

Medição de Potência Sonora de Ônibus Urbanos na Condição Parado

Chung, A.*; Pinheiro, V. H.†; Musafir, R. E.*†‡

* Programa de Engenharia Mecânica/COPPE/UFRJ;

† Depto de Engenharia Mecânica/Escola Politécnica/UFRJ;

‡ Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente/Escola Politécnica/UFRJ;

Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ

chung.alexandra@gmail.com; victorhenrique@poli.ufrj.br; rem@mecanica.coppe.ufrj.br.

Resumo

Neste artigo são calculados, segundo a norma ISO 3744:2010, os níveis de potência sonora, em dB_A , de dois ônibus urbanos na condição parado, em aceleração. Foram testadas diferentes configurações de medição usando uma caixa de referência, na forma de paralelepípedo sobre um plano refletor, com o objetivo de verificar a possibilidade de simplificar medição da potência. Os valores obtidos para os níveis de potência sonora se mantêm próximos para as diferentes configurações, sugerindo que as mais simples podem ser empregadas na medição de potência sonora desses veículos e de outros semelhantes.

Palavras-chave: Acústica, potência sonora, ruído de ônibus.

1. Introdução

Para o ruído ambiental urbano, o tráfego rodoviário é a fonte de ruído dominante (BERGLUND *et al.*, 1999; PAZ *et al.*, 2009; SÃO PAULO, 2011), onde se destacam os veículos pesados (NELSON, 1987) sendo, destes, os ônibus os que causam o maior incômodo (ROTT, 1995). O ruído de tráfego é representado pela emissão coletiva de fontes sonoras e constituído por combinações entre o ruído de propulsão (ruído do motor, entrada de ar, sistema de arrefecimento, sistemas de exaustão, transmissões e frenagem) e o ruído de rolamento (pela interação do pneu com o solo) e o ruído aerodinâmico (devido à interação do ar com o corpo do veículo em movimento) (MITCHELL, 2009).

Com o intuito de realizar um estudo inicial sobre o ruído de propulsão dos ônibus, foram realizadas seis medições da potência sonora na condição parado, em dois ônibus de mesmo modelo, as medições sendo baseadas na ISO 3744:2010.

2. Determinação do Nível de Potência Sonora – ISO 3744:2010

A norma ISO 3744:2010, cujo título, traduzido para o português, seria “Acústica – Determinação do nível de potência sonora e do nível de energia de fontes de ruído utilizando a pressão sonora – Método de engenharia para campo livre sobre um plano refletor”, (BS EN ISO, 2010) especifica um método de medição sobre uma superfície que envolve a fonte de ruído (máquina ou equipamento) e que é delimitada por um ou mais planos refletores, num ambiente que, exceto pela presença dessas superfícies, se aproxima da condição de campo livre. O método admite diversas possibilidades para o cálculo da potência sonora e emprega, além da superfície de medição, uma caixa de referência (semi-esférica, paralelepípedo, cilíndrica ou em combinações de superfícies) que depende do formato da fonte. De modo geral, o posicionamento dos microfones é obtido dividindo-se trechos da superfície de medição em partes retangulares ou triangulares que contenha um tamanho de no máximo até $3d$, onde d é a distância entre a caixa de referência e o microfone (chamada de *distância de medição*) que deve ser de pelo

menos 0,25 m e preferencialmente maior que 1 m.

Neste trabalho, para a medição dos níveis de ruído dos ônibus, foi considerada uma caixa de referência em forma de paralelepípedo sobre um plano refletor. A Figura 1 exemplifica uma opção para o posicionamento dos microfones neste caso. A Figura 2 detalha opções para esse

posicionamento, inclusive para o caso em que haja a necessidade de se acrescentar posições adicionais — quando a fonte sonora for muito grande ou houver regiões nas quais a emissão de ruído é predominante.

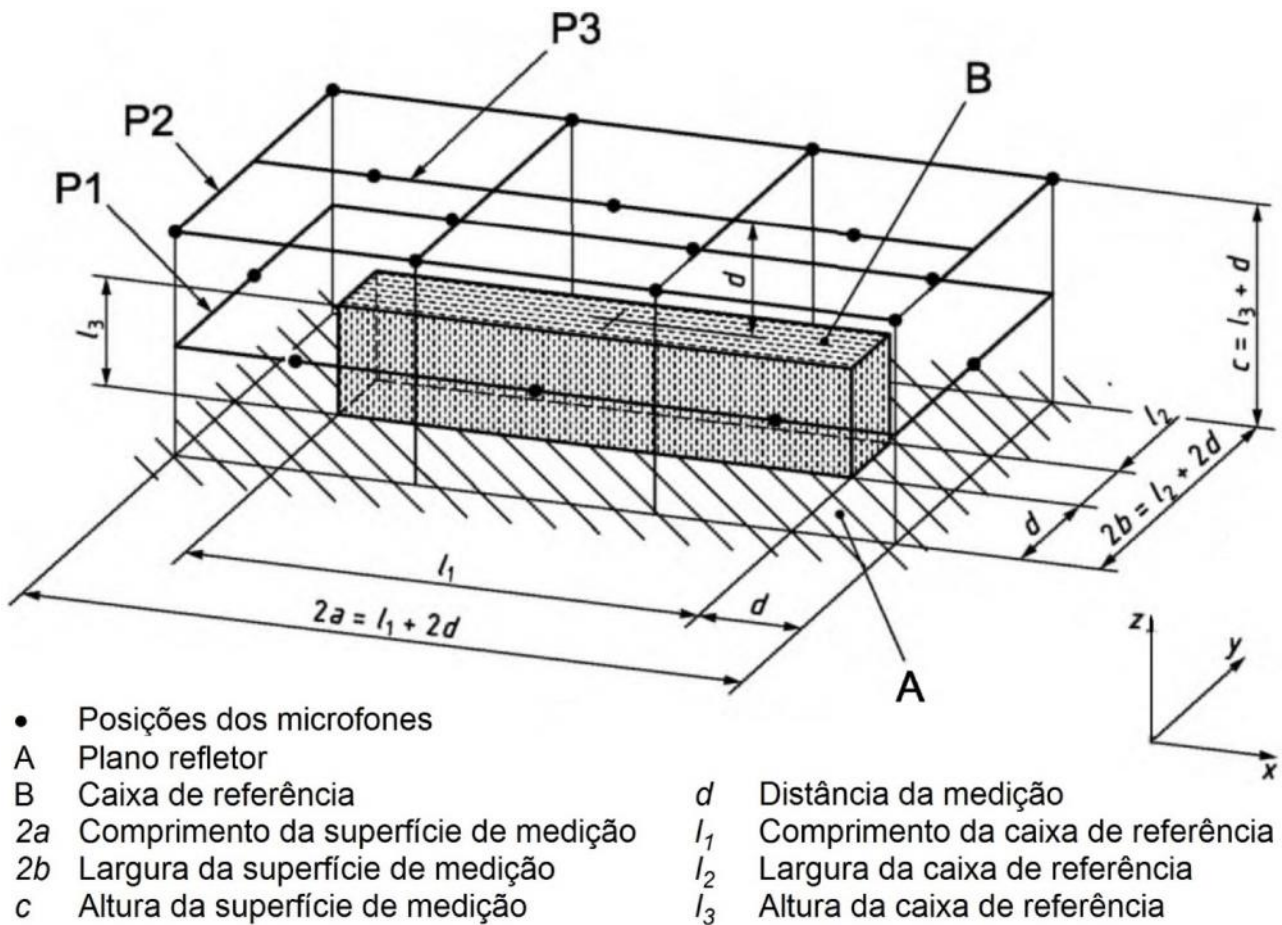


Figura 1: Exemplo de uma superfície de medição em paralelepípedo com as posições dos microfones.

Fonte: BS EN ISO 3744:2010, Figura C.9, pg. 50.

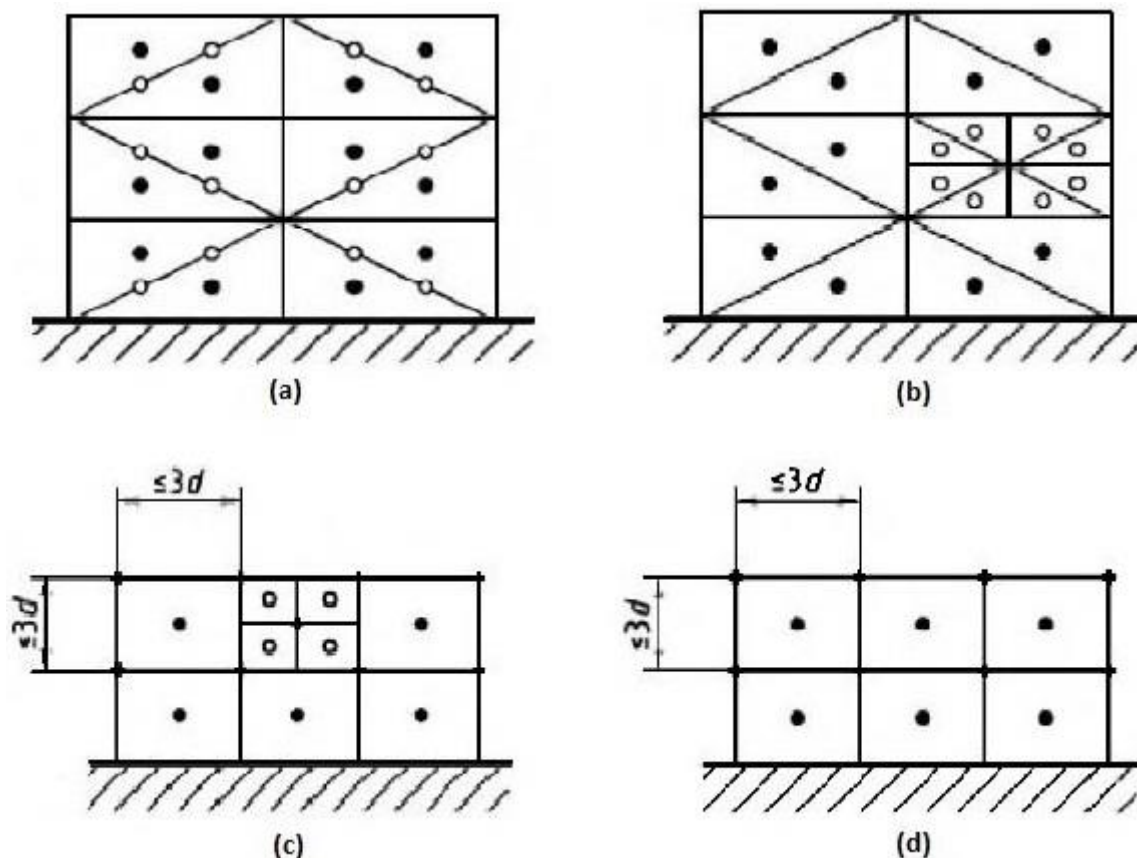


Figura 2: Exemplos de posições de microfones para uma superfície de medição em paralelepípedo constituída de: (a) e (b) áreas parciais triangulares com posições de microfones adicionais, (c) áreas parciais retangulares com posições de microfones adicionais e (d) áreas parciais retangulares.

Fonte: BS EN ISO 3744:2010, Figuras. C.1 – (c), C.3, C.5 e C.6, pgs. 45 à 47.

As medições podem ser feitas em bandas de frequência ou pelo nível de pressão sonora contínuo equivalente, ponderado pela curva A, L_{Aeq} , e o nível de potência sonora é obtido como

$$L_W = \overline{L_p} + 10 \log \frac{S}{S_0} \quad (1)$$

onde $\overline{L_p}$ representa a média logarítmica dos níveis de pressão sonora medidos pelos microfones, considerando correções quanto ao ruído de fundo, K_1 , e ao ambiente de medição, K_2 ; S é a área total da superfície de medição e $S_0=1 \text{ m}^2$.

Para um paralelepípedo sobre um plano refletor a superfície S é:

$$S = 4(ab + bc + ca) \quad (2)$$

onde a , b e c (Figura 1) são as dimensões de comprimento, largura e altura, respectivamente, da superfície de medição, sendo constituídas por:

$$a = 0,5l_1 + d, \quad b = 0,5l_2 + d,$$

$$c = l_3 + d, \quad (3), (4), (5)$$

onde l_1 , l_2 e l_3 são as dimensões de comprimento, largura e altura, respectivamente, da caixa de referência.

O valor de $\overline{L_p}$ é obtido por

$$\overline{L_p} = \overline{L'_p} - K_1 - K_2 \quad (6)$$

onde $\overline{L'_p}$ é a média logarítmica dos níveis de pressão sonora medidos considerando as diversas posições dos microfones, sendo calculado:

- se as posições dos microfones estiverem associadas a áreas parciais desiguais (Figuras 2 a, b e c) por:

$$\overline{L'_p} = 10 \log \left[\frac{1}{S} \sum_{i=1}^{N_M} S_i 10^{\frac{L'_{pi}}{10}} \right]; \quad (7)$$

- se as posições dos microfones forem uniformemente distribuídas, de forma que a área associada a cada medição seja sempre a mesma (Figura 2 d), por:

$$\overline{L'_p} = 10 \log \left[\frac{1}{N_M} \sum_{i=1}^{N_M} 10^{\frac{L'_{pi}}{10}} \right] \quad (8)$$

onde L'_{pi} é o L_{Aeq} global ou em bandas de frequência, medido em cada posição de microfone; N_M é o número de posições dos microfones; S é a área total da superfície de medição em metros; S_i é a área parcial da superfície de medição associada ao microfone i , em m^2 .

A correção para o ruído de fundo K_1 pode ser calculada pela expressão:

$$K_1 = -10 \log \left(1 - 10^{-\frac{\overline{L'_p} - L_{p(RF)}}{10}} \right) \quad (9)$$

sendo $\overline{L_{p(RF)}}$ a média logarítmica do ruído de fundo medido em todos os pontos. A medição para o ruído de fundo é realizada nos mesmos pontos, porém com a fonte sonora desligada, e seu cálculo é feito de acordo com as equações. (7) e (8).

As correções feitas pelas condições do ambiente de medição K_2 dependem do local em que são feitas as medições. Para o caso de medições em espaço aberto, livre de reflexões, limitado por uma superfície plana e rígida, como concreto ou asfalto, o valor de K_2 é menor que 0,5 dB e pode ser negligenciado.

A necessidade do uso de posições adicionais de microfones pode ser avaliada através do índice de direcionalidade aparente, D_i , dado por

$$D_i = L'_{pi} - [\overline{L'_p} - K_1] \quad (10)$$

onde L'_{pi} é o L_{Aeq} , global ou em bandas de frequência, medido em cada posição de microfone com a correção do ruído de fundo. Para as regiões em que D_i for maior que 5 dB, é recomendado o uso de mais posições.

3. Equipamentos, Descrição dos Ônibus, Locais e Dados de Medição

As medições foram realizadas em dois locais nas dependências da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ:

- nas vias próximas ao Pólo de Biotecnologia do Rio de Janeiro – BIO-RIO (Figura 3)
- na área de estacionamento do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (Cenpes II) com dimensões de aproximadamente 40 x 200 metros, (Figura 4).



Figura 3: Local das medições – Área de estacionamento do Cenpes.



Figura 4: Local das medições – via próxima ao BIO-RIO.

Os equipamentos utilizados foram: três medidores integradores de nível sonoro fabricados pela 01dB – Solo, classe 1 (#5070) e classe 2 (#469 e #341), acoplados ou não a um Notebook HP ProBook 4530s; software dBFA Suite versão 4.9; calibrador de nível sonoro 01dB – Cal02, classe 2; termohigrômetro Minipa – MT-242; fita métrica e suporte para microfone.

Foram analisados dois ônibus do modelo Mercedes Benz/Marcopolo Torino U, Diesel, ano 2011, com motor de velocidade máxima de rotação de 2200 rpm e com dimensões aproximadas de 12 x 2,5 x 3 metros. A Tabela 1 apresenta os parâmetros considerados em cada medição.

Nas medições 1 e 2, foram utilizados pontos fixos e intervalos de medição de

aproximadamente 30 segundos. A Figura 5 mostra os valores obtidos e a localização dos pontos onde as medições foram realizadas. A Figura 6 mostra somente a localização dos pontos, os valores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 1: Parâmetros e equipamentos utilizados nas medições de ruído.

Medição /Ônibus	Velocidade de rotação do motor (rpm)	l_1 (m)	l_2 (m)	l_3 (m)	d (m)	Medidores utilizados
1/1	1650	12	2,5	3,0	1,0	#5070 e #469
2/1	1650	12	2,5	3,0	1,0	#341
3/1	1650	12	2,5	3,0	1,5	#469
4a/2	1100	12	2,5	3,0	1,0	#341
4b/2	1650	12	2,5	3,0	1,0	#341
4c/2	2200	12	2,5	3,0	1,0	#341

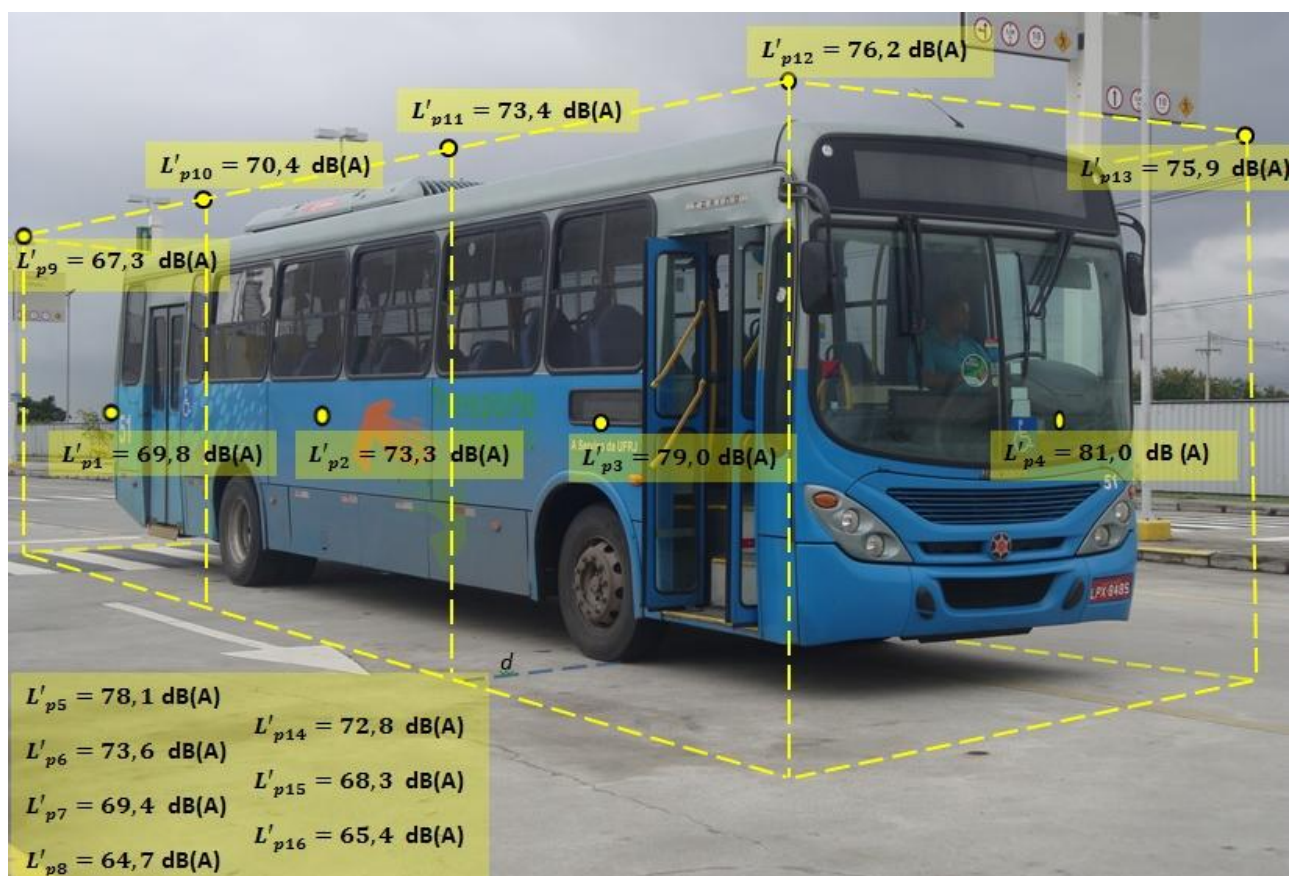


Figura 5: Dados da medição 1 e representação da superfície com pontos de medição (os pontos 5 a 8 continuam sequencialmente na lateral, em sentido anti-horário e os pontos 13 a 16 continuam sequencialmente na parte superior, em sentido anti-horário)

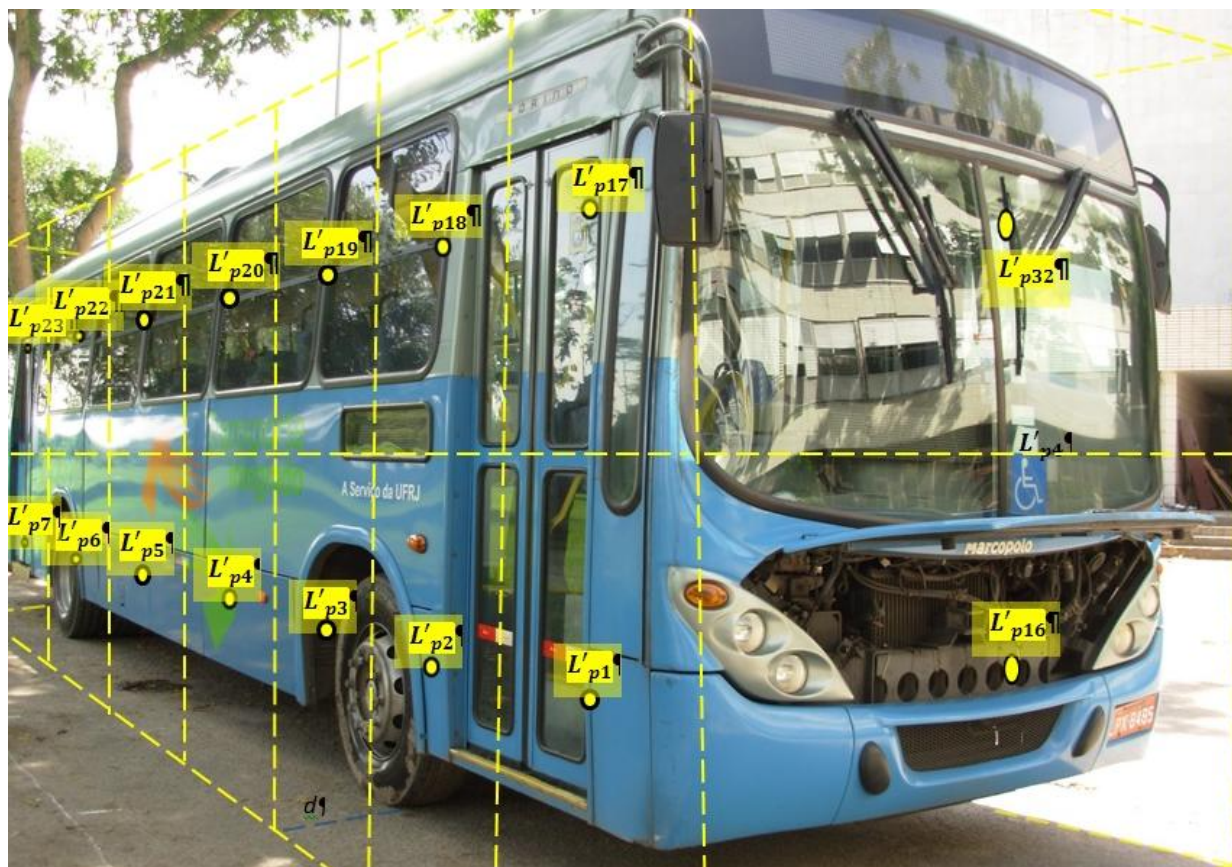


Figura 6: Representação da superfície da medição 2 e pontos de medição (os pontos 8 a 15 continuam sequencialmente na lateral inferior, em sentido horário e os pontos de 24 a 31 continuam sequencialmente na lateral superior, em sentido horário)

Nas medições 3, 4a, 4b e 4c, o entorno do ônibus foi percorrido continuamente ao longo das alturas definidas, durante aproximadamente 1 minuto para cada uma; o registro dos dados foi realizado a cada 100 ms para a medição 3 e a cada 125 ms nas medições 4a, 4b e 4c. Para essas medições, feitas de forma contínua, o número de pontos foi obtido a partir do intervalo de registro. Nas Figuras 7 e 8 são representadas as linhas onde foram feitas as medições. Os valores dos níveis equivalente obtidos são apresentados na Figura 7 para a medição 3 e na Tabela 3 para as medições 4ª, 4b e 4c.

Tabela 2: Nível equivalente em cada ponto na medição 2.

Posições dos microfones (i)	(dB _A)	Posições dos microfones (i)	(dB _A)
1	85,0	17	76,6
2	84,6	18	77,0
3	78,5	19	74,8
4	75,6	20	71,8
5	73,3	21	69,3
6	70,5	22	67,6
7	70,0	23	65,8
8	70,7	24	65,4
9	71,1	25	67,4
10	72,8	26	68,7
11	75,6	27	71,1
12	78,4	28	74,2
13	83,1	29	75,7
14	83,1	30	77,1
15	85,5	31	78,4
16	86,2	32	79,2



Figura 7: Resultados parciais da medição 3 e representação da superfície com as linhas no entorno do ônibus nas alturas definidas utilizadas na medição.



Figura 8: Representação da superfície com as linhas no entorno do ônibus nas alturas utilizadas na medição 4.

Tabela 3: Nível equivalente a alturas definidas para diferentes velocidades de rotação do motor (medições 4a, 4b e 4c).

Altura das linhas de medição (m)	Medição 4a – 1100 rpm	Medição 4b – 1650 rpm	Medição 4c – 2200 rpm
	L'_p (dB _A)	L'_p (dB _A)	L'_p (dB _A)
0,5	76,5	78,8	82,6
1	73,9	78,1	81,5
1,5	73,3	75,6	80,0
2	70,8	73,3	78,1
2,5	68,6	71,8	76,0
3	68,9	71,1	-
3,5	66,5	69,5	74,5
s 3,5	65,4	66,3	71,5

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o cálculo dos níveis de potência sonora foram utilizados dois procedimentos: considerar a área total da superfície de medição, conforme a eq. (2), ou considerar somente os valores obtidos nas áreas laterais, sem os da superfície superior (ou seja, sem os pontos 9 a 16 na medição 1; na medição 3; sem o valor de $L'_{ps3,5m}$ na medição 4 — ver Figuras 5, 7 e 8), considerando-se, nesse caso, $S = 4(ac + bc)$. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 4.

Observa-se, da Tabela 4, que para a rotação do motor de 1650 rpm, a diferença entre os valores calculados considerando todos os pontos (medições 1, 2, 3 e 4b) ou apenas os pontos laterais (medições 1*, 2*, 3* e 4b*) é muito pequena: as medições 1 e 1* a diferença essencialmente nula (0,1 dB_A), enquanto que a maior diferença foi observada entre as medições 2 e 2*, sendo, no entanto, de 1,5 dB_A. O emprego do procedimento simplificado se justifica porque os níveis de pressão sonora obtidos na parte superior da superfície de referência são sempre inferiores (ver, por exemplo, Figura 7) aos medidos na altura do motor (1 m) e do escapamento (0,5 m). Como os pontos superiores são os mais trabalhosos de se medir, a opção de descartá-los é uma simplificação vantajosa.

Tabela 4: Valores dos níveis de potência sonora dos ônibus na condição parado, considerando tanto a área total da superfície de medição como considerando apenas os valores obtidos nas áreas laterais (número de medição com asterisco).

Medição	L_W (dB _A)	\overline{L}_p (dB _A)	S (m ²)	$\overline{L}_{p(B)}$ (dB _A)
1	98,0	74,8	211	51,0
1*	97,9	76,2	148	51,0
2	102,2	79,0	211	56,4
2*	100,7	79,0	148	56,4
3	100,4	76,1	267	54,9
3*	99,0	76,3	185	54,9
4a	95,5	72,2	211	48,5
4a*	94,4	72,7	148	48,5
4b	98,7	75,4	211	48,5
4b*	97,5	75,8	148	48,5
4c	102,4	79,2	211	48,5
4c*	101,4	79,7	148	48,5

Das Tabelas 1 e 4 pode-se inferir que o valor de L_W obtido para o ônibus 1 através da medição 3 é o mais confiável, pois nela o número de pontos considerado é muito superior aos utilizados nas demais (medições 1 e 2). Para a medição 1, por exemplo, embora tenham sido utilizados poucos pontos, o valor encontrado para L_W difere da medição 3 em 2,4 dB_A. Para este caso, também foi realizado o cálculo de L_W utilizando-se apenas o valor de L'_{p2m} da medição 3 (ver Figura 7) e considerando apenas a área lateral, para compará-lo com o valor de L_W obtido com pontos fixos à mesma altura (medição 1*, Tabela 4). O resultado deste cálculo foi $L_W = 99,1$ dB_A, com pequena diferença (1,2 dB_A) em relação ao valor da medição 1* de 97,9 dB_A. Utilizando-se apenas o valor de $L'_{p2,5m}$ essa diferença seria menor ainda (0,3dB_A, sendo $L_W = 97,6$ dB_A). Além disso, o resultado simplificado, considerando somente o valor de L'_{p2m} , difere apenas de 1,3 dB_A do obtido com todas as linhas contínuas da medição 3. Isso indica que realizar a medição em apenas uma linha contínua, ou mesmo em pontos fixos discretos, próximo à altura média do ônibus pode levar a resultados satisfatórios.

Tabela 5: Índice de direcionalidade aparente – medição 1.

Posições dos microfones (<i>i</i>)	D_i
1	-5,0
2	-1,5
3	4,2
4	6,2
5	3,3
6	-1,2
7	-5,4
8	-10,3
9	-7,5
10	-4,4
11	-1,4
12	1,4
13	1,1
14	-2,0
15	-6,5
16	-9,6

Tabela 6: Índice de direcionalidade aparente – medição 2.

Posições dos microfones (<i>i</i>)	D_i	Posições dos microfones (<i>i</i>)	D_i
1	5,9	17	3,3
2	5,6	18	-2,4
3	2,4	19	-3,3
4	-2,4	20	-5,7
5	-5,0	21	-8,7
6	-7,0	22	-11,0
7	-9,1	23	-12,8
8	-8,9	24	-14,1
9	-8,3	25	-13,1
10	-6,7	26	-11,3
11	-4,3	27	-8,9
12	-1,6	28	-7,3
13	3,1	29	-4,0
14	4,0	30	-2,6
15	5,7	31	-1,1
16	6,9	32	-0,2

Foram também calculados, para as medições 1 e 2, os valores do índice de direcionalidade aparente para cada ponto, D_i , mostrados nas Tabelas 5 e 6. Os valores obtidos para os pontos em que o índice de direcionalidade aparente excede 5 dBA, apresentados em vermelho, são aqueles localizados próximos aos locais de maior ruído do ônibus

(escapamento e motor dianteiro), como já era esperado.

Nas medições 1 e 2, os níveis de potência sonora obtidos através da eq. (7), que considera áreas desiguais, foram muito próximos aos obtidos utilizando-se a eq. (8), com diferenças menores que 0,3 dBA. Isso porque as únicas áreas desiguais e ligeiramente maiores que as demais são a da frente e a da parte traseira do ônibus, o que não leva a variações substanciais no resultado. Comparando os valores da medição 4, tem-se que há um aumento do nível de potência sonora de aproximadamente 3 dBA quando se aumenta a rotação do motor de 1100 rpm para 1650 rpm e um aumento de aproximadamente 4 dBA ao aumentar a rotação de 1650 rpm para 2200 rpm. Ou seja, dobrando-se a rotação do motor, houve um aumento em 7 dBA no nível de potência sonora.

5. CONCLUSÃO

Dada a diferença muito pequena entre os valores obtidos considerando a área total do ônibus e apenas a área lateral, conclui-se que é possível simplificar a medição diminuindo o número de pontos utilizados, por exemplo, desconsiderando os pontos superiores que são mais trabalhosos para medir. Realizar a medição em apenas uma linha contínua, ou mesmo em pontos fixos discretos, próximo à altura média do ônibus também pode levar a resultados satisfatórios.

REFERÊNCIAS

- BERGLUND, B., LINDVALL, T., SCHWELA, S. H., **Guidelines for community noise**. eds. Geneva, World Health Organization, 1999. Disponível em: <<http://whqlibdoc.who.int/hq/1999/a68672.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2014.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS EN ISO 3744: Acoustics — 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**. Brussels, 2010. 79p.
- MITCHELL, P., **Speed and Road Traffic Noise: The role that lower speeds could play in cutting noise from traffic**. Report commissioned by the UK

- Noise Association, 2009. Disponível em:
<<http://cfile240.uf.daum.net/attach/023FD13B50EBB0D50C66C8>>. Acesso em: 22jun. 2014.
- NELSON, P.M., Transportation Noise Reference Book, Butterworth & Co. 1987. In: KEULEMANS, C., **Sound power measurements on heavy vehicles to study propulsion noise in the EU-project IMAGINE**. Disponível em: <http://www20.vv.se/fu/d-resultat/Publikationer_000001_000100/Publikation_000091/Volvo%20test%20orig.pdf>. Acesso em: 22jun. 2014.
- PAZ, E. C., ZANNIN, P.H.T, “Avaliação do ruído de tráfego como índice de poluição sonora”, **Revista Brasileira de Acústica e Vibrações**, no 40, pp. 56 – 62, mar. 2009.
- ROTT, João A. A., **Mapa simplificado de ruído para a cidade de Porto Alegre**. Dissertação M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 1995.
- SÃO PAULO. Secretaria Municipal de Transporte. Secretaria do Verde e do Meio Ambiente. **Plano de Controle de Poluição Veicular no Município de São Paulo**. São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.sptrans.com.br/pdf/biblioteca_tecnica/PCPV.pdf>. Acesso em: 22jun. 2014.