonte emitir ruído estacionário [32] (isto é, com flutuações de nível de pressão sonora de no máximo 3 dB durante o período de medição), é possível realizar as medições utilizando um microfone que se move horizontalmente de um ponto de medição para outro à velocidade constante (na norma, este método de medição é chamado de “*traverse method*”: método das varreduras).

### **2.3. Determinação dos Níveis de Potência Sonora**

Os níveis de pressão sonora na superfície S devem ser medidos enquanto a fonte de ruído estiver emitindo o maior ruído que se verifica durante uma situação típica de operação. A medição deve ser feita em bandas de frequência ou com a ponderação A e deve durar pelo menos 10 segundos, mas idealmente 20 segundos ou mais, captando, em intervalos regulares, o nível de pressão sonora que a fonte causa em cada ponto de medição. Deve-se, então, obter

o nível de pressão sonora equivalente para cada ponto de medição através de:

$$L'_{pi} = 10 \log \frac{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \overline{p_i'^2(t)} dt}{p_0'^2} \text{ dB} \quad (4)$$

onde  $T$  é o intervalo de medição, começando em  $t_1$  e terminando em  $t_2$ , e o subíndice  $i$  se refere a cada uma das posições dos microfones. É importante esclarecer que, caso seja utilizado o procedimento de mover o microfone em velocidade constante, descrito no final da Seção 2.2, o índice  $i$  se refere a cada uma das vezes em que o microfone contornou a superfície de medição.

Procede-se então para a determinação do nível médio geral de pressão sonora, obtido com todos os pontos. Aqui, todos os  $L'_{pi}$  calculados através da Equação (4), referentes cada um deles a um ponto de medição, são combinados para fornecer o nível de pressão sonora médio em toda a superfície de medição:

$$\overline{L'_p} = 10 \log \left( \frac{1}{S} \sum_{i=1}^{N_m} S_i \times 10^{0,1L'_{pi}} \right) \quad (5)$$

onde  $N_m$  compreende o número de pontos de medição,  $S$  é a área total da superfície de medição e  $S_i$  é a área parcial associada à posição de microfone  $i$ . Nota-se que, para uma superfície de medição contendo posições de microfones associadas a áreas parciais iguais (como ocorre, por exemplo, na Figura 8c), a Equação (5) pode ser simplificada para:

$$\overline{L'_p} = 10 \log \left( \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} 10^{0,1L'_{pi}} \right) \quad (6)$$

pois  $S = \sum_{i=1}^{N_m} S_i$ .

Deve-se, então, descontar as correções  $K_1$  e  $K_2$ , que consideram, respectivamente, as influências do ruído de fundo e de som absorvido ou refletido pelo ambiente, e serão explicadas nas Seções 2.3.2 e 2.3.3. Aplicados esses parâmetros, tem-se:

$$\overline{L_p} = \overline{L'_p} - K_1 - K_2 \quad (7)$$

A expressão geral que relaciona a potência e a intensidade sonora é a Equação (2). A integral envolve o produto escalar da intensidade com o elemento de área, ou seja, apenas a componente normal da intensidade que atravessa a área é considerada. A intensidade sonora é dada pelo produto:

$$\mathbf{I} = p' \mathbf{u} \quad (8)$$

onde  $p'$  é a pressão sonora e  $\mathbf{u}$  é a velocidade da partícula. No campo afastado (caso em que  $kr \gg 1$ , onde  $k$  é o número de onda da onda sonora e  $r$  é a distância) pode-se relacionar a velocidade da partícula com a pressão sonora através de [33]:

$$u \approx \frac{p'}{\rho_0 c} \quad (9)$$

sendo  $\rho_0$  a densidade do fluido e  $c$  a velocidade do som no ar. Então, é possível determinar a potência sonora combinando a Equação (2) com a Equação (8), chegando-se à expressão:

$$P = \frac{1}{\rho_0 c} \int_S \overline{p'^2} dS \quad (10)$$

Finalmente, se a medição é feita em campo livre ou em câmara anecóica, em pontos discretos “i”, numa área que envolve a fonte,

$$P = \frac{S_{total} \overline{p'^2}}{\rho_0 c} \quad (11)$$

Aplicando logaritmo a ambos os lados e inserindo os valores de referência  $P_0$  e  $p'_0$ ,

$$\begin{aligned} L_w &= 10 \log \left( \frac{S_{total} \overline{p'^2}}{\rho_0 c P_0} \right) = 10 \log \left( \frac{S_{total} p'_0{}^2 \overline{p'^2}}{\rho_0 c P_0 p'_0{}^2} \right) \\ &= \overline{L_p} + 10 \log \left( \frac{S_{total}}{S_0} \right) + 10 \log \left( \frac{S_0 p'_0{}^2}{\rho_0 c P_0} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

Como  $10 \log \left( \frac{S_0 p'_0{}^2}{\rho_0 c P_0} \right) \cong 0$ , pode-se desconsiderar este termo, chegando à:

$$L_w \approx \overline{L_p} + 10 \log \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad (13)$$

expressão que permite obter o nível de potência sonora.  $S$  é a área da superfície de medição, em metros quadrados, calculada como descrito na Seção 2.3.1;  $S_0$  é a área de referência,  $1 m^2$  e, da Equação (7), tem-se  $\overline{L_p}$ .

### 2.3.1. Cálculo da Área S

Tomando como referência a Figura 6, tem-se que a expressão para a área  $S$  da superfície de medição, no caso de a fonte estar situada apenas em um plano refletor, é dada por:

$$S = 4(ab + bc + ca) \quad (14)$$

Sendo  $2a, 2b$  e  $c$  o comprimento, largura e altura da superfície de medição e  $l_1, l_2$  e  $l_3$  o comprimento, largura e altura da caixa de referência, respectivamente, temos:

$$a = 0,5l_1 + d$$

$$b = 0,5l_2 + d$$

$$c = l_3 + d$$

### 2.3.2. Cálculo de $K_1$

O ruído de fundo é definido como qualquer ruído que não seja proveniente da fonte em estudo. É evidente que é importante descontá-lo no cálculo do nível de pressão sonora — Equação (7) — antes de aplicar essa última no cálculo da potência sonora — Equação (11). Para isso, a norma define o parâmetro  $K_1$ : correção do ruído de fundo. Primeiro, deve-se obter o nível médio de pressão sonora do ruído de fundo:

$$\overline{L_{p(B)}} = 10 \log \left( \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} 10^{0,1L_{pi(B)}} \right) \quad (15)$$

onde  $L_{pi(B)}$  é o nível de pressão sonora do ruído de fundo medido na posição de microfone  $i$  e  $S_i$  é a área parcial, em metros quadrados, da superfície de medição associada ao  $i$ ésimo microfone.

A norma preconiza que as medições de ruído de fundo ( $L_{pi(B)}$ ) devem ser realizadas com a fonte de ruído desligada em cada posição de microfone antes e depois da medição do ruído da fonte propriamente dito, sendo  $L_{pi(B)}$  o maior valor entre o medido antes e depois. Entretanto, no caso de o ruído de fundo se manter aproximadamente constante durante toda a medição, isso é equivalente ao que será obtido realizando-se uma única medição

com a fonte desligada, e tal procedimento simplificado pode ser adotado.

$K_1$  é, então, dado por:

$$K_1 = -10 \log(1 - 10^{-0,1\Delta L_p}) \quad (16)$$

sendo  $\Delta L_p$  dado pela diferença  $\Delta L_p = \overline{L'_p} - \overline{L_{p(B)}}$ .

Essa diferença entre o nível de pressão sonora não-corrigido da fonte ( $\overline{L'_p}$ ) e o nível médio de pressão sonora do ruído de fundo deve ser de pelo menos 6 dB. Se  $\Delta L_p > 15 \text{ dB}$ ,  $K_1$  é tão pequeno que é assumido como zero.

### 2.3.3. Cálculo de $K_2$

O termo  $K_2$  é dado por  $K_2 = 10 \log \left[ 1 + 4 \left( \frac{S}{A} \right) \right]$ , onde  $A$  é a área de absorção sonora equivalente<sup>2</sup> do local onde foi feita a medição.  $K_2$  é uma correção que também deve ser aplicada ao nível médio de pressão sonora na Equação (7). Ela leva em conta o efeito de reverberação das ondas sonoras nas proximidades que pode aumentar os níveis de pressão que são detectados no aparelho.

Além do(s) plano(s) refletor(es) onde está situada a fonte, o ambiente de testes deve estar livre, tanto quanto possível, de objetos que possam refletir ou absorver ondas sonoras<sup>3</sup>. Além disso, cada plano refletor deve ser pelo menos 0,5 m maior que a superfície de medição usada.

---

<sup>2</sup> Existem três métodos de cálculo para a área  $A$ , mas para a maioria das aplicações da norma ISO 3744, pode-se utilizar a equação de Sabine do tempo de reverberação:  $A = 0,16 \left( \frac{V}{T_n} \right)$ , onde  $V$  é o volume da sala de testes e  $T_n$  é o tempo de reverberação medido. Ver [11] para os outros métodos de cálculo.

<sup>3</sup> Para efeitos de aplicação da norma, considera-se que um objeto nas proximidades pode estar refletindo som se a sua largura excede um décimo da distância entre ele e a fonte.

O valor de  $K_2$  é considerado zero se as medições forem feitas em câmaras semianecóicas que satisfaçam as condições da ISO 3745 [25]. Também se pode desconsiderar esse parâmetro quando a medição é feita ao ar livre em uma superfície sólida e plana (concreto e asfalto são, em geral, superfícies aceitáveis), onde não haja objetos refletores nas proximidades (leia-se: a uma distância igual a 10 vezes a maior distância entre o centro geométrico da fonte e os pontos de medição). Nesse caso o valor de  $K_2$  é assumido menor do que 0,5 dB e pode ser ignorado.

É importante mencionar que, caso  $K_2$  seja maior que 4 dB, a norma que foi utilizada para as medições deste trabalho não pode ser aplicada. Em lugar dela, deve-se recorrer às normas ISO 3743 [23] [24], ISO 3747 [27], ISO 9614-1 [34] ou ISO 9614-2 [35] para métodos com precisão de classe 2 ou ainda à ISO 3746 [26], para resultados com precisão de classe 3. Caso o valor de  $K_2$  seja inferior a 4 dB, deve-se proceder à incorporação deste na Equação (7).

### **3. Medições**

As medições de nível de pressão sonora dos ônibus foram realizadas em dois locais: na área do estacionamento do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (Cenpes II) e entre o prédio do alojamento estudantil e o Pólo de Biotecnologia do Rio de Janeiro (BIO-RIO) — Figura 14 e Figura 15, respectivamente — ambos situados no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), na Ilha do Fundão. No primeiro local, o espaço foi reservado, mediante autorização especial, para ser utilizado em quatro sábados, dias em que o movimento de carros no estacionamento e nas proximidades é praticamente inexistente. Já nas proximidades do BIO-RIO, buscou-se o ponto mais afastado, com menos objetos e menor tráfego nas

proximidades. Tais precauções foram tomadas para que as condições fossem tão próximas quanto possível da condição ideal de campo livre e das especificidades mencionadas na Seção 2.3.3, além de proporcionar baixo ruído de fundo.



**Figura 14 - Local de Medição: Estacionamento do Cenpes II.**



**Figura 15 - Local de Medição: Próximo ao BIO-RIO**

Os ônibus tiveram seus níveis de pressão sonora medidos na condição parado com velocidade constante de rotação do motor, sendo todos ônibus que fazem parte do transporte integrado da UFRJ na Ilha do Fundão, com motor dianteiro de potência máxima 2200 W (exemplos na Figura 15 e na Figura 16) e foram reservados com a empresa administradora para as medições. As medições foram feitas em três modelos de ônibus e em seis datas, informados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Datas, modelos de ônibus e locais de medição**

Medição	Data	Modelo	Potência máxima do motor (W)	Velocidade de Rotação do Motor (RPM)	Local de medição
1	15/04/2013	N/D	2200	1650 (3/4 P)	Bio-Rio
2	18/05/2013	M. BENZ/ M POLO TORINO U	2200	1650 (3/4 P)	CENPES
3	10/12/2013	M. BENZ/ M POLO TORINO U	2200	1650 (3/4 P)	Bio-Rio
4	20/05/2013	Mascarello - Gran Via	2200	1650 (3/4 P)	Bio-Rio
5	25/05/2013	M. BENZ/ M POLO TORINO U	2200	1650 (3/4 P)	CENPES
6a	07/12/2013	M.BENZ/M.POLO TORINO U	2200	1100 (1/2 P)	CENPES
6b				1650 (3/4 P)	
6c				2200 (P)	



**Figura 16 - Ônibus no qual foi feita a medição no dia 18/05/2013**

Como recomendado no início da Seção 2.3, a medição foi feita simulando as condições típicas de operação da fonte. Foi escolhida a situação em que a velocidade de rotação do motor corresponde à 3/4 da potência máxima do motor. De fato, a norma brasileira NBR 9714, que foi baseada na ISO 5130, determina que as medições de ruído nas proximidades do sistema de escapamento devem ser feitas nessa velocidade de rotação. Na sexta data de medição, outras velocidades foram avaliadas, para efeito de comparação.

### **3.1. Aparato Experimental**

Para as medições dos níveis de pressão sonora foram utilizados três medidores integradores de nível sonoro, semelhantes ao mostrado na Figura 17, da fabricante 01dB. Dois de nível de precisão classe 2 (números de série 341 e 469) e um de nível de precisão classe 1 (“Solo Black”, número de série 5070).



**Figura 17 - 01dB Solo Black Edition [36]**

Disponha-se também de um calibrador “CAL02 Sound Calibrator, Type 2, 94 dB” (número de série 84474), certificado pela última vez em 24/09/2012, que permitiu aferir a regulagem dos medidores integradores.

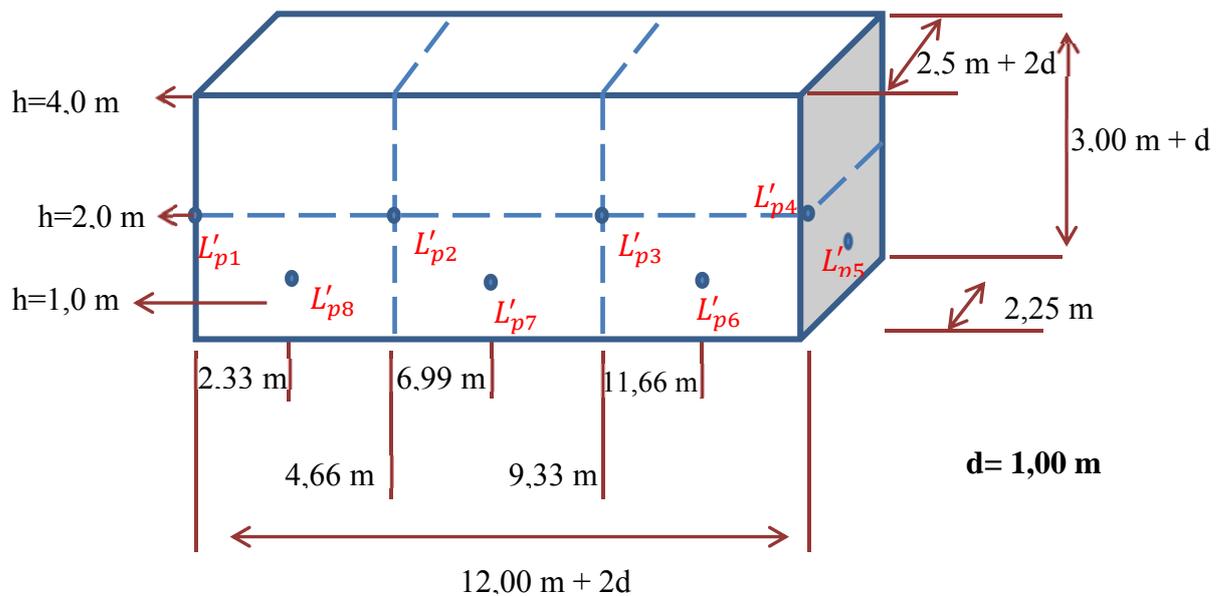
Além desses equipamentos, foram utilizados um termohigrômetro (Minipa – MT-242) para medir temperatura e umidade, fita métrica, tripés, suportes e protetores para microfones.

Quanto aos dados obtidos, estes foram, nos dias de medição 1 e 2, gravados diretamente no medidor integrador e posteriormente transferidos para o computador através do software dBTRAIT versão 5.3.1. Nos demais dias, foi utilizado *in situ* um notebook HP ProBook 4530s com o software dBFA Suite versão 4.9 que permite armazenar os dados diretamente no computador no momento da medição. Para o tratamento dos dados, foi utilizado o software dBFA versão 4.9.

### **3.2. Procedimento Experimental**

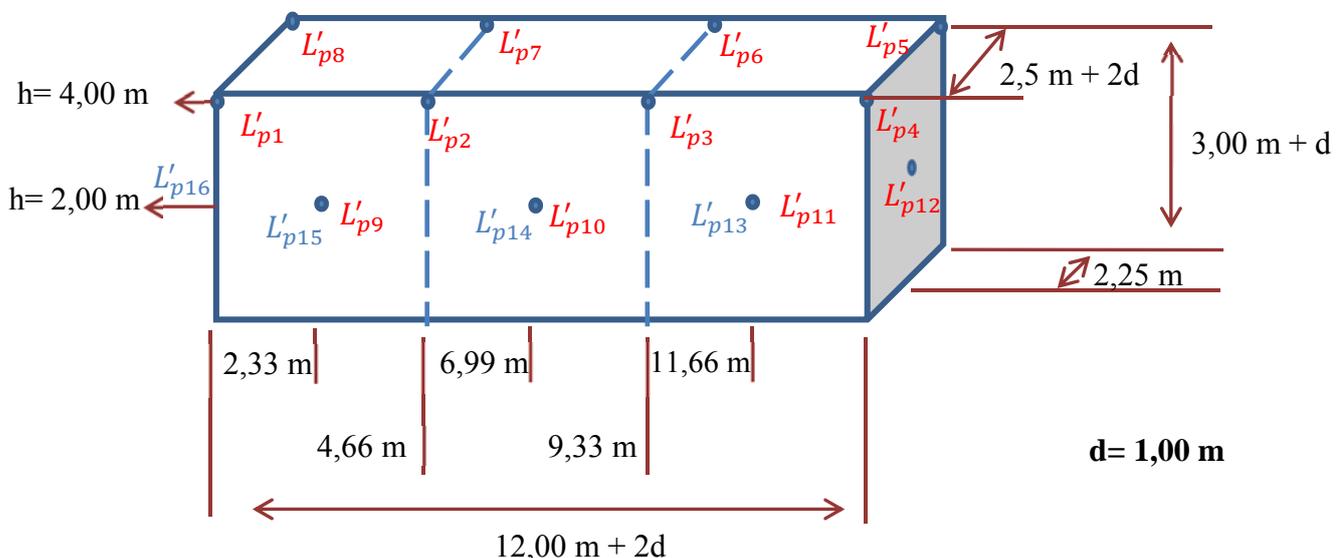
Nos seis dias de medição (ver Tabela 2) os ônibus foram submetidos a diferentes procedimentos, visando experimentar as diferentes opções preconizadas pela norma e comparar os valores obtidos, para encontrar a forma mais prática e rápida de se obter uma estimativa razoável da potência sonora de ônibus na condição parado. As três primeiras medições foram realizadas segundo o procedimento de medir a pressão sonora em pontos fixos ao longo da superfície de medição, enquanto que, nas três últimas, esta teve seu entorno percorrido em alturas definidas com velocidade constante. A caixa de referência é considerada como tendo as mesmas dimensões dos ônibus, as quais foram aproximadas a partir das informações do fabricante: comprimento 12 m, largura 2,5 m e altura 3 m [37]:

1) Na Medição 1 foi estabelecida uma superfície de medição com dimensões conforme a Figura 18. Os círculos correspondem às posições dos microfones. Verifica-se que, neste primeiro momento, foi medida cerca de 1/6 da superfície de medição.



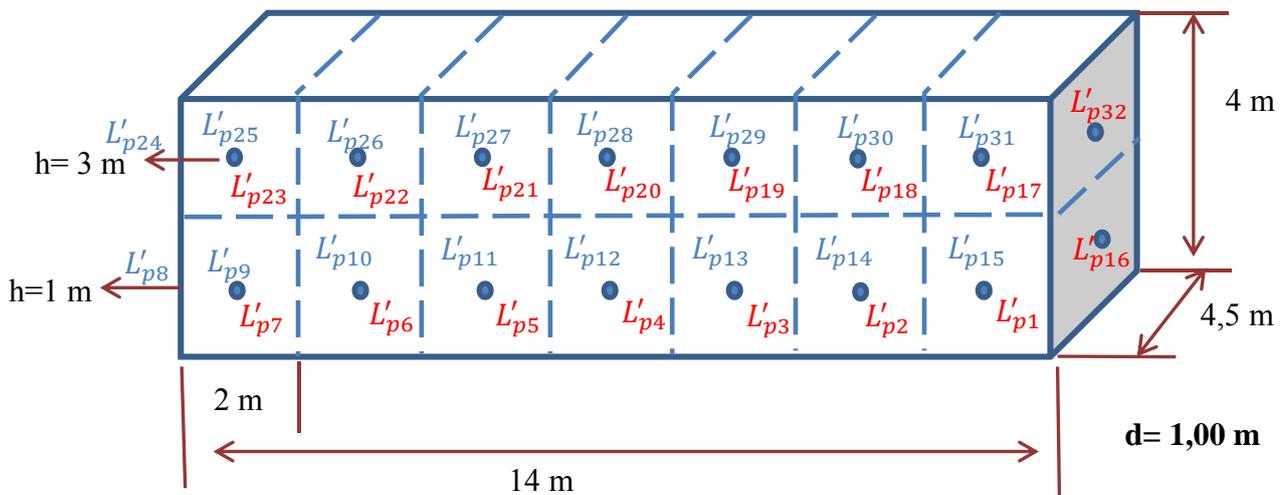
**Figura 18 - Medição 1: Superfície de medição**

2) Na Medição 2, o número de pontos foi bem maior e estes foram dispostos de maneira diferente (ver Figura 19). Os pontos em azul estão localizados simetricamente do outro lado da superfície de medição (por exemplo,  $L'_{p11}$  e  $L'_{p13}$  ou  $L'_{p12}$  e  $L'_{p16}$ ).



**Figura 19 - Medição 2: Superfície de medição**

- 3) A Figura 20 mostra a superfície de medição adotada no terceiro dia de medição. Pode-se observar que mais pontos foram tomados em toda a lateral do ônibus, sendo válida a mesma observação feita para a Medição 2 quanto aos pontos simetricamente opostos. Nesse dia, a tampa exterior do motor, que fica localizada na frente do ônibus (Figura 16) foi deixada acidentalmente aberta, deixando-o exposto. Isso levou à captação de um nível de pressão sonora bastante alto nessa região e influenciou consideravelmente o resultado de  $L_w$ , como será visto na Seção 4.



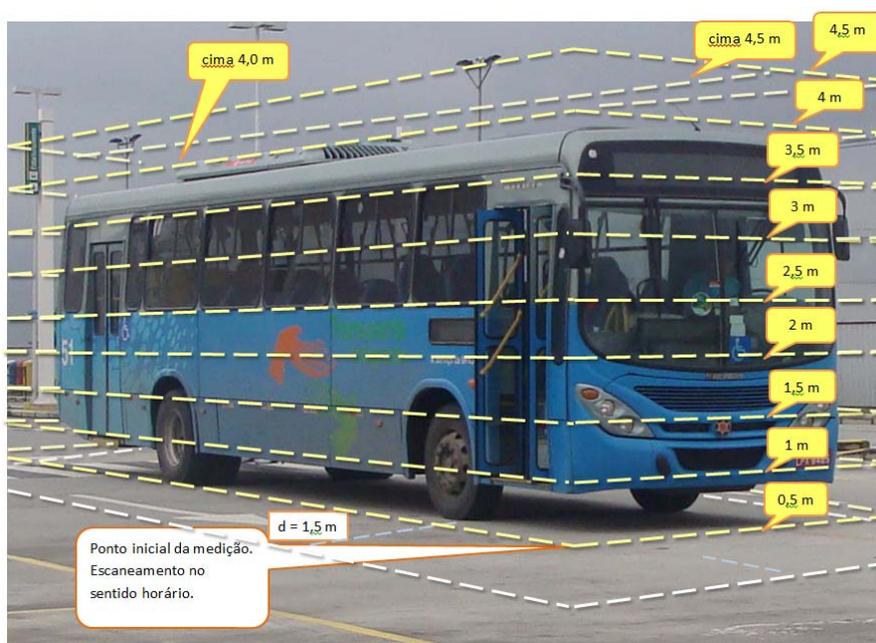
**Figura 20 - Medição 3: Superfície de medição**

- 4) A medição 4 foi a primeira em que foi realizado o procedimento de escanear a superfície de medição com velocidade constante (método das varreduras). As alturas em que foram feitas as varreduras, além da distância de medição e o sentido em que o trajeto foi percorrido estão mostrados na Figura 21. O software dBFA acoplado ao notebook (ver Seção 3.1) permitia gravar um valor de nível de pressão sonora a cada 0,1 segundo, de maneira que, a cada varredura que durava por volta de 1 minuto, eram obtidas cerca de 600 leituras de  $L_p$ . A distância de medição foi 1 m.



**Figura 21 - Medição 4: Superfície de medição com as alturas das varreduras, distância de medição e sentido percorrido**

5) No quinto dia de medição, realizou-se um procedimento semelhante ao empregado na Medição 4. Porém, como mostrado na Figura 22, foram realizadas varreduras em mais alturas e a distância de medição foi de 1,5 m. Foram feitas, também, varreduras em duas alturas percorrendo uma linha diretamente acima do ônibus, em sua largura média.



**Figura 22 - Medição 5: Superfície de medição com as alturas das varreduras, distância de medição e sentido percorrido**

- 6) Durante o sexto e último dia de medição, com o intuito de verificar como o nível de potência sonora variaria com diferentes velocidades de rotação do motor, foram realizadas medições, segundo o método das varreduras, com o motor sendo solicitado a 1100 rpm e 2200 rpm, além da rotação típica empregada, 1650 rpm (ver Tabela 2). A distância de medição utilizada foi 1 m. Ainda, assim como feito na Medição 5, para obter o nível de pressão sonora na parte superior da superfície de medição, foi feita uma varredura acima do ônibus e em sua largura média (a qual coincide com a largura média da superfície de medição),  $L'_{ps3,5m}$  (Figura 23).

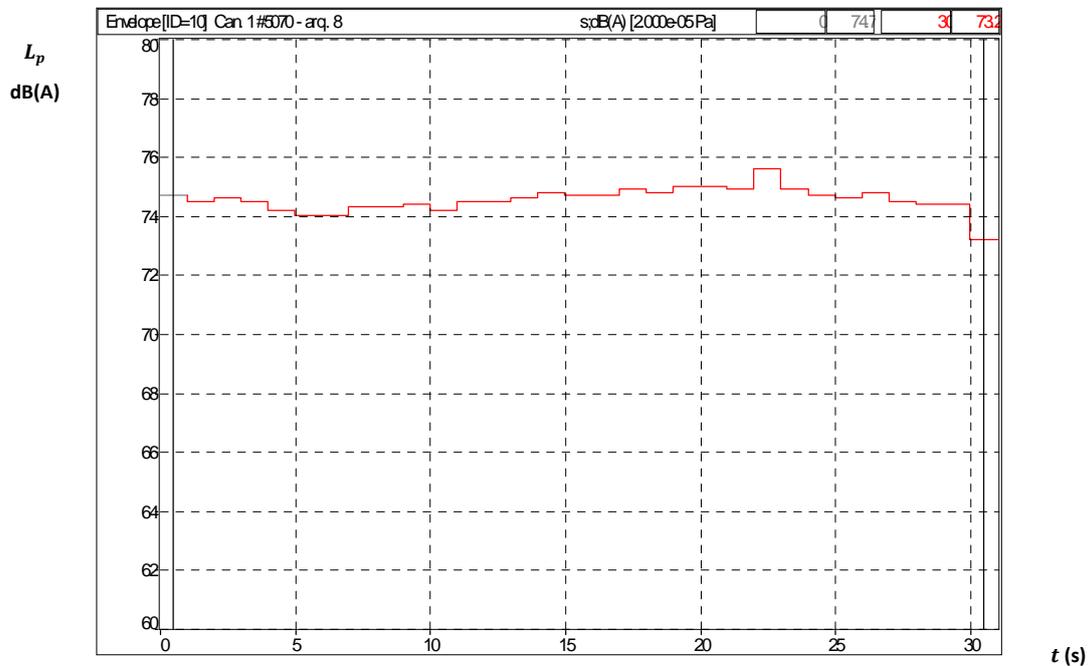


**Figura 23 - Medição 6: Superfície de medição com as alturas das varreduras e distância de medição**

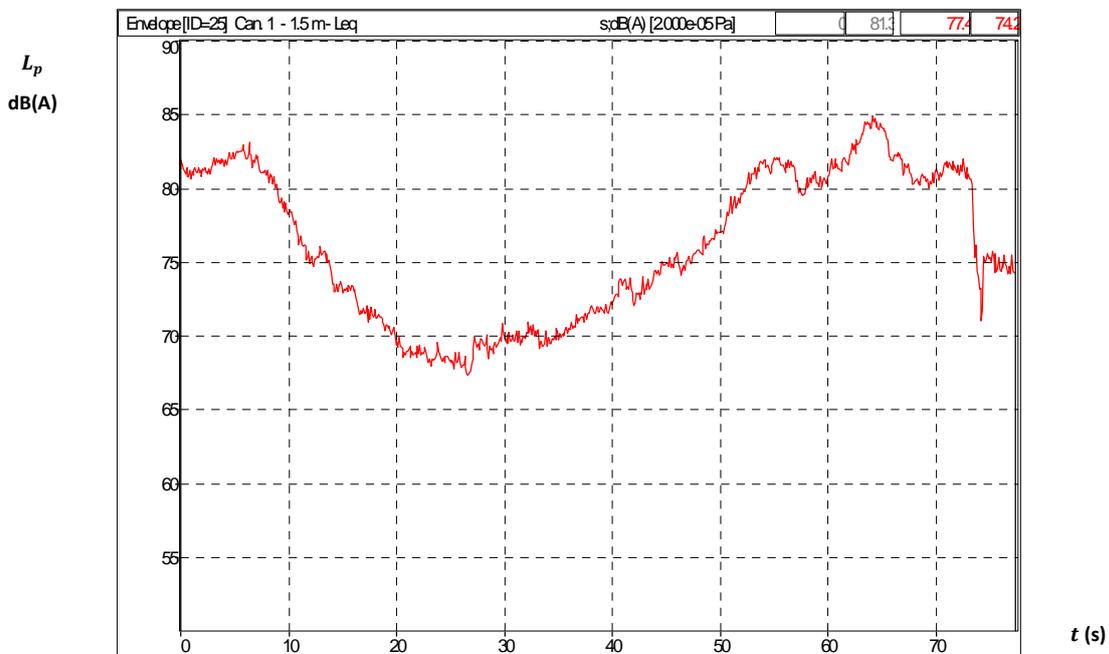
## 4. Resultados e Discussão

A Figura 24 ilustra um gráfico  $L_p \times t$  típico obtido com as medições ao tratar os dados no software dBFA. Especificamente, esta se refere à medição em pontos fixos correspondente ao ponto  $L'_{p1}$  na Medição 1 (ver Figura 18). Já a Figura 25 mostra o gráfico referente à varredura  $L'_{p1,5m}$  da Medição 4, realizada percorrendo a superfície de medição. A diferença no número de elementos (30 e 774) se dá devido ao fato de o

segundo procedimento computar valores a cada 0,1 segundos, enquanto o primeiro o faz em intervalos de 1 segundo. O software também permite gerar tabelas com os valores, que foram utilizadas para o tratamento de dados e os cálculos. A memória de cálculo está apresentada no Anexo A.



**Figura 24 – Evolução do nível de pressão sonora em função do tempo no ponto  $L'_{p1}$  da Medição 1**



**Figura 25 – Evolução do nível de pressão sonora em função do tempo ao longo da varredura  $L'_{p1,5m}$  da Medição 4**

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos ao tratar os dados de cada um dos seis dias de medição utilizando as equações descritas na Seção 2. São apresentados: o número de pontos de medição (N), além dos valores do nível médio de pressão sonora na superfície de medição ( $\overline{L_p}$ ), do nível médio de pressão sonora do ruído de fundo ( $\overline{L_{p(B)}}$ ), do parâmetro  $K_1$  correspondente, da área total da superfície de medição (S) e, finalmente, do nível de potência sonora ( $L_w$ ). Os cálculos estão mostrados no Anexo A.

**Tabela 3 - Resultados obtidos em cada uma das seis medições**

Medição <i>i</i>	N	$\overline{L_p}$ dB(A)	$\overline{L_{p(B)}}$ dB(A)	$\Delta L_p$ dB(A)	$K_1$ dB(A)	S m <sup>2</sup>	$L_{wi}$ dB(A)
1	8	85,9	68,8	17,1	0	211	109,1
2	16	74,3	50,9	23,4	0	211	97,5
3	32	79,0	56,4	22,6	0	211	102,2
4	3969	75,6	64,4	11,2	0,31	211	98,9
5	7992	75,5	54,9	20,6	0	267	99,8
6a	4136	71,8	57,9	13,9	0,17	211	95,0
6b	4173	74,7	57,9	16,8	0	211	97,9
6c	3611	79,1	57,9	21,2	0	211	102,3

É importante notar que o parâmetro  $K_1$  foi considerado nulo quando  $\Delta L_p$  foi superior a 15 dB(A), de acordo com a Seção 2.3.2. Realmente, na Medição 1, por exemplo, o  $K_1$  calculado foi 0,08 dB(A), podendo ser desconsiderado. O parâmetro  $K_2$  foi avaliado como sendo zero em todas as medições, pois foi considerado que as condições para isso, explicitadas na Seção 2.3.3, foram satisfeitas durante as medições.

Cabe ressaltar que  $\overline{L_p}$  foi calculado pela Equação (6). De fato, a diferença entre o  $\overline{L_p}$  obtido para as três primeiras medições com essa equação e o obtido através da Equação (5), que envolve mais operações matemáticas, foi de no máximo 0,5 dB(A). Isso ocorre porque as áreas parciais  $S_i$  da superfície de medição associadas a cada ponto de microfone, quando variam, variam muito pouco. Na superfície de medição 1, por exemplo, como mostrado na Figura 18,  $S_i = 9 \text{ m}^2$  à frente do ônibus e  $S_i = 9,32 \text{ m}^2$  nas laterais, o que são valores próximos.

As três medições à 1650 rpm realizadas percorrendo a fonte, isto é, Medições 4, 5 e 6b, apresentaram resultados muito próximos. Como elas são, em princípio, mais confiáveis, dado o número superior de pontos de medição e o fato de nelas a superfície de medição ter sido percorrida de maneira quase tão integral quanto era factível na prática, foi feito um tratamento estatístico simples nesses três resultados, obtendo o valor médio e a incerteza desse conjunto de dados. O valor de  $L_w$  para esses ônibus acelerando a essa rotação (que será representado por  $L_{wo}$ ) é, portanto:

$$L_{wo} = 98,9 \pm 0,9 \text{ dB(A)}$$

que é idêntico ao valor obtido com a Medição 4. É interessante notar que um nível de potência sonora de aproximadamente 100 dB(A) é também típico para automóveis em velocidade de autoestrada [38], embora a potência sonora emitida por veículos em movimento dependa da velocidade e outros fatores.

A norma ressalta que a incerteza na medição da potência sonora deve ser estimada através do desvio padrão total ( $\sigma_{tot}$ ), em decibéis. Nesse contexto, o desvio padrão total, por sua vez, depende do desvio padrão da reprodutibilidade do método,  $\sigma_{ro}$  e do desvio padrão devido à instabilidade das condições de montagem e operação da fonte,  $\sigma_{omc}$ . Assim,

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{ro}^2 + \sigma_{omc}^2} \quad (15)$$

e o modelo para o cálculo da incerteza de medição é o seguinte:

$$U = k\sigma_{tot} \quad (16)$$

onde  $U$  é a incerteza da medição e  $k$  é chamado de “fator de abrangência”, que no caso de distribuição normal dos valores medidos, corresponde à  $k = 2$ . Quanto à  $\sigma_{omc}$ , a norma estabelece que ele pode ser estimado como 0,5 dB, quando a potência sonora em questão variar pouco com o tempo e o procedimento de medição for adequadamente montado. Já  $\sigma_{ro}$  pode ser determinado de maneira complexa através de modelagens matemáticas que consideram cada fonte de incerteza (como incertezas instrumentais,

nas posições dos microfones e condições do ambiente) separadamente como um par  $c_i u_i$ , onde  $c$  e  $u$  são parâmetros tabelados para diferentes situações, e relaciona-os através de uma expressão da forma  $\sigma_{r_o} = \sqrt{(c_1 u_1)^2 + (c_2 u_2)^2 + \dots + (c_n u_n)^2}$ . Mas tem-se que na maioria dos casos, em medições feitas na ponderação A,  $\sigma_{r_o}$  não é maior que 1,5 dB, sendo esse considerado o valor máximo estimado para a maioria das aplicações da norma. Substituindo-se esses valores nas Equações (15) e (16), tem-se que a incerteza nas medições pode ser estimada por:

$$U = 2 \times \sqrt{(0,5)^2 + (1,5)^2} \cong 3,2 \text{ dB}$$

Dentre as medições segundo o método dos pontos fixos (Medições 1, 2 e 3 — ver Tabela 3), a Medição 2 foi aquela que apresentou resultado mais próximo de  $L_{w_o}$ . Portanto, ela será utilizada para o cálculo dos índices de direcionalidade aparente segundo a expressão dada na Seção 2.2, pois é importante que esse cálculo seja feito em uma medição que considere pontos fixos com distância razoável entre eles, já que o objetivo deste cálculo é saber se mais pontos de medição deveriam ser utilizados em uma dada subárea  $S_i$  (região em que  $|D_{li}| > 5$ ). Os resultados desse cálculo, para cada ponto de medição, são dados na Tabela 4 (ver Figura 19):

**Tabela 4 - Valores do índice de direcionalidade aparente para a Medição 2**

Ponto de medição	$L'_{p1}$	$L'_{p2}$	$L'_{p3}$	$L'_{p4}$	$L'_{p5}$	$L'_{p6}$	$L'_{p7}$	$L'_{p8}$
$D_{li}$ dB(A)	-7,4	-4,1	-1	1,9	1,4	-1,7	-6,1	-9,2
Ponto de medição	$L'_{p9}$	$L'_{p10}$	$L'_{p11}$	$L'_{p12}$	$L'_{p13}$	$L'_{p14}$	$L'_{p15}$	$L'_{p16}$
$D_{li}$ dB(A)	-4,4	-1	4,8	6,9	3,7	-0,6	-4,9	-10,1

É possível observar na Figura 19 que os pontos em que o índice de direcionalidade aparente excedeu  $\pm 5$  dB foram justamente aqueles situados mais próximos ao motor dianteiro e ao escapamento traseiro, que são as maiores fontes de ruído. Esse resultado

já era esperado, pois outro dos critérios descritos na Seção 2.2 para decidir se mais pontos devem ser considerados é a fonte possuir regiões relativamente pequenas em que seja emitida grande parte do ruído.

Como foi mencionado na Seção 1.4, é possível estimar o nível de pressão sonora emitido pela fonte a uma dada distância através do nível de potência sonora. Isso pode ser feito através da Equação (15), que considera que a fonte é uma fonte pontual que irradia ondas sonoras omnidirecionalmente [16]:

$$L_p = L_w + 10 \log\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\right) \quad (17)$$

onde  $Q$  é o fator de direcionalidade, que indica a distribuição da energia sonora irradiada nas diferentes direções. Quando a fonte está situada no chão, ela irradia em uma semi-esfera e  $Q = 2$ . A partir de  $L_{w0}$  foram calculados os valores de  $L_p$  para diversas distâncias. Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 5:

**Tabela 5 – Níveis de pressão sonora calculados a partir de  $L_{w0}$  para diversas distâncias**

Distância m	$L_p$ dB(A)
5	77
6	75
7	74
10	71
15	67

Todos os níveis de pressão sonora da Tabela 5, mesmo o que a fonte emite a 15 metros de distância, são muito superiores aos níveis 55 dB(A) para o período diurno e 50 dB(A) para o período noturno que são considerados compatíveis com o conforto acústico para áreas predominantemente residenciais segundo a NBR 10151 [39], a qual

“fixa as condições exigíveis para avaliação da aceitabilidade do ruído em comunidades, independente da existência de reclamações”.

Na tentativa de simplificar o processo de medição, foram feitas considerações e cálculos para verificar quantos e quais pontos são necessários para se obter uma estimativa razoável do nível de potência sonora. Os principais resultados são dados abaixo (o nível de potência sonora obtido na Medição  $i$  será chamado de  $L_{wi}$ ):

Na Medição 1 obteve-se um valor para  $L_{w1}$  bastante superior a  $L_{w0}$ , porque a região da superfície de medição tomada foi aquela em que se encontram os pontos mais próximos da maior fonte de ruído, que é o motor. Assim, quando é feita a média logarítmica para obter o  $\overline{L'_p}$  dessa medição, o valor resultante é bastante alto;

Já a Medição 2, na qual mais pontos de microfones (em comparação com a Medição 1) foram utilizados em todo o entorno da superfície de medição, resultou em um valor de  $L_{w2}$  bastante próximo de  $L_{w0}$ . Ora, a Medição 2 é drasticamente mais simples de ser realizada que as medições feitas pelo método das varreduras, de maneira que o fato de ser possível obter uma estimativa tão razoável do nível de potência sonora dos ônibus considerando relativamente poucos pontos fixos é um resultado interessante;

Provavelmente o valor de  $L_{w3}$  seria ainda mais próximo à  $L_{w0}$  caso a tampa do motor não estivesse aberta durante as medições, pois, analisando os dados, pode-se verificar que este fato provocou um aumento de 5 dB(A) nos níveis médios de pressão sonora próximos ao motor, em comparação com os níveis da medição 2 (por exemplo, 86 dB(A) e 81 dB(A) medidos na frente do ônibus, respectivamente);

Analisando os dados, pode-se perceber que os  $L'_p$  medidos acima do ônibus, obtidos nas Medições 5 e 6b são pelo menos 10 dB(A) inferiores aos obtidos na varredura realizada à 0,5 m do solo (que é aproximadamente a altura do motor). Essa diferença de 10 dB(A) significa que o valor quadrático médio da pressão acima do ônibus é dez vezes menor e não deve contribuir substancialmente para o cálculo. De fato, os resultados obtidos para  $L_{w5}$  e  $L_{w6b}$  sem incluir as medições acima do ônibus foram apenas 0,3 dB(A) e 0,5 dB(A) superiores ao resultado obtido considerando-os. Observe-

se que, em princípio, desconsiderar pontos fixos de medição ou varreduras nos cálculos deveria diminuir o valor obtido para o nível de potência sonora. Entretanto, como a área total  $S$  é sempre a mesma, pois foi utilizada a Equação (6) para os cálculos, o efeito de desconsiderar pontos é aumentar o valor de  $\overline{L_p}$ , o que corresponde a um acréscimo no nível de potência sonora. De qualquer forma, o valor absoluto da diferença entre os cálculos — que é o importante para essa discussão — é o mesmo). Como as diferenças entre os resultados não foram maiores que 0,5 dB(A), de acordo com o descrito na norma ISO 3744 e na Seção 2.2, tais pontos podem ser descartados em medições futuras, o que já é uma simplificação considerável, já que estes são os pontos mais laboriosos de serem medidos.

Seguindo esse mesmo raciocínio, foram feitos os cálculos de  $L_w$  na Medição 5 desconsiderando cada vez mais varreduras, de cima para baixo. Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 6. Nota-se que, em média, a diferença que se obtém ao desconsiderar uma varredura é de apenas 0,4 dB(A) no resultado. Comparando com o resultado obtido com todos os pontos,  $L_{w4} = 98,9$  dB(A) (Tabela 3), observa-se, por exemplo, que não ter realizado as cinco varreduras superiores forneceria um resultado que difere em apenas 2 dB(A) do resultado obtido com todas elas.

**Tabela 6 - Medição 5: resultados obtidos com cálculos simplificados considerando apenas algumas varreduras**

Varreduras consideradas	$L_w$ dB(A)
0,5 m à cima 4 m	100,1
0,5 m a 4,5 m	100,5
0,5 m a 4,0 m	100,9
0,5 m a 3,5 m	101,3
0,5 m a 3 m	101,7
0,5 m a 2,5 m	102,2
0,5 m a 2,0 m	102,7
0,5 m a 1,5 m	103,2
0,5 m a 1,0 m	103,5
0,5 m	103,7

## 5. Conclusão

Foi feito um procedimento para medir o nível de potência sonora de alguns modelos de ônibus através de medições do nível de pressão sonora segundo o método descrito na norma ISO 3744:2010. O resultado obtido foi  $L_{wo} = 98,9$  dB(A) como sendo o valor aceito para o nível de potência sonora dos ônibus medidos na condição parado com velocidade constante de rotação do motor de 1650 rpm, sendo a incerteza da medição estimada em 3,2 dB(A). Medições também foram feitas para outras velocidades de rotação, fornecendo os resultados 95,0 dB(A) para 1100 rpm e 102,3 dB(A) para 2200 rpm. Isso mostra que ao dobrar, dessa maneira, a velocidade de rotação do motor, há um aumento de 7 dB(A) no resultado do nível de potência sonora.

A medição dos níveis de pressão sonora para o cálculo de  $L_w$  para ônibus semelhantes aos dos modelos estudados pode ser feita, com precisão considerável, considerando apenas alguns pontos fixos no entorno da superfície de medição (a Medição 2, feita com 16 pontos fixos, apresentou resultado 1,5 dB(A) menor que  $L_{wo}$ ). Mais pontos de medição ou o método das varreduras podem ser empregados quando se desejar precisão maior. De qualquer forma, algumas simplificações do método podem ser aplicadas para a medição do nível de potência sonora dessas fontes, pois a diferença obtida entre os resultados com e sem tais simplificações não foi maior que 0,5 dB(A):

- Não é necessário utilizar a Equação (5), que considera que as áreas parciais são desiguais, para o cálculo do nível médio de pressão sonora na superfície de medição, podendo ser aplicada a Equação (6), que assume que as áreas parciais na superfície de medição são iguais;
- Não é necessário empregar pontos de medição na parte superior da superfície de medição, isto é, diretamente acima do ônibus, pois tais pontos apresentam nível de pressão sonora muito abaixo dos obtidos no restante da mesma.

Os cálculos dos índices de direcionalidade aparente para a Medição 2 indicam que mais pontos de medição devem ser utilizados nas proximidades das maiores fontes de ruído dos ônibus, quais sejam, o motor e o escapamento.

O nível de potência sonora obtido para esses modelos de ônibus permite estimar que o nível de pressão sonora emitido por eles na condição parado acelerando com velocidade de rotação do motor de 1650 rpm é tão alto quanto 77 dB(A) à cinco metros de distância do ônibus, e decai com a distância , sendo 67 dB(A) a 15 metros. Embora essa seja apenas uma estimativa feita aplicando várias hipóteses simplificadoras, esse nível de pressão sonora é bastante alto, levando em consideração o nível de ruído compatível com o conforto acústico segundo a NBR 10151.

## 6. Referências Bibliográficas

1. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for community noise**. World Health Organization, 1999.
2. ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS. Política nacional de transportes públicos. São Paulo: ANTP, 2003. 9p.
3. G1 - BRASIL. Com aumento da frota, Brasil tem um automóvel para 4 habitantes. **G1**, 10 mar. 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/brasil/noticia/2014/03/com-aumento-da-frota-pais-tem-1-automovel-para-cada-4-habitantes.html>>. Acesso em: 14 abr. 2014.
4. MELLO, J. C. Transporte: presente e futuro. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33., 2001, Florianópolis. **Associação Brasileira de Pavimentação**. Florianópolis: ABP, 1994 p. 31-39.
5. SPECHT, L. P. et al. Causas, formas de medição e métodos para mitigação do ruído do tráfego de veículos. **Tecnologia Fortaleza**, Fortaleza, v. 30, n.1, p. 12-26, out. 2009.
6. IMAGINE. Sound power measurements on heavy vehicles to study propulsion noise, Gotemburgo: Volvo Trucks, 18 jun. 2005. 45 p.
7. SANDBERG, U. Tyre/road noise: myths and realities. In: INTERNATIONAL CONGRESS AND EXHIBITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING, 2001, The Hauge. **Anais...** International Institute of Noise Control Engineering, 2001. p. 1-22.
8. GERGES, S. N. Y. **Ruído - Fundamentos e Controle**. Florianópolis: NR, 2000.
9. MUSAFIR, R. E. **Notas de aula da disciplina de Acústica Básica**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, mar. 2010.
10. ROSS, H. E.; MURRAY, D. J. **E.H.Weber on the tacticale senses**. Erlbaum: Taylor and Francis, 1996.
11. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3744:2010**: Determination of Sound Power Levels and Sound Energy Levels of Noise Sources Using Sound Pressure – Engineering Methods for an Essentially Free Field Over a Reflecting Plane. EU, fev. 2011. 78 p.

12. KRUG, R. W. Sound Level Meters. In: CROCKER, M. J. **Encyclopedia of Acoustics**. New York: John Wiley and Sons, 1997. Cap. 155.
13. FERNANDES, J. C. **O ruído ambiental - seus efeitos e seu controle**. Bauru: UNESP, 2002.
14. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **NR. 15**: Norma Regulamentadora do Ministério do Trabalho e Emprego. Atividades e Operações Insalubres, 1978. Brasília, jul. 1978.
15. PETERSEN, E. C. Application Note: An Overview of Standards for Sound Power Determination. **Brüel & Kjaer**, Naerum, Dinamarca, 2005.
16. SENGPIEL, E. Compare Sound power, Sound pressure and Sound intensity in a distance from the sound source. **Sengpiel Audio**, 01 jul. 2014. Disponível em: <<http://www.sengpielaudio.com/calculator-soundpower.htm>>. Acesso em: 22 jul. 2014.
17. VIGGEN, E. M. Sound Power Measurements. **Institutt for elektronikk og telekommunikasjon**, 04 mar. 2011. Disponível em: <<http://www.iet.ntnu.no/courses/ttt4180/lab/compendium.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2014.
18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15145**: Acústica - Medição do Ruído Emitido por Veículos Rodoviários Automotores em Aceleração – Método de Engenharia. Rio de Janeiro, 2004.
19. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9714**: Veículo Rodoviário Automotor – Ruído Emitido na Condição Parado. Rio de Janeiro, 2000.
20. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9614:3**: Acoustics -- Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity -- Part 3: Precision method for measurement by scanning. EU, ago 2003. 34 p.
21. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3741**: Acoustics -- Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure -- Precision methods for reverberation test. EU, jan. 2011. 61 p.
22. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3742**: Acoustics -- Determination of sound power levels of noise sources -- Precision

- methods for discrete-frequency and narrow-band sources in reverberation rooms. EU, 1988.
23. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3743-1**: Acoustics— Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure— Engineering methods for small movable sources in reverberant fields — Part 1: Comparison method for a hard-walled test room. EU, dez. 2009. 36 p.
  24. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3743-2**: Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure — Engineering methods for small, movable sources in reverberant fields — Part 2: Methods for special reverberation test rooms. EU, dez. 2009. 20 p.
  25. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3745**: Acoustics -- Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure -- Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms. EU, jun. 2012. 63 p.
  26. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3746**: Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Survey methods using an enveloping measurement surface over a reflecting plane. EU, mar. 2011. 48 p.
  27. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3747**: Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Engineering/survey methods for use in situ in a reverberant environment. EU, jan. 2010. 43 p.
  28. BRASIL. Lei n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília: DF, 31 ago. 1981.
  29. BRASIL. Lei n.º 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília: DF, 23 set. 1997.
  30. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **CONAMA 418/2009**: Dispõe sobre critérios para a elaboração de Planos de Controle de Poluição Veicular - PCPV e determina novos limites de emissão. Brasília: DF, 25 nov. 2009.
  31. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **CONAMA 272/2000**: Define

novos limites máximos de ruído por veículos automotores na condição de aceleração. Brasília: DF, 29 nov. 2000.

32. SOUZA, H. M. M. Análise experimental dos níveis de ruído produzido por peça de mão de alta rotação em consultórios odontológicos: possibilidade de humanização do posto de trabalho do cirurgião dentista. **ENSP - Fiocruz**, dez. 1998. Disponível em: <[http://portalteses.icict.fiocruz.br/transf.php?script=thes\\_cover&id=000107&lng=pt&nrm=iso](http://portalteses.icict.fiocruz.br/transf.php?script=thes_cover&id=000107&lng=pt&nrm=iso)>. Acesso em: 27 abr. 2014.
33. SVENSSON, Peter. Acoustics Measurements, Ch. 9. **NTNU - Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet: Akustikk Introduksjon**, 30 mai. 2007. Disponível em: <[http://www.iet.ntnu.no/courses/ttt4230/notater/akuintro07\\_foPS2.pdf](http://www.iet.ntnu.no/courses/ttt4230/notater/akuintro07_foPS2.pdf)>. Acesso em: 25 jul. 2014.
34. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9614-1**: Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity — Part 1: Measurement at discrete points. EU, nov. 2009. 19 p.
35. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9614-2**: Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity — Part 2: Measurement by scanning. EU, abr. 1997. 32 p.
36. ACOEM. Solo Black Edition Sound level meter. **Acoem Group**, 2014. Disponível em: <<http://www.acoemgroup.com/catalog/SOLO-Black-Edition-Sound-level-meter-1-0-248-product>>. Acesso em: 19 mai. 2014.
37. MARCOPOLO. Catálogo multimídia. **Marcopolo/Catálogos**, 2011. Disponível em: <<http://www.marcopolo.com.br/website/2011/marcopolo/pt/multimedia/catalogo>>. Acesso em: 12 jul. 2014.  
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15145**: Acústica - Medição do Ruído Emitido por Veículos Rodoviários Automotores em Aceleração – Método de Engenharia. Rio de Janeiro, 2004.
38. ENGINEERING TOOLBOX. Sound power. **The Engineering Toolbox**, jul. 2014. Disponível em: <[http://www.engineeringtoolbox.com/sound-power-level-d\\_58.html](http://www.engineeringtoolbox.com/sound-power-level-d_58.html)>. Acesso em: 21 jul. 2014.
39. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10151**: Acústica – Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas, Visando o conforto da comunidade - Procedimento. Rio de Janeiro, jun. 2000.

## Anexo A – Memórias de Cálculo

Seguem abaixo as memórias de cálculo dos níveis de potência sonora de cada uma das medições. Cabe ressaltar que os níveis de pressão sonora medidos a cada 1 segundo (ou 0,1 segundo quando foi feita a medição acoplado o medidor de nível de pressão sonora ao notebook) foram omitidos, pois são muitos, tendo sido apresentados apenas os  $\overline{L'_{pi}}$  correspondentes.

### Medição 1:

$\overline{L'_{pi}}$		
1		74,57317
2		78,74599
3		82,58043
4		85,85229
5		92,12917
6		87,96372
7		82,55588
8		77,62706
$\overline{L'_p} =$		85,97423
RF=	68,80362988	
$\Delta L_p =$		<b>18,32654727</b>
$K_1 =$		<b>0,06431934</b>
$\overline{L_p} =$		85,8901
a =	7	
b =	2,25	
c =	4	
<b>S =</b>		<b>211</b>
$L_w =$		<b>109,1329</b>

## Medição 2:

$\overline{L'_{pi}}$		
1	66,93236	
2	70,16203	
3	73,3017	
4	76,17802	
5	75,73401	
6	72,64403	
7	68,16884	
8	65,13997	
9	69,9081	
10	73,34539	
11	79,08002	
12	81,17579	
13	78,01847	
14	73,6583	
15	69,38604	
16	64,2205	
$\overline{L'_p} =$		<b>74,30807</b>
RF=	50,92952	
$\Delta L_p =$		<b>23,37855</b>
$K_1 =$		0,019995
$\overline{L_p} =$		<b>74,28808</b>
a =	7	
b =	2,25	
c =	4	
<b>S =</b>		<b>211</b>
$L_w =$		<b>97,5309</b>

### Medição 3:

$\overline{L'_{pi}}$		
1	85,01192	
2	84,59799	
3	78,47493	
4	75,61645	
5	73,29309	
6	70,49671	
7	69,95113	
8	70,68377	
9	71,10466	
10	72,84837	
11	75,63256	
12	78,42518	
13	83,14694	
14	83,05178	
15	85,48244	
16	86,23808	
17	76,6063	
18	77,01011	
19	74,82455	
20	71,79757	
21	69,3322	
22	67,59136	
23	65,8091	
24	65,38149	
25	67,43446	
26	68,69307	
27	71,14343	

28	74,23991	
29	75,73512	
30	77,0904	
31	78,44713	
32	79,16444	
$\overline{L'_p} =$		<b>79,00293</b>
RF=	56,44353	
$\Delta L_p =$		<b>22,5594</b>
$K_1 =$		0,024157
$\overline{L_p} =$		<b>78,97877</b>
a =	7	
b =	2,25	
c =	4	
$S =$		<b>211</b>
$L_w =$		<b>102,2216</b>

### Medição 4:

$\overline{L'_{pl}}$		
4 m	71,90580169	
3 m	72,70961823	
3,5 m	74,20338818	
2,5 m	75,51894967	
2 m	75,68732646	
1 m	78,67336295	
0,5 m	78,43275355	
$\overline{L'_p} =$		<b>75,96692209</b>
RF=	64,43054336	
$\Delta L_p =$		<b>11,53637873</b>
$K_1 =$		0,316123468
$\overline{L_p} =$		<b>75,65079862</b>
a =	7	
b =	2,25	
c =	4	
<b>S =</b>		<b>211</b>
$L_w =$		<b>98,89362318</b>

### Medição 5:

$\overline{L'_{pi}}$		
cima 1.5 m		67,8073454
cima 1 m		67,5818169
4,5 m		70,8195257
4 m		72,1259019
3,5 m		72,6282787
3 m		73,6140547
2,5 m		74,9151974
2 m		76,450692
1,5 m		78,5601461
1 m		78,9805302
0,5 m		79,5164207
$\overline{L'_p} =$		<b>75,5734788</b>
RF =	54,9009047	
$\Delta L_p =$		<b>20,6725741</b>
$K_1 =$		0,03735885
$\overline{L_p} =$		<b>75,5361199</b>
a =	7,5	
b =	2,75	
c =	4,5	
<b>S =</b>		<b>267</b>
$L_w =$		<b>99,8012325</b>

### Medição 6a:

$\overline{L'_{pi}}$		
50 cm		76,51844962
100 cm		73,94630371
150 cm		73,26439876
200 cm		70,80267542
250 cm		68,59230401
300 cm		68,90678621
350 cm		66,50875134
cima		65,42553986
$\overline{L'_p} =$		<b>71,96844902</b>
RF =	57,88635166	
$\Delta L_p =$		<b>14,08209736</b>
$K_1 =$		<b>0,173060871</b>
$\overline{L_p} =$		<b>71,79538815</b>
a =	7	
b =	2,25	
c =	4	
<b>S =</b>		<b>211</b>
$L_w =$		<b>95,0382127</b>

### Medição 6b:

$\overline{L'_{pi}}$		
50 cm		78,82775
100 cm		78,07226
150 cm		75,57769
200 cm		73,33146
250 cm		71,79796
300 cm		71,09305
350 cm		69,52083
cima		66,25194
$\overline{L'_p} =$		<b>74,75889</b>
RF =	57,88635	
$\Delta L_p =$		<b>16,87254</b>
$K_1 =$		<b>0,090164</b>
$\overline{L_p} =$		<b>74,66873</b>
a =	7	
b =	2,25	
c =	4	
<b>S =</b>		<b>211</b>
$L_w =$		<b>97,91155</b>

### Medição 6c:

$\overline{L'_{pi}}$		
50 cm		82,59142
100 cm		81,52016
150 cm		79,95131
200 cm		78,06734
250 cm		75,96078
300 cm		79,2587
350 cm		74,47805
cima		71,46295
$\overline{L'_p} =$		<b>79,11355</b>
RF =	57,88635	
$\Delta L_p =$		<b>21,2272</b>
$K_1 =$		<b>0,032863</b>
$\overline{L_p} =$		<b>79,08069</b>
a =	7	
b =	2,25	
c =	4	
<b>S =</b>		<b>211</b>
$L_w =$		<b>102,3235</b>