

POLUIÇÃO SONORA

Ricardo E. Musafir

Depto. Recursos Hídricos e Meio Ambiente/EP e Prog. Eng. Mecânica/COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Junho, 2016 (v. 2.2a)

1. Introdução

O ruído é um fator de grande importância na degradação da qualidade de vida dos centros urbanos. O volume de tráfego, a proximidade das habitações umas das outras, a enorme quantidade de dispositivos que emitem sinais sonoros, úteis ou inúteis, bem como a falta de consciência quanto ao incômodo e aos outros problemas causados pelo ruído, contribuem significativamente para essa degradação. O efeito é tal que a poluição sonora, que foi considerada pela Organização Mundial de Saúde (OMS) por muito tempo como o terceiro em importância entre os problemas de poluição (precedido apenas pela poluição das águas e do ar) é, desde 2011, vista pela OMS como o segundo entre os problemas ambientais mais disseminados, logo atrás da poluição do ar.

Embora todos concordemos quanto à necessidade de um certo silêncio, não apenas durante os períodos de descanso mas também para o desenvolvimento de quase qualquer atividade, não há como negar que esse silêncio é cada vez mais raro nas grandes cidades, onde o ruído contribui de forma pronunciada para o aumento do nosso desgaste físico e psíquico.

Poluição sonora pode ser definida como qualquer modificação das propriedades do meio ambiente causada por ruídos gerados direta ou indiretamente por ação humana que dificultem ou impossibilitem a utilização de um determinado espaço ambiental para as suas finalidades ou, então, que possam causar dano auditivo para os freqüentadores ou ocupantes daquele espaço.

2. O Som: Propriedades Físicas

A sensação auditiva é produzida por pequenas e rápidas flutuações de pressão. Essas flutuações propagam-se sob a forma de ondas sonoras, transportando energia para longe da região de origem das perturbações. Essas ondas são formadas porque vivemos constantemente sob a pressão atmosférica (de cerca 10^5 N/m²). Assim, pequenas perturbações na pressão local, produzidas por um movimento qualquer (como, por exemplo, o do cone de um alto-falante), propagam-se pelo meio, da mesma forma que perturbações introduzidas numa corda esticada propagam-se por ela. No espaço aberto, a amplitude das ondas sonoras cai com a distância à fonte, o processo de propagação sendo semelhante ao que ocorre com ondas na superfície da água.

Podemos chamar de som qualquer variação de pressão em torno da pressão atmosférica que possa ser percebida pelo ouvido humano em condições normais.

Para que possamos perceber uma onda sonora, esta tem de ter amplitude acima de um valor mínimo e freqüência dentro de uma determinada faixa.

O ouvido humano jovem e sadio percebe sons de amplitude p' a partir de 20×10^{-6} N/m² e freqüência f entre 20 Hz e 20.000 Hz.

A dor acontece para p' da ordem de 20 N/m².

Podemos constatar então que a faixa da nossa percepção é bastante grande, seja em amplitude ou em frequência.

Frequência, harmônicos, timbre, etc.

Frequência: É a taxa de repetição de um sinal (ou evento) por unidade de tempo, sendo medida usualmente em Hz (ciclos por segundo).

Um “tom puro” é um som cuja variação no tempo é senoidal. É muito difícil produzir somente um tom puro. Entretanto, qualquer som (bem como qualquer sinal oscilatório) pode ser decomposto em tons puros de frequências diferentes. Dessa forma, apenas os tons puros são associados a uma única frequência, os demais sons sendo descritos como contendo as frequências dos tons puros que os compõem. Os sons produzidos por instrumentos musicais são, em geral, compostos por uma frequência fundamental f_0 (aquela que dá nome à nota tocada) e seus “harmônicos”, isto é, por sons cujas frequências são expressas por múltiplos inteiros da fundamental. É interessante notar que os harmônicos para os quais $f = 2^N f_0$, onde N é um número inteiro, correspondem à mesma nota que f_0 , só que N oitavas acima (uma “oitava” é o menor intervalo limitado por duas notas de mesmo nome, por exemplo, por duas notas “Dó” consecutivas). Como a importância relativa dos diversos harmônicos gerados para a produção de uma mesma nota varia de acordo com o instrumento tocado, o som ouvido em cada caso apresentará características diferentes (pode ser mais ou menos “metálico”, “seco”, ou “áspero”, por exemplo). Essas diferenças, associadas à forma da onda de pressão gerada por cada um dos instrumentos, se refletem naquilo que chamamos de “timbre”. Podemos dizer que esses sons têm a mesma frequência, mas timbres diferentes.

Quando as frequências que compõem um som não guardam nenhuma relação entre si (o que é o contrário do que acontece com os sons “musicais”), o som, se formado por número muito grande de frequências, será percebido mais ou menos como um chiado. Os sons gerados por máquinas ou motores geralmente têm a energia distribuída numa faixa larga e contínua de frequências, além de uma parcela concentrada em um ou mais tons puros discretos.

A representação da distribuição da energia de um sinal em função das frequências que o compõem é chamada de “espectro”.

A velocidade de propagação do som no ar é de cerca de 340m/s (formalmente, esse é o valor para 15°; na faixa ambiente, a variação é de 0,6 m/s por grau). Na água, é em torno de 1500 m/s.

Ruído: Embora existam definições de “ruído” baseado na sua composição em frequência, a mais interessante do ponto de vista da poluição sonora é a que diz apenas: “Ruído é todo som indesejável”, pois acentua o aspecto subjetivo do incômodo.

3. Medição de ruído - Níveis de Ruído

3.1. Níveis de ruído: Introdução

A grandeza física que estimula nosso aparelho auditivo é a pressão. Entretanto, não é de uso corrente referir-se a medidas de ruído empregando unidades de pressão. Isto acontece porque a nossa percepção não varia linearmente (isto é, proporcionalmente) com a quantidade de energia

sonora que estimula o nosso sistema auditivo. Para que possamos perceber e processar variações de pressão de ordens de grandeza muito diferentes, o sistema auditivo se ajusta à quantidade de energia sonora que chega até nós. Assim, variações na energia serão relevantes se forem pelo menos da mesma ordem de grandeza que a existente no ambiente, independentemente desse valor ser grande ou pequeno. Sabemos que, num ambiente muito silencioso, qualquer ruído é importante, ao passo que, na presença de muito barulho, sons de baixa amplitude não são notados.

Uma forma de relacionar a nossa percepção auditiva ρ , e a energia sonora e , de modo a satisfazer à característica aludida acima é supor que as suas variações, $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$ e $\Delta e = e_2 - e_1$, em vez de seguir uma lei do tipo $\Delta\rho = k \Delta e$, onde k é uma constante, satisfazem a uma relação da forma

$$\Delta\rho = k \frac{\Delta e}{e_1}$$

isto é, que uma variação na percepção é proporcional à variação relativa da energia sonora. Pode-se mostrar que a expressão acima corresponde a

$$\rho = k \log (e/e_0)$$

onde e_0 é um valor de referência arbitrário para e , correspondendo a $\rho = 0$ (note que a função $y(x)$ cuja derivada, dy/dx , é igual a $1/x$ é $y = \ln x$).

A ideia de que a percepção das sensações em geral (som, sabor, luz, etc.) varia aproximadamente com o logaritmo da energia dos estímulos que produzem essas sensações foi proposta por Weber e Fechner no século XIX, a partir de um raciocínio semelhante, baseado em experimentos.

Assim, se desejamos expressar as medidas de ruído de forma a descrever adequadamente a nossa sensação auditiva, é mais conveniente, em vez de referir-se diretamente ao valor medido em unidades de pressão (N/m^2), potência (W) ou intensidade (W/m^2), utilizar um valor proporcional ao logaritmo da energia sonora. Por isso utilizamos o “nível de pressão sonora”, L (ou NPS), em decibéis (dB), definido segundo

$$L = 10 \log_{10} \left(\frac{p'^2}{p_0'^2} \right)$$

onde p'^2 , o quadrado da amplitude das flutuações de pressão, descreve a energia sonora existente no ponto de medição (pois a energia transportada por uma onda é proporcional ao quadrado de sua amplitude) e p_0' é um valor de referência para a amplitude de pressão, fornecendo o zero da escala para o nível de pressão sonora. Observe-se que para $p' = p_0'$, tem-se $L = 0$ dB. O valor utilizado para p_0' em medidas relacionadas ao som no ar é $p_0' = 20 \times 10^{-6} N/m^2$, de forma que o nível $L = 0$ dB correspondente se refere ao limiar da audição de uma pessoa saudável.

Observamos anteriormente que a dor ocorre para flutuações de pressão da ordem de $20 N/m^2$. Este valor corresponde a um nível de

$$L = 10 \log_{10} \left(\frac{20}{20 \times 10^{-6}} \right)^2 = 10 \log_{10} (10^{12}) = 120 \text{ dB}$$

A utilização do nível de pressão sonora em dB (isto é, em décimos de Bell, unidade que homenageia Graham Bell) além de expressar, ainda que de forma aproximada, a relação entre variações na nossa sensação auditiva e na energia sonora que estimula essa sensação, tem também a vantagem de reduzir significativamente a faixa de valores com que trabalhamos. Na figura 1 estão mostrados os níveis correspondentes aos limiares da percepção e da dor em função da frequência, juntamente com as faixas abrangidas pela fala e pela música.

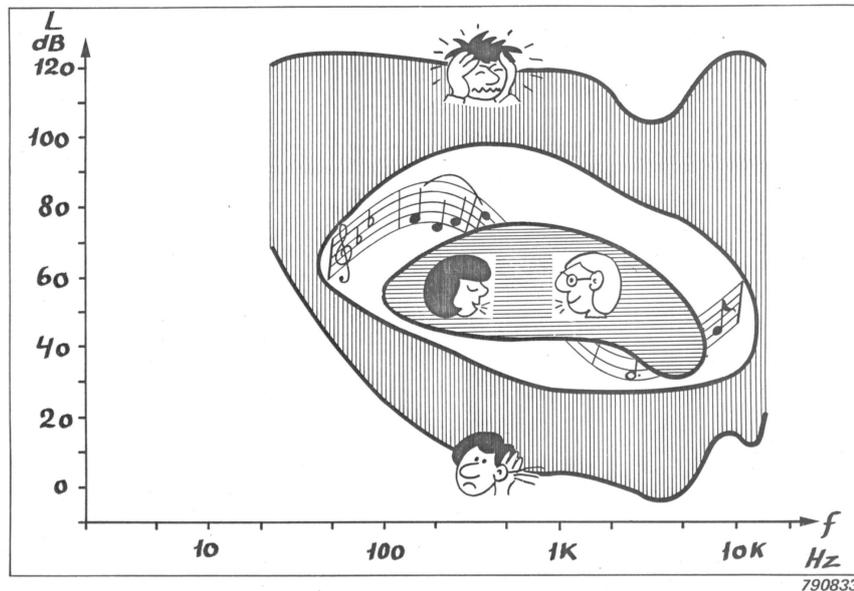


Figura 1 - Limites para percepção auditiva e para a dor; regiões da fala e da música.

Os níveis são medidos através de um “medidor de nível de pressão sonora” ou simplesmente “medidor de nível sonoro” ou “de nível de ruído”. Observe-se que o que é efetivamente medido é a pressão sonora. Essa medida da pressão, por sua vez, é expressa em dB, isto é, a partir do logaritmo da razão entre a energia associada à medida e um valor de referência. Utilizam-se também medidas em dB para várias outras grandezas, tais como potência elétrica ou sonora e corrente elétrica, já que essas quantidades também apresentam grandes intervalos de variação, os quais cobrem diversas ordens de grandeza. Para cada um dos casos, é utilizada a referência correspondente (que deve ser especificada sempre que houver possibilidade de dúvida quanto ao valor utilizado). O nível de potência sonora, por exemplo, é medido usualmente com a referência de 10^{-12} W. Os níveis de potência elétrica ou sonora, de intensidade de corrente e de pressão sonora, por exemplo, são todos expressos em decibéis, mas cada um deles é obtido a partir da medida de uma grandeza física diferente. Do exposto podemos concluir que a denominação de “decibelímetro” muitas vezes dada ao medidor de nível de pressão sonora não é apropriada, pois não faz nenhuma alusão ao que, de fato, está sendo medido.

3.2. Curvas de ponderação:

A mera quantificação do nível de pressão sonora em decibéis, por si só, não é suficiente para expressar o quão intenso um ruído parece ser, pois a nossa percepção auditiva depende também da frequência, de uma forma que não é muito simples: em geral, ouvimos melhor os sons agudos do que os graves mas, a medida que os níveis se tornam maiores, essa diferença de sensibilidade com a frequência vai diminuindo (isto está ilustrado na figura 1, onde podemos constatar que o limiar da audição depende da frequência de forma muito mais pronunciada do que o limiar da dor). Podemos dizer que, a menos que sejam muito intensos, nós percebemos os sons graves

como se tivessem amplitude menor do que a que realmente tem.

O fato de que a nossa dificuldade de percepção dos sons graves depende de forma complicada tanto do nível quanto da frequência, indica que a melhor forma de avaliar um ruído seria pelo exame da distribuição de sua energia em função das frequências que o compõem, isto é, do seu espectro. Sabemos, por outro lado, que é desejável que o resultado de uma medição possa ser expresso de forma simples, se possível através de um único número. Para atingir esse objetivo, foi proposta a utilização, no medidor, de filtros que alterassem a importância relativa das diferentes faixas de frequências. Esses filtros são conhecidos como filtro A, B, C, D, etc., o principal efeito da maioria deles sendo o de reduzir a amplitude dos graves antes do cálculo de \square^2 . Isto é feito com o intuito de que a indicação do medidor seja baseada no som que, idealmente, seria percebido por nós. Entretanto, como a ponderação introduzida por um dado filtro para as diversas faixas de frequências não varia com o nível, esses filtros não podem reproduzir com exatidão os detalhes da percepção. Alguns filtros aumentam a importância dos agudos não apenas pela redução dos graves, mas também através da amplificação de algumas faixas de agudos. O fato de que um nível de pressão sonora foi medido com a utilização de um determinado filtro (A, B, etc.) é geralmente expresso através da utilização da letra referente ao filtro junto à indicação de decibéis. Assim, temos medidas em dB(A), dB(B), etc. Utiliza-se também a notação dB_A , dB_B , etc. As curvas de ponderação relativas aos filtros A e C estão mostradas na figura 2.

Uma grande quantidade de testes terminou por indicar que, em geral, o filtro que fornece a melhor correlação entre o nível medido e o som percebido (além, também, do potencial de incômodo do ruído) é o filtro A, que reduz significativamente a contribuição de sons de frequência abaixo de 200 Hz. Por causa disso, quase toda a legislação sobre poluição sonora refere-se, hoje em dia, a níveis medidos em dB(A).

A grande maioria dos medidores permite, ao menos, a medição do nível de ruído em dB(A) e em dB(C). É comum encontrar, para o ruído de fundo, níveis em dB ou em dB(C) 10 a 15 dB acima do valor em dB(A). Essa diferença deve-se basicamente ao ruído grave que, para níveis moderados, não percebemos bem. Para ruídos de equipamentos específicos, essa diferença, dependendo da importância dos graves, pode ser grande, pequena ou mesmo inexistente.

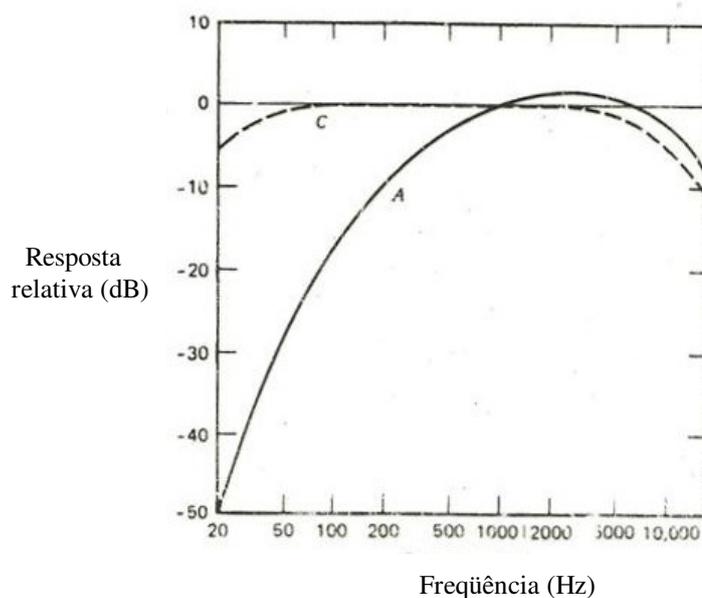


Figura 2 - Curvas de ponderação para os filtros A e C.

3.3. Níveis Típicos (em dB(A))

Limiar da audição (ideal): 0

Silêncio no campo: 20 a 30

Conversação normal: 40 a 75

Nível máximo recomendado para dormitórios (OMS): 45 (ideal: 30 a 35)

Silêncio em escritórios: 45 a 60

Máquina de lavar ou televisão: 70 a 80

Esquina de tráfego intenso: 80 a 90

Jato decolando a cerca de 400 m: 100

Discoteca: 110 a 115

Limiar da dor: 120 a 130 (dependendo do indivíduo)

Nível para causar perda traumática: 150

3.4 Operações com níveis:

Como o nível de pressão sonora se refere, basicamente, ao logaritmo da energia sonora, tanto a interpretação do significado de diferenças de níveis quanto o cálculo de níveis devido à soma de diversos efeitos serão afetados por esse aspecto.

Da propriedade de que $\log(A/B) = \log A - \log B$, segue-se que para uma dada variação do nível de ΔL ($\Delta L = L_F - L_I$), a energia correspondente ao nível final L_F será igual àquela do nível inicial L_I multiplicada por um fator fixo (dado por $10^{\Delta L/10}$). Temos então que, para uma variação do nível de pressão sonora de 10 dB, corresponde um aumento (ou redução, se a variação foi negativa) da energia sonora em 10 vezes pois, para essa variação de nível, a quantidade $\epsilon = \frac{p_F^2}{p_I^2}$, da qual se toma o logaritmo, tem de ter variado exatamente de uma ordem de grandeza. Assim, um nível de 40 dB corresponde a 10 vezes mais energia do que um de 30 dB, enquanto o mesmo é verdadeiro para os níveis de 110 e 100 dB. Constatou-se, experimentalmente, que a essa variação de 10 dB, corresponde uma sensação de que o ruído “dobrou”, no caso de aumento de nível, ou foi reduzido à metade, no caso de redução. A diferença de nível obtida ao se dobrar de fato a energia é de apenas 3 dB (pois $\log_{10} 2 = 0,3$), a qual, por sua vez, corresponde a uma variação pequena na sensação subjetiva. Abaixo estão relacionados, para valores do aumento (ou redução) do nível em dB, a sensação subjetiva associada, bem como a razão entre as energias correspondentes, para cada caso, aos níveis final e inicial.

$\Delta L = L_F - L_I$ (dB)	$\epsilon_F/\epsilon_I = 10^{\Delta L/10}$	Sensação Subjetiva
1	1,25	apenas perceptível
3	2	variação muito pequena
5	3	variação razoável
10	10	variação grande (“dobro”)
20	100	variação muito grande

Tabela I. Relação entre aumento no nível, a variação na energia e a percepção do aumento. Para redução de nível, os valores de ϵ_F/ϵ_I ($= e_F/e_I$) correspondentes são os inversos dos apresentados.

Se sabemos que uma determinada fonte sonora (uma máquina, por exemplo) produz, em certo ponto, um nível de pressão sonora L_1 , enquanto que uma outra fonte é responsável, operando sozinha, por um nível L_2 no mesmo local, para obter o nível resultante quando as fontes operarem

em conjunto, devemos, inicialmente, somar as energias relativas a cada fonte para, a partir do valor da energia resultante, calcular o novo nível. Conhecendo L_1 e L_2 obtemos os valores de $\varepsilon = p_i^2/p_0^2$, correspondentes, segundo

$$\varepsilon_i = p_i^2/p_0^2 = 10^{L_i/10}$$

(pois $L_i = 10 \log_{10} \varepsilon_i$) e calculamos o nível resultante, L_R , como

$$L_R = 10 \log_{10}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$$

Para o caso particular de $L_1 = L_2$, obtemos

$$L_R = 10 \log_{10}(2\varepsilon_1) = 10 \log_{10} \varepsilon_1 + 10 \log_{10} 2 = L_1 + 3 \text{ dB}$$

resultado que expressa o fato já citado de que, ao dobrarmos a energia sonora, obtemos um aumento de apenas 3 dB, independentemente do nível original. Assim, o efeito combinado de duas fontes produzindo, cada uma, 80 dB, será de 83 dB, ao passo que, se cada uma produzisse 65 dB, teríamos $L_R = 68$ dB.

Se a diferença entre L_1 e L_2 for maior do que 10 dB, como ε_1 e ε_2 vão diferir por mais de uma ordem de grandeza, a soma $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$ pode ser aproximada pelo maior dos valores de ε , L_R sendo dado pelo valor correspondente de L (i.e., pelo maior deles). Neste caso, o ruído de menor nível não tem energia suficiente para aumentar o nível resultante em 0,5 dB, podendo ser desconsiderado.

Podemos concluir então que o efeito combinado de dois níveis fica sempre entre o maior deles e esse valor mais 3 dB. Para $L_1 = 80$ dB e $L_2 = 85$ dB, por exemplo, temos,

$$L_R = 10 \log_{10}(10^8 + 10^{8,5}) = 86 \text{ dB}$$

Para o caso genérico da adição da contribuição de duas fontes, a quantidade δ que deve ser somada a L_2 para obtermos o nível resultante L_R pode ser calculada como $\delta = 10 \log_{10}(1 + \varepsilon_1/\varepsilon_2) = 10 \log_{10}(1 + 10^{-(L_2-L_1)/10})$ e está apresentada abaixo em função da diferença entre os níveis, $L_2 - L_1$. Os valores de δ na tabela foram arredondados para o inteiro mais próximo.

$L_2 - L_1$ (dB)	-6	-5	-4 ou -3	-2 ou -1	0 ou 1	2 ou 3	4 a 9	=10
δ (dB)	7	6	5	4	3	2	1	0

Tabela II. Valor a ser adicionado a L_2 para obter o nível resultante da contribuição de duas fontes em função da diferença dos níveis devidos a cada uma no mesmo ponto.

Para o exemplo acima, temos $L_2 - L_1 = 5$ dB e $\delta = 1$ dB, o que leva a $L_R = 86$ dB. Trocando L_1 com L_2 , i.e., considerando $L_1 = 85$ dB e $L_2 = 80$ dB, temos $L_2 - L_1 = -5$ dB e $\delta = 6$ dB, obtendo, novamente, $L_R = 86$ dB.

Podemos observar que o valor da amplitude de referência, p_0' , não tem influência nas operações com níveis. Isto acontece porque essas operações envolvem valores que expressam sempre a comparação com uma mesma referência. Apenas se desejamos calcular a amplitude de pressão correspondente a um determinado nível precisaremos utilizar o valor de p_0' .

Os procedimentos discutidos são válidos para operações com níveis em dB, dB(A) ou qualquer outra ponderação, desde que, é claro, todos os valores envolvidos refiram-se à mesma ponderação. O nível resultante, por exemplo, da operação conjunta de duas máquinas, cada uma respondendo por 80 dB(A), será de 83 dB(A). Não podemos, entretanto, calcular o nível final se um dos valores é dado em dB e o outro em dB(A).

3.5. Escalas de tempo para a medição de níveis:

A amplitude das flutuações de pressão empregada na medição do nível de pressão sonora é calculada a partir da média obtida em um determinado intervalo de tempo, Δt , às vezes chamado de tempo de resposta da medição. Segue-se então que, se este intervalo de tempo for maior do que a duração do ruído, o nível máximo observado será menor do que o que seria medido com um intervalo menor, perdendo-se informação importante. Da mesma forma, o aumento de precisão causado pela redução do intervalo será responsável pelo aumento das oscilações no nível medido, o que, para um ruído contínuo, nem sempre é conveniente. Para que se possa optar pelo Δt adequado, os medidores possuem pelo menos duas opções para a duração desse intervalo. Essas opções são padronizadas e chamadas de “fast” (rápida) ou “slow” (lenta). Alguns medidores possuem também a escala “impulse”, utilizada para medição de ruído de impacto, que tem duração muito curta. Os valores do Δt para cada um dos casos é: “slow”: $\Delta t = 1,0$ s.; “fast”: $\Delta t = 125$ ms; “impulse”: $\Delta t = 35$ ms. As normas sempre fazem referência à escala de tempo que deve ser utilizada para uma determinada medição.

A medição pode também ser realizada com uma duração arbitrária, estendendo-se por alguns segundos, minutos, ou mesmo horas. Nesse caso, o nível medido, chamado de *nível equivalente* (L_{eq}), é obtido a partir do valor médio da energia sonora captada durante a medição. O procedimento para o cálculo do L_{eq} a partir de uma série de medidas do nível de pressão sonora está descrito no Apêndice A.

4. Efeitos da Poluição Sonora

- Interferência na comunicação: ocorre quando o ruído não permite que se compreenda alguma informação, podendo ser responsável por acidentes. Para que um som mascare completamente um outro, deve ter um nível pelo menos 15 dB acima deste. Mesmo com níveis menores o conteúdo de um som (da voz, por exemplo) pode não ser bem compreendido.

- Perturbação do sono e da concentração: depende basicamente de quão perceptível é o ruído e de qual o incômodo causado, e não apenas do nível.

- Stress e tensão: dependem tanto do nível como de características particulares do ruído. Na verdade, o incômodo é bastante difícil de quantificar. Em geral, um ruído agudo incomoda mais que um grave de mesmo nível em dB(A). Um som formado de tons puros destacados (como o de uma sirene) é mais irritante que um ruído de mesmo nível em dB(A) mas com uma grande distribuição em frequência. Da mesma forma, a existência de periodicidade (como no ruído de marteladas ou de uma torneira pingando regularmente) também é um fator de incômodo. Para níveis a partir de 75 dB(A), podem aparecer, devido ao incômodo, diversas reações físicas, entre as quais taquicardia, modificações na respiração ou dilatação das pupilas. Dependendo do incômodo causado, algumas dessas reações podem surgir mesmo com níveis menores.

- Problemas de saúde: podem ser devido ao stress causado pelo ruído ou relacionados a danos ao

aparelho auditivo.

Causados por stress: Se o stress provocado pelo ruído for muito prolongado, não se referindo a uma situação ocasional, mas sendo de longa duração e de repetição quase diária (como por exemplo, ocorrendo durante a maior parte do expediente de trabalho) pode levar ao aparecimento de problemas de saúde, como úlceras ou problemas cardiovasculares, ou mesmo problemas psicológicos. O ruído provoca a alteração de vários processos fisiológicos, tanto pelas diversas reações de defesa que desencadeia no organismo, quanto pela vibração causada pelas ondas, sejam elas audíveis ou não. As ondas infrasônicas, principalmente, têm diversos efeitos sobre o organismo, sendo responsáveis, por exemplo, por distúrbios pulmonares e do sistema nervoso. Enquanto alguns desses efeitos estão bem documentados, outros não são ainda bem compreendidos.

Perdas auditivas: As perdas auditivas podem ser classificadas em temporárias ou permanentes, as permanentes podendo ser progressivas (as que aumentam com o tempo) ou traumáticas.

As perdas temporárias, que têm como exemplo típico a “surdez pós-discoteca”, são causadas por uma reação de defesa do ouvido: na presença de níveis intensos, a musculatura do ouvido médio se contrai, diminuindo a transmissão do ruído para o ouvido interno, onde estão as células auditivas. Cessada a exposição a níveis altos, a audição volta progressivamente ao normal. Esse mecanismo de defesa é chamado de “reflexo acústico”. As perdas temporárias ocorrem para níveis a partir de 70 dB(A).

A perda permanente progressiva devido ao ruído decorre da exposição frequente a níveis intensos. Nesses casos, o reflexo acústico não é suficiente para proteger efetivamente o ouvido, o efeito cumulativo sendo suficiente para causar a morte de uma quantidade significativa de células auditivas. Com a exposição continuada mais células são afetadas, aumentando a surdez. É importante notar que as células auditivas não sofrem reposição. Nascemos com cerca de 30.000 a 40.000 dessas células em cada ouvido, dispostas em um órgão em forma de caracol, chamado de cóclea, que fica localizado no ouvido interno. As perdas permanentes iniciam-se, geralmente, em torno de 4 kHz, i.e., na faixa em que somos mais sensíveis. Estudos com trabalhadores expostos ao ruído por cerca de 8 horas diárias durante 10 anos indicam que, para a maioria dos indivíduos, não há perda auditiva para a exposição abaixo de 80 dB(A). A parcela mais sensível da população (cerca de 10%), entretanto, pode apresentar perdas em torno da frequência de 4 kHz para exposição continuada a 75 dB(A) ou mesmo (1%) a 70 dB(A). Para o nível de 85 dB(A), a perda, entre 3 e 6 kHz, é de cerca de 10 dB para a maioria da população e de 15 a 20 dB para os mais sensíveis; para 90 dB(A), essa perda é, em média, de 20 dB. Para níveis acima de 90 dB(A) as frequências mais baixas são também afetadas.

A perda traumática ocorre devido à exposição a um único evento que, por provocar um nível de ruído extremamente intenso (da ordem de 150 dB), leva à destruição de um grande número de células auditivas, bem como de outros componentes do ouvido médio e do ouvido interno.

Nas figuras 3 a 5 estão ilustradas, em função da frequência, alterações no limiar da audição devido a perdas típicas com a idade (fig. 3), perdas permanentes devido à exposição continuada a ruído industrial (fig. 4) e perdas temporárias dos integrantes de uma banda de rock após uma apresentação (fig. 5). A existência de uma perda maior para frequências em torno de 4 kHz do que para as frequências mais altas, como na figura 4, é evidência de que a perda foi devido ao ruído, pois a perda auditiva com a idade, como mostrado na figura 3, aumenta com a frequência.

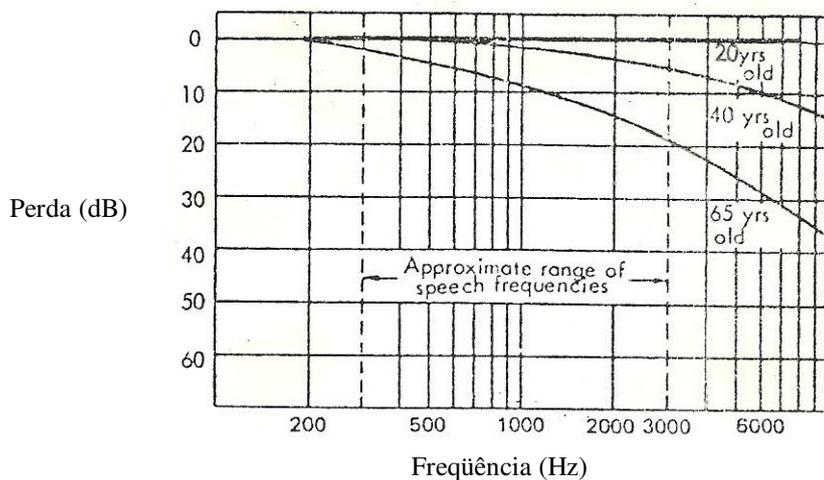


Figura 3 - Perda auditiva com a idade (típica).

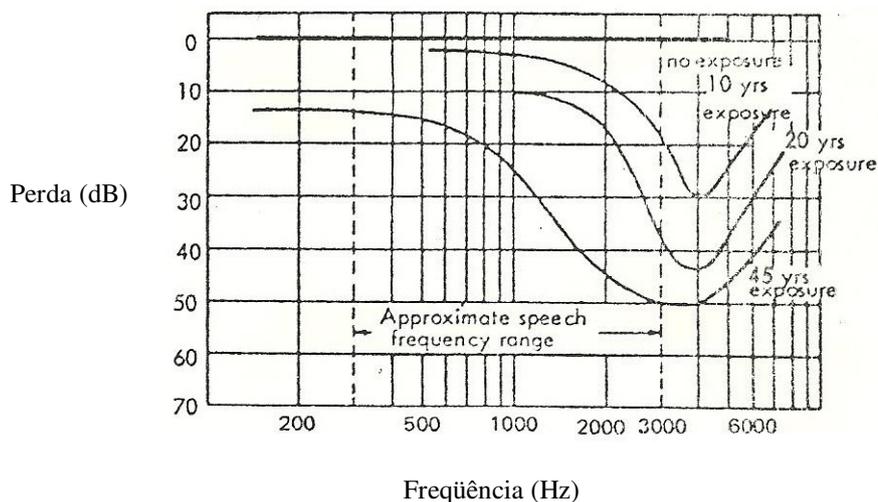


Figura 4 - Perda auditiva típica de trabalhadores devido à exposição continuada ao ruído, descontado o efeito da idade.

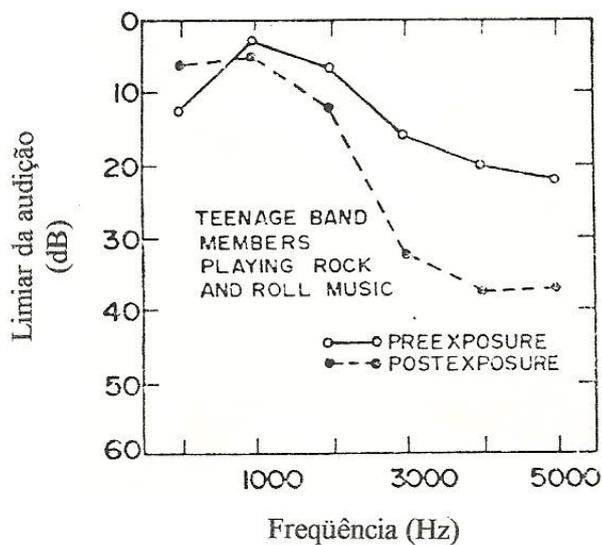


Figura 5 - Perda auditiva temporária: Limiar da audição (média) dos componentes de uma banda de rock, antes (—) e após (- -) apresentação.

5. Legislação sobre Poluição Sonora

A legislação sobre poluição sonora refere-se ao ruído no ambiente de trabalho (anexos 1 e 2 da NR-15 e, também, a NR-17) e ao ruído urbano.

5.1. Ruído no ambiente de trabalho

A NR-15, “Atividades e Operações Insalubres”, dispõe, nos anexos 1 e 2, sobre o tempo de exposição a ruído no ambiente de trabalho. O anexo 1 refere-se a ruído contínuo ou intermitente e o anexo 2 ao ruído impulsivo.

Para ruído contínuo (ou intermitente), o critério básico é que o nível limite para exposição de 8 horas diárias é de 85 dB(A). Para cada aumento de 5 dB(A) o tempo de exposição é reduzido à metade, até o limite de exposição para $L = 115$ dB(A), que é de 7 minutos. Para níveis maiores que este, é obrigatório o uso de proteção auditiva para qualquer tempo de exposição. Estes níveis devem ser medidos com o medidor em resposta lenta (slow). O critério de permitir o aumento de 5 dB(A), i.e., aumentar em cerca de três vezes a energia sonora recebida (ver tabela I), para uma redução do tempo de exposição à metade é baseado em experimentos que mostram que a modificação do nível e do tempo de exposição segundo esses valores não altera as perdas temporárias produzidas.

A “dose” de ruído é obtida a partir da integração, durante toda a jornada de trabalho, da energia sonora recebida pelo trabalhador, sendo geralmente fornecida em porcentagem da dose máxima permitida para a jornada de trabalho, a qual corresponde à exposição à 85 dB(A) por 8h (e, também, à exposição à 90 dB(A) por 4h, ou à 95 por 2h, etc.). Assim, um trabalhador que tenha sido exposto a 90 dB(A) por 2 horas, recebeu uma dose de ruído de 50 %. Os “dosímetros”, aparelhos que medem a dose de ruído, admitem graduação dos valores que correspondem à dose completa (nível e tempo de exposição) e também do aumento do nível correspondente à redução do tempo de exposição à metade (3 ou 5 dB(A)), normalmente chamado de “exchange rate”. Esses valores apresentam algumas variações de acordo com o país.

O ruído de impacto, ou impulsivo (caracterizado como aquele que dura menos de um segundo, com eventuais picos sucessivos separados por mais de um segundo), por ter rápida duração, não permite o acionamento do reflexo acústico (o mecanismo de defesa referido anteriormente). Por isso, é considerado como mais perigoso, sendo objeto de regulamentação separada. O nível do ruído impulsivo não deve ser medido em dB(A) mas, preferencialmente em dB (sem nenhuma filtragem), usando-se o tempo de resposta para impacto (impulse) e, na impossibilidade disso, em dB(C), com resposta rápida (fast). Os trabalhadores não deverão ser expostos sem proteção a níveis de ruído de impacto acima de 130 dB (impulse) ou 120 dB(C) (fast).

O objetivo dessa regulamentação é evitar perdas auditivas significativas nos trabalhadores, de forma que os níveis máximos estipulados por ela não consideram aspectos relacionados ao conforto. O limite de 85 dB(A) para a exposição durante 8 horas diárias é adotado pela maioria dos países, sendo que alguns, como os Estados Unidos, utilizam ainda 90 dB(A). Atualmente apenas a Holanda utiliza, para a exposição por 8 horas, o limite de 80 dB(A). Esse valor, como notado anteriormente, garante, para a maioria da população, a ausência de perdas auditivas permanentes.

A questão do conforto é abordada na NR-17, “Ergonomia”, que estipula que para atividades envolvendo solicitação intelectual e necessidade de atenção constante, os níveis de ruído devem

ser aqueles estabelecidos na NBR 10152, “Níveis de Ruído para Conforto Acústico”. Essa norma recomenda, como níveis máximos adequados para escritórios, níveis entre 45 e 65 dB(A), dependendo da utilização. A NR-17 estabelece também, para os casos não especificados na NBR 10.152, o nível limite de 65 dB(A).

5.2. Ruído Urbano

A norma brasileira que versa sobre ruído urbano é a NBR 10.151, “Avaliação de Ruído em Áreas Habitadas Visando o Conforto da Comunidade”. A versão atual é uma revisão da original de 1987, e vigora desde 1 de agosto de 2000. Esta norma (que está, atualmente, em processo de revisão) estabelece critérios para ruído no exterior em função do tipo de área e do período do dia (Tabela III).

Tipos de Áreas	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais e escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Tabela III – Nível Critério para ambientes externos, em dB(A), segundo a NBR 10.151.

- A norma estabelece que o nível a ser medido é o nível equivalente em dB(A), L_{Aeq} , não fixando, entretanto, o intervalo de tempo para a duração de sua medição. Esse intervalo deve ser escolhido de forma a permitir a caracterização do ruído, o valor adotado devendo ser informado no relatório de medição.

- Para o caso particular da avaliação de ruído de impacto, em vez do L_{Aeq} , deve ser utilizado o nível máximo em dB(A) medido com resposta rápida (fast).

- Os níveis critério para medições realizadas no interior de edificações, com as janelas abertas, são 10 dB(A) abaixo dos níveis correspondentes para medições no exterior. Com as janelas fechadas, a redução no critério passa a ser de 15 dB(A).

- A norma estabelece uma correção de + 5 dB(A) a ser adicionada ao nível medido na ocorrência de características peculiares, como a existência de tons puros audíveis ou de ruído de impacto. Essa correção procura expressar o maior potencial de incômodo desses ruídos.

A resolução do CONAMA de nº 001, de 08 de março de 1990 estabelece que a emissão de ruídos em decorrência de atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, inclusive as de propaganda política devem, em todo o território nacional, respeitar os níveis considerados aceitáveis pela NBR 10.151. Sendo assim, os governos estaduais ou municipais podem, se desejarem, estabelecer limites mais restritivos do que os prescritos por essa norma, mas nunca limites superiores a esses.

6. Controle da Poluição Sonora

O ruído é gerado, propaga-se pelo ar ou é transmitido por estruturas, chegando às pessoas. Por isso, é costume dividir as estratégias de controle de ruído em três modalidades:

controle na fonte,
controle na trajetória,
controle no receptor.

O controle de ruído na fonte envolve a introdução de modificações na própria fonte sonora a fim de reduzir o ruído gerado por ela. Compreende desde alterações de projeto (como o desenvolvimento de motores mais silenciosos) até modificações simples como a redução (ou amortecimento) de vibrações, de impactos ou de turbulência. A seleção de equipamentos, visando a escolha dos mais silenciosos, também pode ser considerada uma forma importante de exercer o controle na fonte.

O controle na trajetória envolve normalmente o uso de materiais isolantes e/ou absorventes, seja para dificultar a transmissão do ruído e de vibrações (isolamento), seja para diminuir a importância das reflexões (através da absorção). Quanto mais rígido ou pesado for um material, mais isolante ele será, pois maior será a resistência que opõe à vibração causada pelas ondas sonoras. O material absorvente, por sua vez, deve ser poroso, para permitir que parcela significativa da energia sonora incidente seja dissipada sob a forma de calor enquanto a onda se propaga no seu interior. O uso de barreiras para proteger as habitações do ruído de tráfego é um exemplo típico de controle na trajetória para ruído em exteriores. O enclausuramento (ou encapsulamento), i.e., a construção de uma “caixa” em torno da fonte, rígida o bastante para impedir que a maior parte do som gerado se propague para fora, pode ser visto como um exemplo de controle na trajetória. Nos casos em que o enclausuramento é parte integrante do projeto da fonte, que é comercializada com essa característica, deve ser considerado como controle na fonte.

O controle no receptor refere-se à proteção deste, podendo ser atingido através de equipamento de proteção individual (no caso, fones ou plugues de ouvido) e/ou através do controle do tempo de exposição, para garantir que os limites constantes da NR-15 sejam respeitados. Para isso é desejável o mapeamento dos níveis de ruído para a identificação das áreas de risco. Para evitar, de fato, perdas auditivas, é conveniente a verificação periódica das condições auditivas dos trabalhadores pois, como já comentado, os limites prescritos pela norma não garantem a ausência total de perdas; além do mais, a sensibilidade ao ruído varia de acordo com o indivíduo. Quanto ao uso de equipamentos de proteção, é importante enfatizar que o efeito esperado só será obtido se esses equipamentos estiverem em bom estado e se forem utilizados corretamente.

A redução da poluição sonora está fortemente associada à educação da população. Além da utilização das técnicas clássicas de controle de ruído, comentadas acima, é essencial o aperfeiçoamento da legislação, a fiscalização efetiva e a elaboração e realização de campanhas de conscientização, que enfatizem tanto os males causados pelo ruído quanto a necessidade e o direito individual à paz, tranquilidade e sossego. Essas medidas, que visam a redução da produção de ruído a partir da modificação dos hábitos da população, podem ser efetivamente consideradas como “controle de ruído na fonte”. É também necessário a incorporação de uma mentalidade orientada para esses aspectos no planejamento urbano, principalmente no que diz respeito à implantação ou ampliação de vias expressas, pois a implementação de medidas de controle de ruído em uma obra já terminada envolve sempre custos muito superiores aos que corresponderiam à hipótese de considerar essas medidas desde a fase de projeto.

Na cidade do Rio de Janeiro, reclamações sobre ruído são recebidas pela Secretaria Municipal de

Meio Ambiente da Cidade (SMAC) através do telefone 1746. Informações sobre os tipos de ruído/atividades que a SMAC fiscaliza podem ser encontradas na página da entidade relacionada ao controle da poluição sonora, no endereço:

<http://www.rio.rj.gov.br/web/smac/exibeconteudo?article-id=148006>

BIBLIOGRAFIA

Beranek, L. L., *Noise and Vibration Control*, Institute of Noise Control Engineering, Washington, 2a. edição, 1988.

Bistafa, S. R., *Acústica Aplicada ao Controle de Ruído*, Edgar Blucher, São Paulo, 2006.

Gerges, S. N. Y., *Ruído, Fundamentos e Controle*, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2a. edição, 2000.

Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., Sanders, J.V., *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, New York, 3a. edição, 1982. (particularmente caps. 11 e 12)

Martin, A. M., “Occupational Hearing Loss and Hearing Conservation”, in *Noise and Vibration* (editores: R. G. White e J.G. Walker), Ellis Horwood Limited, Chichester, 1982, pp. 781-804.

Wilkins, P. A., “Effects of Noise on People”, in *Noise and Vibration* (editores: R. G. White e J.G. Walker), Ellis Horwood Limited, Chichester, 1982, pp. 805-826.

APÊNDICE A – O Cálculo do Nível Equivalente

Os medidores modernos possuem a função “nível equivalente”, L_{eq} , que permite a medição direta do nível correspondente à energia sonora média durante um intervalo qualquer T (maior que um segundo), e que é dado por:

$$L_{eq} = 10 \log \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \frac{(p'(t))^2}{p_0'} dt \right\}$$

O L_{eq} é geralmente medido com a ponderação A, sendo notado então como L_{Aeq} . A informação sobre o intervalo de tempo T utilizado na medição pode ser também incorporada à notação que, nesse caso, passa a $L_{Aeq,T}$.

Para o caso em que não se dispõe da medição direta do nível equivalente, este pode ser calculado a partir de uma série de medidas de nível com a resposta rápida (fast), tomadas a intervalos regulares (a cada 3 ou 5 segundos, por exemplo). O L_{Aeq} é então obtido pela fórmula

$$L_{Aeq} = 10 \log \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right\}$$

onde L_i representa cada um dos níveis medidos, em dB(A), e n é o número total de leituras. O mesmo resultado será obtido se calcularmos o nível correspondente à soma das contribuições dos

níveis individuais e subtrairmos do resultado $10 \log n$.

Por exemplo, para a série de medidas de nível: 80 dB(A), 80 dB(A), 82 dB(A), 87 dB(A), 80 dB(A), os valores tendo sendo obtidos com o mesmo espaçamento no tempo (a cada X segundos), o nível equivalente é 83 dB(A) . Note-se que a “soma” dos níveis, utilizando-se a Tabela II, fornece 90 dB(A) e que $90 - 10 \log 5 = 83$. O cálculo direto pela fórmula resulta em 82,8 dB(A).