

INTRODUÇÃO À TEORIA ACÚSTICA

Eduardo Bauzer Medeiros

Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG

Av. Antônio Carlos, 6627, Campus - Pampulha

31270-901 Belo Horizonte, MG - Brasil

<http://www.demec.ufmg.br> flugzbau@dedalus.lcc.ufmg.br

Resumo – O texto apresenta uma visão geral da Acústica, para aqueles que desejam usá-la como uma ferramenta prática, mas com uma compreensão essencial sobre os fundamentos básicos da teoria. Após uma apresentação da teoria básica de ondas sonoras, e dos princípios de propagação e absorção acústica, são apresentadas as escalas mais comuns, bem como os parâmetros e grandezas normalmente utilizados. Aspectos básicos de fisiologia são apresentados de forma a facilitar a compreensão de alguns aspectos da percepção auditiva. Discute-se também de forma resumida a percepção subjetiva. A teoria é utilizada para introduzir alguns conceitos básicos de ambientes e salas. Espera-se que o este texto possa proporcionar um estímulo para aqueles que queiram adquirir um conhecimento mais completo sobre este assunto que é tão interessante e importante.

Abstract - This text provides an initial insight into Acoustics, intended for those who want to use it as a practical tool, but with a basic grasp of the fundamentals of the underlying theory. A discussion of fundamental units and parameters and the more common scales follows a brief overview of sound wave theory together with propagation and absorption principles. Basic elements of physiology area provided as tool to help with the understanding of hearing perception. Subjective perception has also been briefly discussed. The theory is used to introduce a few basic principles of room parameters. It is hoped that the present text should provide the necessary stimulation for those who want to acquire deeper knowledge on this most important and interesting subject.

I. INTRODUÇÃO

O interesse do homem na Ciência do Som é provavelmente tão antigo quanto a História. Alguns sítios arqueológicos revelaram a existência de flautas rudimentares no período paleolítico[1]. Embora o conhecimento científico fosse limitado no mundo antigo o homem já utilizava instrumentos musicais e sabia como transmitir sons em distâncias longas. Durante o período de desenvolvimento da cultura helênica julgava-se que as propriedades do som e a sensação de audição teriam origem na filosofia da proporção dos números e na harmonia dos tons. A arte da construção de teatros abertos tornou-se nesta época a mais importante manifestação da técnica da Acústica. Durante muitos séculos o conhecimento pouco progrediu, e somente ao final da

Renascença apareceram novos fatos. Os primeiros trabalhos de cunho científico começaram somente a surgir no século XVII, com Newton, Galileo e outros. Nesta época (1701) passou também a ser utilizada a palavra “Acústica”, que se originou do grego “ακουω”, que significa *ouvir*.

A teoria da propagação como se conhece hoje em dia somente passou a ser desenvolvida a partir do século XIX, a partir da teoria ondulatória desenvolvida por Fourier, Fresnel, Laplace e outros. Durante o século XX com o desenvolvimento das diversas áreas associadas como Eletrônica, Instrumentação, etc foi possível um notável desenvolvimento, com uma notável aplicação da Acústica às diversas áreas do conhecimento.

Acústica é definida de acordo com a norma ANSI como a Ciência do Som, incluindo sua produção, transmissão e efeitos [2]. Sua natureza é essencialmente interdisciplinar com as diversas áreas se combinando (Figura 1) para formar uma estrutura harmoniosa porém complexa.

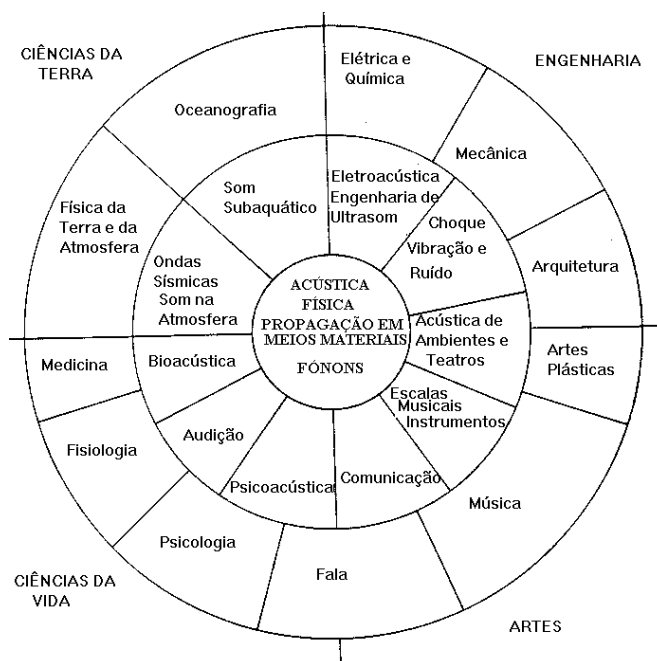


Figura 1: As áreas da Acústica

O estudo da Acústica é portanto desenvolvido por pessoas dedicadas a todas estas áreas do conhecimento. A maior parte dos projetos é multidisciplinar e para se conseguir uma maior chance de sucesso deve englobar elementos e especialistas de diversas áreas

II. FUNDAMENTOS DA TEORIA DO SOM

O som pode ser analisado de duas formas distintas: como uma perturbação física em um meio ou como um estímulo psico-fisiológico. Para diversas aplicações práticas tais como a Engenharia de Áudio as duas considerações são importantes e devem ser observadas em conjunto. As principais considerações, do ponto de vista de Engenharia de Áudio, para o estudo das duas formas são apresentadas no texto seguinte.

A. Ondas sonoras

Ondas sonoras são ondas longitudinais de compressão que só podem se propagar através de um meio físico, tal como o ar, a água, o alumínio, etc. Com a passagem da onda sonora as partículas deste meio vibram, ocorrendo uma transferência de quantidade de movimento por meio desta movimentação e das colisões entre as partículas. Este processo pode ser visualizado na Figura 2, que mostra um diapasão que ao vibrar produz som que se propaga pelo ar produzindo compressões e rarefações neste meio gasoso.

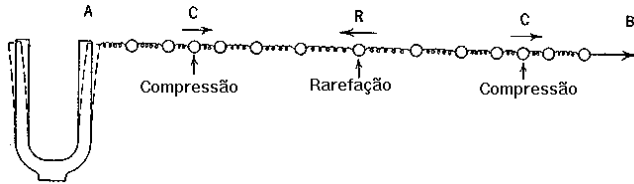


Figura 2: A formação da onda sonora

A forma como estas perturbações ocorrem depende das propriedades do meio de transmissão, em particular sua elasticidade e densidade, e de acordo com a força de excitação. A idéia básica destes princípios pode ser visualizada na figura 3.

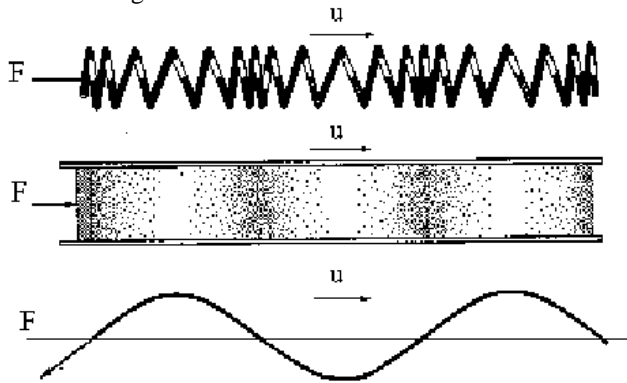


Figura 3: Elasticidade da onda sonora

O modelo básico de propagação de ondas acústicas pode ser convenientemente representado pela equação de onda, que considerando-se o caso unidimensional plano ilustrado na figura é possível escrever-se:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

onde:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}} - \text{Velocidade de propagação do som}$$

B - é o módulo adiabático do meio

ρ - a densidade do meio

u - é o deslocamento instantâneo da figura 2

A solução geral da equação é geralmente expressa na forma complexa exponencial, ou seja (2):

$$u(x, t) = \mathbf{A} e^{j(\omega t - \kappa x)} + \mathbf{B} e^{j(\omega t + \kappa x)} \quad (2)$$

\mathbf{A} e \mathbf{B} são constantes determinadas a partir das condições iniciais, e:

$$\kappa = \omega/c \quad (3)$$

onde:

κ - número de onda

$\omega = 2\pi f$ - frequência angular

Uma forma alternativa a da equação 2 seria a representação numa soma de termos em seno e cosseno de uma série, da mesma forma como pode ser feito para outros tipos de fenômenos oscilatórios e ondulatórios. Além disto equações análogas existem para a pressão e outras propriedades da onda sonora.

Para os gases perfeita velocidade de propagação depende essencialmente da temperatura e pode ser escrita como (3)

$$c = \sqrt{\gamma R T} \quad (3)$$

onde:

γ - c_p/c_v , relação entre os calores específicos

R - constante universal dos gases

T - temperatura absoluta do gás

Além da velocidade, uma onda sonora é também caracterizada por seu comprimento, frequência como se segue:

$$c = \lambda f \quad (4)$$

onde:

f - frequência

λ - comprimento de onda

Para líquidos e sólidos a avaliação é consideravelmente mais complexa, sendo que para os últimos existe a possibilidade de velocidade transversal além da longitudinal, normalmente considerada.

B. Frentes de Onda e Raios Acústicos

A propagação do som pode ser convenientemente representada, para uma série de problemas práticos, utilizando-se o conceito de frente de onda. Frentes de onda são superfícies onde as ondas sonoras proveniente de uma fonte estão em fase, podendo apresentar geometrias variadas que são estabelecidas principalmente em função da geometria da fonte sonora. A Figura 4 mostra alguns dos tipos de frente de onda mais comuns

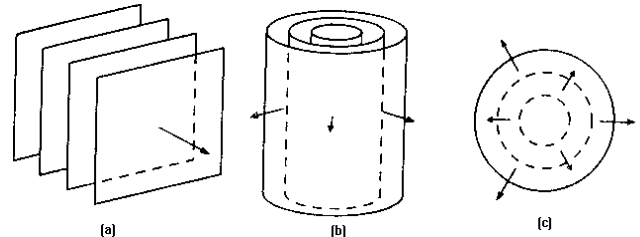


Figura 4: Frentes de onda: a) plana, b) cilíndrica, c) esférica

A propagação pode ainda ser analisada com o auxílio do conceito de "raio acústico", uma analogia com a teoria da

Ótica, que apresenta bons resultados quando o comprimento de onda for pequeno em relação às dimensões geométricas do problema. Assim como nos raios de luz, o raio acústico pode ser utilizado para se fazer um traçado de linhas que definem projeções e sombras conforme a Figura 5.

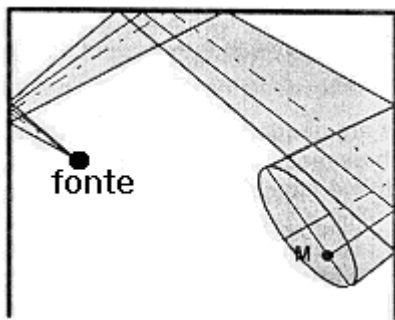


Figura 5: Traçado de raios e sombras acústicas

O traçado de raios oferece uma série de vantagens em termos de simplificação e facilidade de visualização de um problema. Entretanto sua aplicabilidade fica limitada a problemas onde o comprimento de onda não for grande em relação às dimensões geométricas do caso estudado.

C. Alguns Fenômenos Ondulatórios

Alguns fenômenos de propagação podem ser analisados a partir da teoria ondulatória. Ondas sonoras podem produzir interferência espacial, que pode ser de natureza construtiva ou destrutiva.

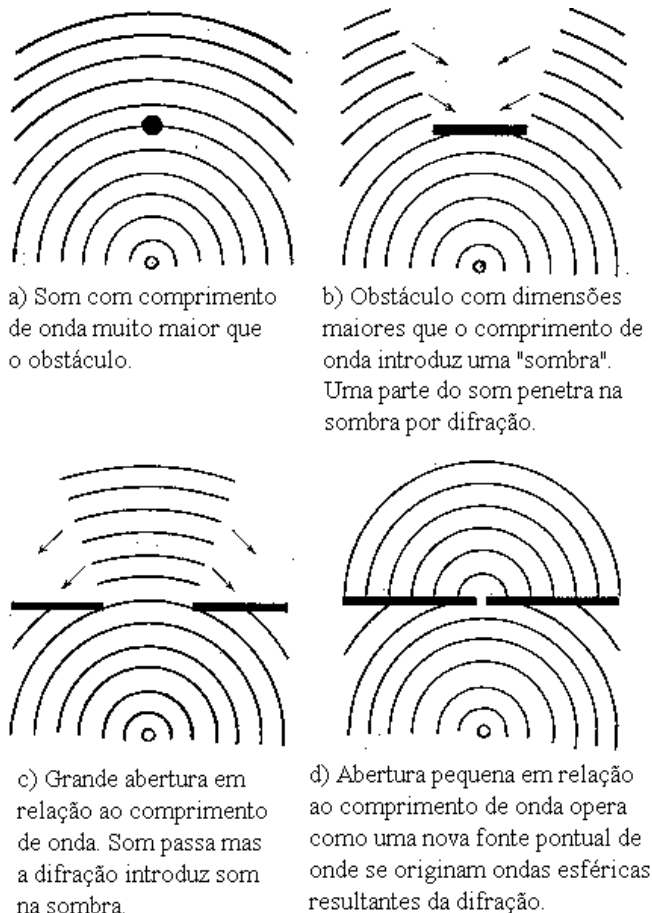


Figura 6: Comportamento de Ondas Sonoras

Ondas sonoras podem ainda estar sujeitas a fenômenos de difração, refração e reflexão. A refração ocorre quando a

onda sonora passa de um meio para outro e resulta de uma variação na velocidade de propagação de um meio para outro. A difração ocorre quando uma parte da onda sonora é defletida ao passar por uma quina, com um padrão típico de espalhamento. Isto é que ocorre por exemplo, na quina de uma barreira acústica, como se observa na Figura 7, ocorrendo ainda a presença de reflexão.

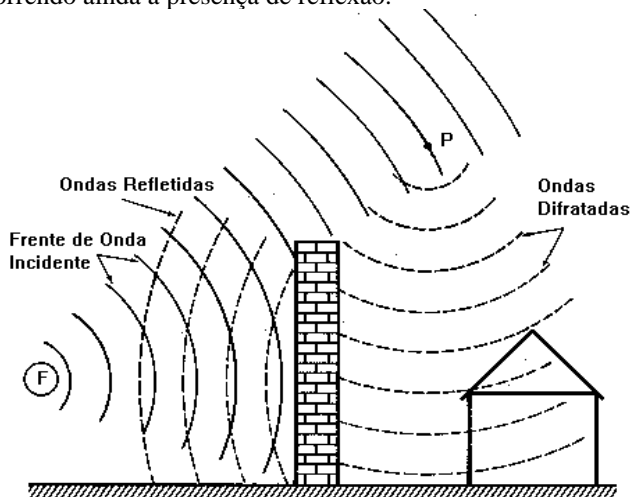


Figura 7: Ondas Incidentes, Refletidas e Difratadas

D. O fenômeno da Absorção

O estudo anteriormente desenvolvido não considerou um fenômeno de grande importância para uma série de casos: a absorção acústica. A teoria clássica sugere alguns modelos de avaliação baseados em perdas viscosas, por aquecimento e por vibração molecular. Estes três efeitos são simplesmente o resultado da aplicação das Leis de Conservação, uma vez que o meio de propagação da onda acústica deve vibrar para permitir a sua passagem.

Os modelos clássicos de absorção permitem uma análise qualitativa do problema mas para a grande maioria dos casos práticos são insuficientes para se avaliar o comportamento no caso real de um ambiente. Apenas para alguns casos mais simples (como absorção do som no ar) existem equações analíticas. Para os outros casos existe a necessidade do uso de resultados de ensaios ou (mais raramente) do resultado de simulação computacional utilizando modelos bastante complexos. O objetivo destes dois tipos de teste é o de determinar o coeficiente de absorção acústica α . Os modelos básicos baseiam-se em estruturas do tipo apresentado na figura 8 que representa um modelo simplificado de um material para o estudo de sua capacidade de absorção

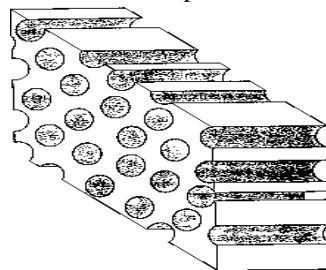


Figura 8: Material absorvente idealizado

Os materiais chamados "acústicos" exibem alta absorvidade que é conseguida com materiais porosos, ou

fibrosos, que intensificam os mecanismos anteriormente citados. Além disso, também em função das leis de conservação o aumento da massa tende a aumentar a absorção.

Como resultado prático, a amplitude sonora transmitida pode variar em função da absorção, internamente (dentro de um corpo) e/ou alterar (superficialmente) a reflexão, uma vez que parte da onda incidente é absorvida na superfície. A figura 9 ilustra o comportamento de transmissão através de uma parede.

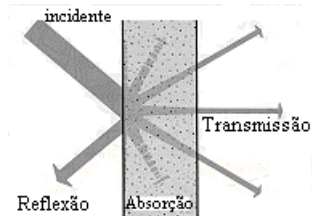


Figura 9: Transmissão através de uma parede

Finalmente cabe acrescentar que o comportamento da figura pressupõe uma parede rígida, com pequenas vibrações internas do seu material constituinte. Caso algum conjunto completo da parede também vibre um mecanismo adicional será introduzido que poderá resultar em ganho de potência (por exemplo em estruturas de instrumentos musicais de corda) ou então o amortecimento pode ser intensificado. Este último caso é as vezes descrito como “painel flutuante”.

E. Caracterização de Fontes Acústicas

Para que o problema fique completamente definido é fundamental também que se caracterize de forma completa a fonte acústica. De particular importância são as características de variação de resposta com a frequência e sua diretividade, que permite estabelecer a radiação acústica em cada direção considerada.

III. UNIDADES E GRANDEZAS BÁSICAS

Assim como todas as funções periódicas, a onda sonora pode ser descrita a partir de suas propriedades físicas, como velocidade, direção, amplitude e período, além de outras propriedades relacionadas a essas como frequência e comprimento de onda. Para uma avaliação global estas grandezas são grupadas para que possam ser quantificadas, como se segue.

A. Intensidade Acústica

A intensidade acústica de uma onda sonora é grandeza básica para se fazer uma avaliação. Representa a taxa média de fluxo de energia através de uma área normal à direção de propagação, podendo ser expressa como (5):

$$I = \langle pu \rangle_t = \frac{1}{t} \int_0^t pu dt \quad (5)$$

onde:

- I – Intensidade acústica (W/m^2)
- p – pressão (Pa)
- u - velocidade (m/s)
- t - tempo (s)

B. O conceito e o uso do Decibel

Embora (5) estabeleça a relação básica entre as variáveis mais importantes (pressão e velocidade) sua utilização direta

não é interessante para uma série de casos práticos. No início da década de 1920, quando já se conseguiam fazer medidas do som verificou-se que existia uma grande variação de amplitudes, fazendo com que os valores fossem representados em uma escala logarítmica. Em 1923 Harvey Fletcher e seus colegas da Bell System nos Estados Unidos introduziram o conceito de “unidade de sensação” baseada em uma mudança de 0,1 no logaritmo de base decimal da pressão média quadrática. Na verdade o ouvido humano funciona dentro de uma vasta faixa de potência e frequência, com um comportamento que se aproxima de uma função logarítmica. A partir desta idéia surgiu a escala Decibel, uma das mais utilizadas em Acústica.

As definições básicas mais utilizadas são apresentadas a seguir, e expressas com uso da escala em decibels. São apresentadas no texto seguinte, seguidas de sua avaliação na escala Decibel. É interessante ressaltar-se que por ser uma razão entre duas grandezas o decibel não é uma unidade, mas sim uma escala logarítmica.

A intensidade está normalmente associada ao nível de intensidade acústica NI (em dB) que é definido por:

$$NI = 10 \log(I / I_{ref}) \quad (6)$$

onde:

- I – Intensidade acústica
- I_{ref} – Intensidade acústica de referência (tabela I)
- log – logaritmo com base decimal

Como a intensidade acústica é proporcional ao quadrado da pressão acústica, então o nível de pressão sonora (em dB) é definido como:

$$SPL = 20 \log(p / p_0) \quad (7)$$

onde:

- SPL – Nível de Pressão Sonora
- p_{ref} – Pressão sonora de referência (tabela I)
- p – Pressão sonora

É fácil deduzir-se a partir da equação anterior a conhecida relação que um acréscimo de 6 dB no nível de pressão sonora equivale a se dobrar a pressão sonora.

E o nível de potência sonora NWS, definido como: [1]

$$NWS = 10 \log(W / W_0) \quad (8)$$

onde:

- NWS – Nível de Potência Sonora
- W_{ref} – Potência sonora de referência (tabela I)
- W – Potência sonora

O nível de potência sonora (NWS) corresponde à energia acústica total emitida por uma fonte em uma unidade de tempo, sendo possivelmente a melhor indicação da caracterização de uma fonte.

Os valores de referência para se avaliar o decibel variam com o meio. A Tabela 1 apresenta os valores para o ar e água indicando também o equivalente aproximado utilizado em várias condições práticas.

TABELA I
Valores de Referência

Meio	Valor de Referência	Equivalência Aproximada
Ar	10^{-12} W/m^2	20 μPa
	20 $\mu\text{Pa} = 0,0002 \text{ }\mu\text{bar}$	10^{-12} W/m^2
Água	1 $\mu\text{bar} = 10^5 \text{ }\mu\text{Pa}$	$6,76 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2$
	0,0002 $\mu\text{bar} = 20 \text{ }\mu\text{Pa}$	$2,70 \times 10^{-16} \text{ W/m}^2$
	1 μPa	$6,76 \times 10^{-19} \text{ W/m}^2$

1) *Adição e Subtração de Níveis*: Quando duas ou mais fontes sonoras interagem em um ambiente, as emissões das fontes se combinam, produzindo uma emissão resultante cujo nível não é simplesmente a soma dos níveis de cada fonte individual. O quadrado da pressão sonora resultante p_R das fontes equivale à soma dos quadrados das pressões das fontes individuais (Equação 7):

$$p_R^2 = p_1^2 + p_2^2 \quad (7)$$

Considerando-se a forma logarítmica dos níveis sonoros (pressão, intensidade ou potência), obtém-se:

$$NS_R = NS_1 + \Delta NS \quad (8)$$

onde NS representa um nível sonoro (em NPS, NI ou NWS). E a variação do nível sonoro é expressa por (9):

$$NS_c = 10 \log (10^{(dB1/10)} + 10^{(dB2/10)} + \dots + 10^{(dBn/10)}) \quad (9)$$

onde:

NS_c – Nível Sonoro Combinado
 dB_n – Nível Sonoro da Fonte n

Uma vez que a operação é um tanto trabalhosa, diversas referências apresentam os resultados na forma gráfica, e a figura resultante pode ser utilizada para se efetuar a operação. A Figura 10 da referência 3 é um exemplo típico.

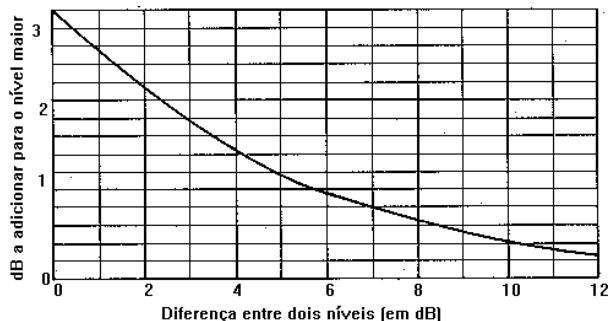


Figura 10: Somando níveis em Decibels

Procedimento análogo pode ser utilizado para a subtração de níveis. A subtração de níveis tem uma importância toda especial por sua utilização na avaliação do ruído de fundo

que deve ser considerado em uma determinada aplicação.

C. Sons que exibem uma banda de frequências

A grande maioria dos problemas reais apresenta não apenas sons de uma única frequência, mas sim uma resposta complexa, que varia dentro de uma banda de frequências. Normalmente é mais interessante agrupar-se partes do espectro por meio de algum método matemático, que possa ser associado a alguma propriedade, como por exemplo, energia associada a uma determinada banda.

Uma das formas comuns de se agrupar componentes dentro de uma região do espectro por meio da avaliação da Densidade Espectral (\mathfrak{S}), e dos níveis relacionados, como o Nível Espectral de Pressão (PSL) e o Nível Espectral de Intensidade (ISL) [3].

$$\mathfrak{S} = \frac{\Delta I}{\Delta f} \quad (10)$$

onde ΔI é a intensidade dentro do intervalo de frequências considerado, $\Delta f = 1 \text{ Hz}$.

A energia contida dentro de uma banda de frequências variando de f_1 até f_2 fica então (11):

$$I = \int_{f_1}^{f_2} \mathfrak{S} \cdot df \quad (11)$$

A avaliação em decibels se faz por meio do nível de densidade espectral ISL, definido por (12):

$$ISL = 10 \cdot \log \frac{\mathfrak{S} \cdot 1 \text{ Hz}}{I_{ref}} \quad (12)$$

Alternativamente é possível obter-se o nível de Intensidade Sonora IL, ou o nível de pressão sonora SPL (13), (14):

$$IL = ISL + 10 \cdot \log(w) \quad (13)$$

$$SPL = PSL + 10 \cdot \log(w) \quad (14)$$

onde:

PSL – Nível de Pressão Espectral
 W_{ref} – Potência sonora de referência (tabela I)
w – largura de banda ($f_1 - f_2$)

1) *O Conceito de Oitava*: Uma outra forma de quantificação do som bastante utilizada é a oitava. Por ser agradável ao ouvido e por permitir uma padronização da afinação musical introduziu-se este conceito séculos atrás com a música. A oitava baseia-se em uma razão entre frequências de 2:1, que permite se estabelecer a equação básica de definição (15)

$$\frac{f_H}{f_L} = 2^n \quad (15)$$

onde:

f_H – frequência alta (superior)
 f_L – frequência baixa (inferior)
n – número inteiro

Por questões ligadas à percepção, composição musical, etc outras relações são utilizadas em música, com outros intervalos. A figura 10 mostra como o conceito de oitava associado à escala musical foi utilizado para desenvolver o piano.

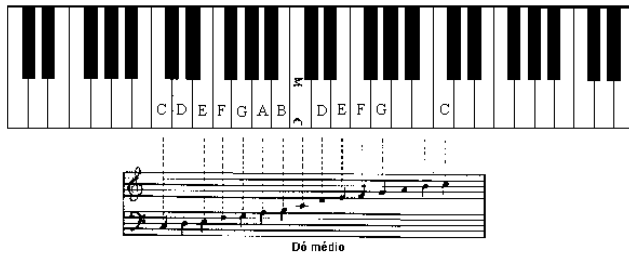


Figura 11: Oitavas do Piano e a Escala Musical

O conceito de oitava passou também utilizado em outras áreas do conhecimento com a Acústica, com o objetivo de se agrupar dentro de uma determinada banda de frequências componentes de um som complexo. Este princípio é principalmente utilizado em medições e avaliação de condições acústicas e/ou equipamentos diversos. Além da banda de oitava utiliza-se comumente bandas de 1/3 e 1/10 de oitava, em avaliações de Engenharia, dependendo necessidade de precisão e do problema específico.

As frequências centrais utilizadas para cada banda são padronizadas: seguindo a seqüência indicada na Tabela II.

TABELA II
Bandas de Oitava Padrão

Frequência Central (Hz)		10 log (largura de banda)	
Oitava	1/3 Oitava	Oitava	1/3 Oitava
	10		3,6
	12,5		4,6
16	16	10,5	5,7
	20		6,6
	25		7,6
31,5	31,5	13,4	8,6
	40		9,7
	50		10,6
63	63	16,5	11,6
	80		12,7
	100		13,6
125	125	19,5	14,6
	160		15,7
	200		16,7
250	250	22,5	20,6
	315		18,6
	400		19,7
500	500	25,5	20,6
	630		21,6
	800		22,7
1000	1000	28,5	23,6
	1250		24,6
	1600		25,7
2000	2000	31,5	26,7
	2500		27,6
	3150		28,6
4000	4000	34,5	29,7
	5000		30,6
	6300		31,6
8000	8000	37,5	32,7

D. Analogia com Sistemas Elétricos

A analogia com sistemas e circuitos elétricos é utilizada em uma série de aplicações por facilitar o estudo e o desenvolvimento de modelos, e auxiliar na compreensão do

fenômeno físico.

O primeiro conceito, e o mais direto é o da impedância específica de um meio. Ela é definida como a razão (real ou complexa) entre a pressão da partícula e a sua velocidade.

$$Z = \frac{P}{V} \quad (16)$$

onde:

Z – impedância acústica em rayls ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{seg}$)
 p – pressão em Pascal
 V – velocidade (m/s)

Para sinais harmônicos e ondas planas a equação (16) pode ser simplificada para a equação (17)

$$z = \rho c \quad (17)$$

onde:

ρ – densidade do meio
 c – velocidade do som

Por ser facilmente associada a uma perda por absorção no percurso a densidade específica é na verdade uma forma de se a propriedade de um meio.

Em sistemas e dispositivos mais complexos é interessante a utilização da idéia de armazenamento de energia no campo, conversão de uma forma de energia em outra, utilizando-se conceitos da Eletricidade como real e reativo. A partir de equações constitutivas e de considerações físicas é possível estabelecer-se uma analogia como na figura 12.

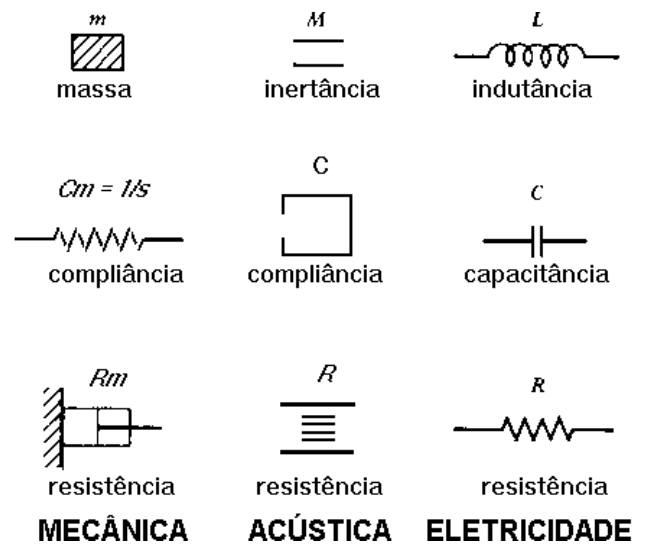


Figura 12: Analogias com eletricidade

Os termos principais podem ser definidos através das seguintes funções:

$$M_a = \frac{P}{dX/dt} \quad (18)$$

$$R_a = \frac{P}{dX/dt} \quad (19)$$

$$C_a = \frac{X}{p} \quad (20)$$

onde:

M_a – Inertância Acústica
 R_a – resistência acústica
 C_a – compliância acústica
 X – deslocamento
 X' – velocidade

Os exemplos apresentados a seguir mostram também como estes conceitos podem ser úteis na avaliação de um sistema.

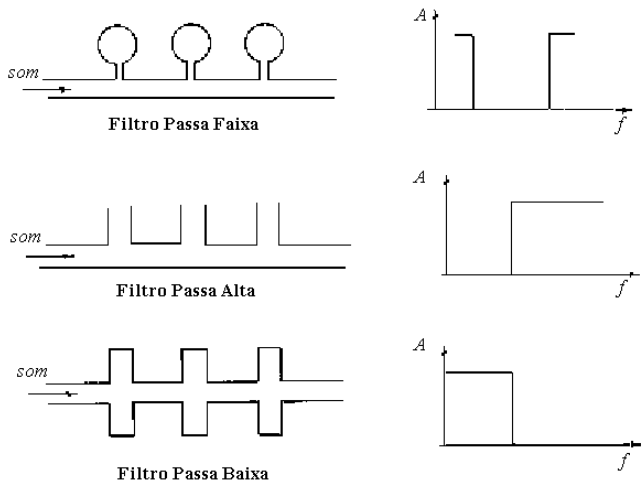


Figura 13: Analogia elétrica e filtros acústicos

Os elementos apresentados na figura 13 permitem um controle de velocidade e pressão (análogos de corrente e tensão elétrica) que permitem uma seleção adequada de uma faixa do sinal acústico, sem que ocorra uma grande dissipação de potência de sinal (são elementos reativos).

A parcela resistiva está associada a absorção acústica uma vez que como já se viu anteriormente a energia do sinal acústico é convertida em calor, dissipação viscosa, ou vibração molecular.

A impedância acústica tem também outras interpretações e aplicações de grande utilidade. A primeira que poderia ser citada é o conceito de impedância de radiação. Uma fonte sonora como um alto falante ou um motor tem maior ou menor facilidade de irradiar sons dependendo do valor da impedância de radiação. Fisicamente isto está associado a como o sistema mecânico que vibra (como o alto falante) tem maior ou menor dificuldade de interagir com o fluido circundante. Uma outra forma de definir este conceito é portanto o da eficiência de radiação.

A impedância de radiação é um parâmetro importante na caracterização de fontes sonoras e tem forma geral:

$$z_r = f/v \quad (18)$$

onde:

- z_r – impedância acústica
- f – força exercida pela superfície radiadora
- v – velocidade do radiador

A impedância total do radiador, deverá levar em conta também sua impedância mecânica. Como estes termos variam com a frequência e de acordo com princípios físicos diferentes, sua avaliação deve ser feita de forma combinada.

IV. ELEMENTOS DE FISIOLOGIA E PERCEPÇÃO

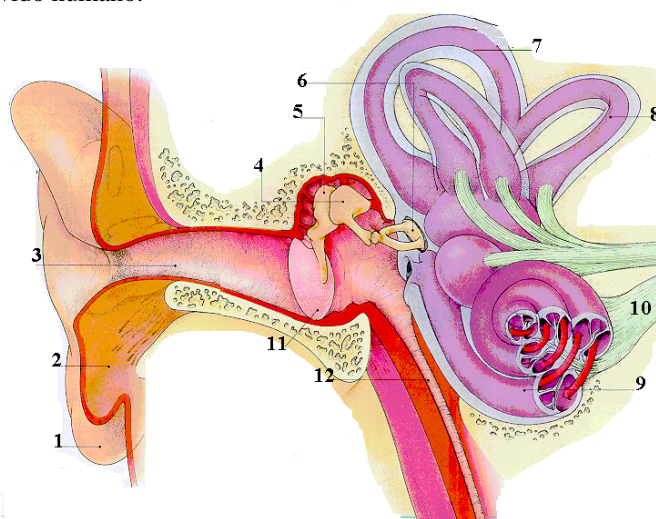
Enquanto que as propriedades físicas do som são bem definidas e avaliadas em termos de parâmetros físicos bem específicos a audição envolve uma série de avaliações

subjetivas que são quantificadas estatisticamente após a observação por um universo de ouvintes. A esta informação deve ser acrescentado um conhecimento sobre os aspectos fisiológicos do aparelho auditivo.

A. O ouvido humano

O ouvido humano possui características fenomenais que assombram pela sua capacidade de adaptação, percepção. O ouvido é capaz de perceber sons desde 20Hz até 20kHz, e perceber sons a 1kHz que deslocam o tímpano apenas 1/10 do diâmetro da molécula de Hidrogênio. A pressão mínima que o ouvido humano é capaz de perceber é de 20μPa enquanto que a audição no limiar da dor está associada a um valor de pressão de 100Pa, uma variação de 5 milhões de vezes.

O ouvido humano é normalmente dividido em ouvido externo, ouvido interno e ouvido médio. A Figura 8 mostra o ouvido humano.



- | | | |
|----------------|----------------------|------------------|
| 1 – pina | 5 - martelo | 9 - cóclea |
| 2 - cartilagem | 6 - estribo | 10 - nervo |
| 3 - meato | 7 – canais semircic. | 11 - tímpano |
| 4 - bigorna | 8 - canais semircic | 12 – T.Eustáquio |

Figura 14: o ouvido humano

O ouvido externo tem como finalidade captar os sons. A pina conduz o som até o meato, que é um canal com diâmetro de aproximadamente 7 mm e 25mm de comprimento. Este canal é fechado no final pelo tímpano uma membrana que vibra ao ser excitado por ondas de pressão sonora. Na faixa de ressonância o meato produz um ganho de até 10dB até chegar ao tímpano. Apesar disto este canal é considerado de baixa eficiência se comparado ao de outros animais.

O tímpano é o dispositivo de entrada do ouvido médio, uma cavidade com cerca de 2 cm³ que contém os ossículos com sua musculatura e ligamentos. A vibração do tímpano é transmitida ao martelo, e daí para a bigorna e em seguida ao estribo que cobre a janela oval. Esta conexão mecânica permite um casamento de impedâncias entre o canal de ar do meato e o líquido do ouvido interno. Este casamento de impedâncias varia de acordo com a intensidade do som recebido, por meio de um controle de tensionamento da musculatura, efeito que é conhecido com reflexo acústico. O tempo para o reflexo acústico funcionar é de aproximada 0.5 mili-segundos.

O ouvido interno possui três partes, o vestíbulo (a entrada) os canais semi-circulares e a cóclea. O vestíbulo se conecta ao ouvido médio por meio de duas aberturas, a janela oval e a janela circular. Estas duas janelas são vedadas para evitar o vazamento do líquido do ouvido interno. Os canais semi-circulares não tem função relacionada à audição mas sim de sensação de equilíbrio. O tubo da cóclea é dividido em duas partes, a superior e a inferior que se conectam à janela oval e a janela circular, respectivamente. Uma ponta óssea que se projeta entre as duas partes do tubo contém os nervos auditivos. A terminação óssea se projeta para a membrana basilar que continua para o lado anterior que contém o ligamento espiral. Posicionada sobre a membrana basilar está a membrana tectorial, onde está afixado o cortex que contém as células pilosas (cerca de 30 mil) por todo o comprimento da cóclea.

Quando o ouvido é excitado por um tom puro, a onda sonora é recebida pela pina, percorre o meato, faz o tímpano vibrar que por sua vez excita os ossículos, que conduzem esta perturbação através da janela oval até a cóclea, passando pelo helicotrema, e daí para a galeria inferior, e de volta para a janela circular que funciona como um sistema de alívio de pressão está a membrana de Reissner.

B. Variáveis psico-físicas

As propriedades sonoras resultantes da percepção humana dos diversos sons, talvez devido a seu caráter subjetivo, são difíceis de definir, estando algumas vezes relacionadas a mais de uma variável física das ondas. Seguem as definições mais comumente aceitas.

O primeiro conceito é o de altura, associado à frequência do som. O timbre é a característica que permite que o ouvido possa distinguir entre dois sons de mesma frequência e intensidade, porém provenientes de fontes distintas. O timbre varia essencialmente de acordo com a composição de harmônicos associados à frequência fundamental de duas fontes sonoras distintas.

O volume sonoro ("loudness") está relacionado a como o ouvido humano percebe a amplitude das ondas sonoras. Um estudo clássico apresentado em 1934 Fletcher e Munson associaram o nível de intensidade sonora ao volume percebido pelo ser humano. A partir destes dados foi obtida a curva da Figura 15, que mostra curvas que indicam o mesmo nível de percepção de volume em fons (phons). Este gráfico ilustra ainda algumas das atividades comuns associadas aos níveis indicados.

Nesta avaliação foi utilizado o tom de referência (melhor audibilidade) de 1kHz. A figura associa cada atividade típica a um volume sonoro. A curva mais baixa indica o limiar da percepção sonora, enquanto que a superior indica o ponto onde já aparecem dores. É importante acrescentar-se que os efeitos resultantes no ouvido e em outras partes do organismo também estão ligados ao tempo de exposição.

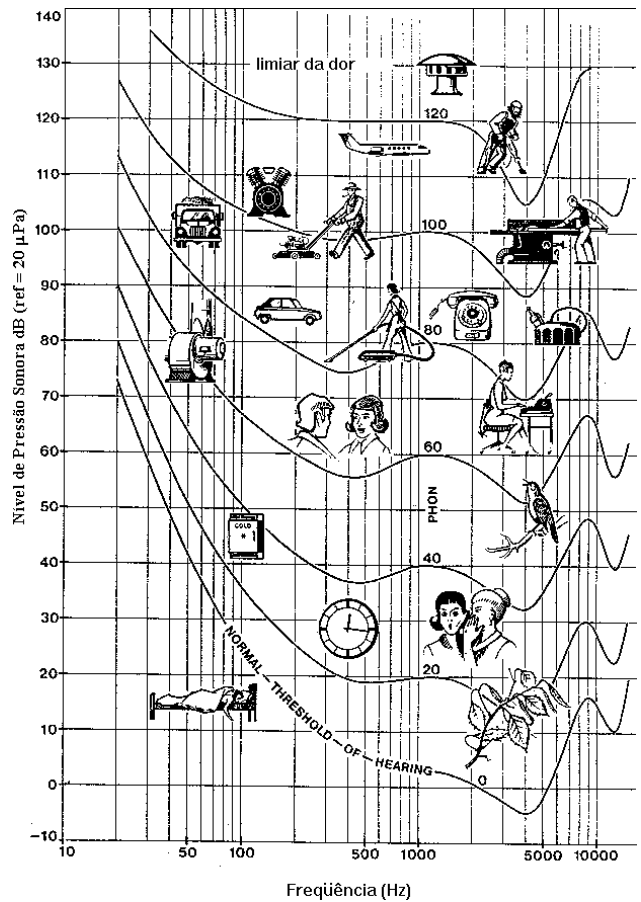


Figura 15: Curvas de iso percepção sonora

Embora sons de mesma intensidade de volume possam ser considerados como possuindo o mesmo volume, isto não significa que a sensação subjetiva de percepção de volume seja a mesma. O volume na verdade é definido por um outro termo, o sone, definido por Fletcher e Munson em 1937, conforme a curva da figura 7.

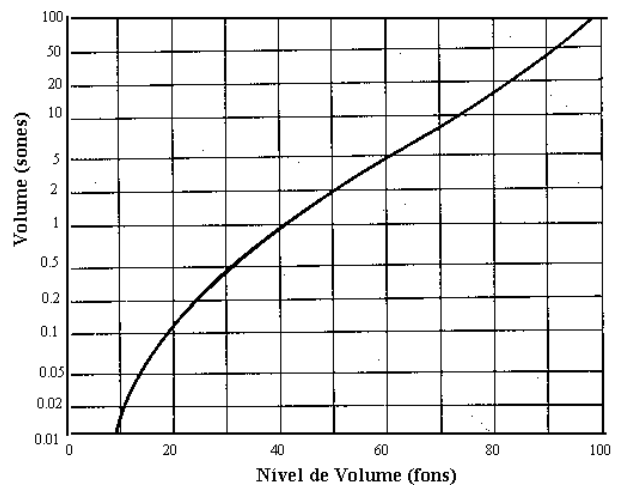


Figura 16: Relação entre fons e sones (volume)

É interessante também observar-se que a forma de produção do som ocupa áreas distintas dentro do diagrama da Figura 26. A fala por exemplo ocupa uma região restrita dentro do diagrama quando comparada a área ocupada pela percepção e audição. Esta é aliás uma característica de todos os animais, sendo que na maioria dos casos o aparelho fonador só consegue emitir sons para uma parte audível do aparelho auditivo do animal.

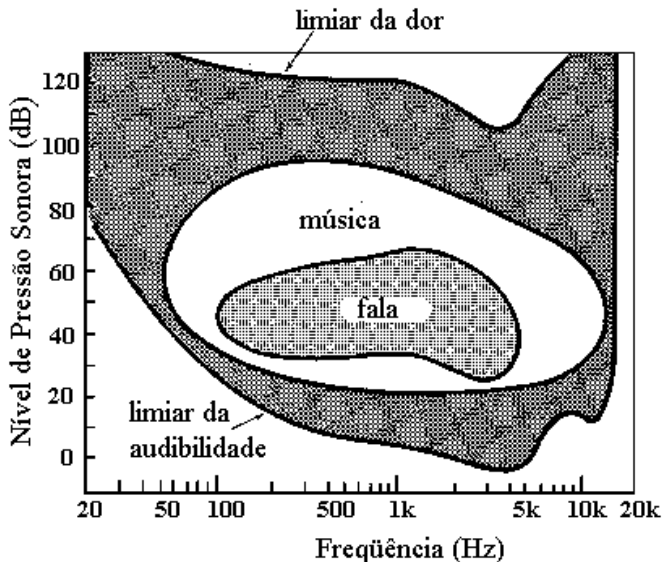


Figura 17: Regiões típicas da fala, música e audição

C. Curvas de Compensação

Uma vez que a percepção do ouvido humano varia de acordo com a frequência considerada estabeleceu-se um sistema de curvas de compensação, designadas por letras, onde se corrigem os efeitos da percepção com o uso curvas de compensação baseadas em uma ponderação de acordo com a faixa de frequências considerada. Este método de avaliação é considerado principalmente em problemas de controle de ruído e incorporado a instrumentos de medição com o uso de sistemas de filtros. A figura 18 representa as escalas mais comuns e a forma como é feita o ajustamento. O uso de uma determinada curva de ponderação depende da aplicação e da norma específica para cada caso. Por exemplo a curva D é importante em problemas de controle de ruído associados a aeronaves e aeroportos.

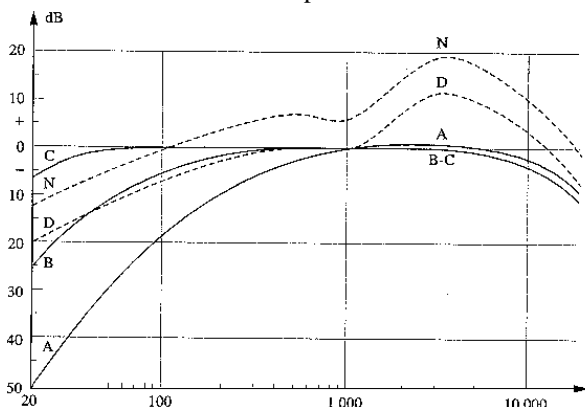


Figura 18: Curvas de Ponderação Sonora

Uma outra consideração de grande importância está

associada à chamada “banda passante crítica” (Figura 19). Quando um ouvinte escuta um som que contém uma componente tonal, esta componente não pode ser ouvida até que seu nível ultrapasse um determinado valor acima das outras componentes.

Um trabalho também desenvolvido por Fletcher e Munson mostrou que o mascaramento de um tom componentes de banda larga é independente da banda de frequências consideradas até que esta banda se torne menor que um determinado valor crítico, que é função da frequência do tom.

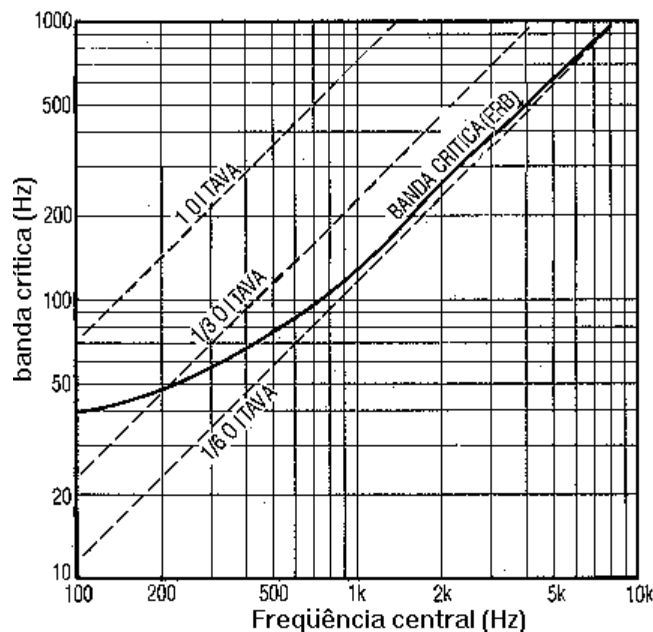


Figura 19: A Banda crítica

V. VISÃO GERAL DA ACÚSTICA DE AMBIENTES

A avaliação e projeto de um ambiente podem ser resumidas pelos seguintes objetivos: estabelecer uma distribuição espacial adequada do som, e com a melhor relação sinal ruído que for possível. Para tanto devem ser considerados os principais aspectos de como o som “preenche” um espaço, e como sua energia irá se dissipar gradualmente.

Além disto deve se restringir para dentro do ambiente a entrada de sons externos e espúrios, atividade esta que é designada como “Controle de Ruído”.

A. A Distribuição de Som em um Ambiente Fechado

Os fenômenos básicos de propagação anteriormente apresentados devem ser analisados em conjunto com a chamada “resposta modal”, para se estabelecer a distribuição de um som em um ambiente. A resposta modal associa a cada frequência um modo de resposta, que neste caso representa a distribuição espacial do som.

Um estudo inicial de Lord Rayleigh de 1896 estabeleceu fundamentos que permitem a avaliação de ambientes retangulares. Uma sala com um comprimento L, uma altura H e uma largura W tem modos normais de vibração estabelecidos pela seguinte expressão:

$$f = \frac{c}{2} + \sqrt{\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{q}{W}\right)^2 + \left(\frac{r}{H}\right)^2} \quad (18)$$

onde:

f - Frequência associada à resposta modal.

c - Velocidade do som.

p, q, r_i - números inteiros (0, 1, 2, 3, ..., n)

Isto significa que cada número está associado a um modo, e cada letra p, q, r , associada a uma dimensão. Por exemplo, o modo 1, 0, 2, significa o primeiro modo do comprimento, modo zero (resposta zero) na largura e segundo modo na altura. Quando ocorrem dois zeros designa-se o modo de modo axial. Um zero indica que o modo representa dois pares de superfícies, e é designado por modo tangencial. Se não existirem zeros o modo é designado como oblíquo. Esta avaliação tem como finalidade identificar as ressonâncias existentes em um ambiente, para se avaliar sua resposta.

Cada um destes modos apresenta níveis de energia diferentes. Os modos axiais tem a maior energia porque existem distâncias menores e as reflexões envolvem apenas duas superfícies. Em um modo tangencial o número de reflexões e por conseguinte dissipação de energia aumenta, e quanto maior o percurso da onda sonora maior a perda de energia.

Para ambientes não retangulares existem outras formulações que permitem resultados mais adequados, como mostra a referência [5]. Entretanto a medida que o problema se torna mais complexo, o mais recomendado é se utilizar uma avaliação numérica, resolvida com auxílio de métodos computacionais. A figura 20, representa como exemplo ilustrativo uma resolução obtida por meio de elementos finitos de duas salas diferentes.

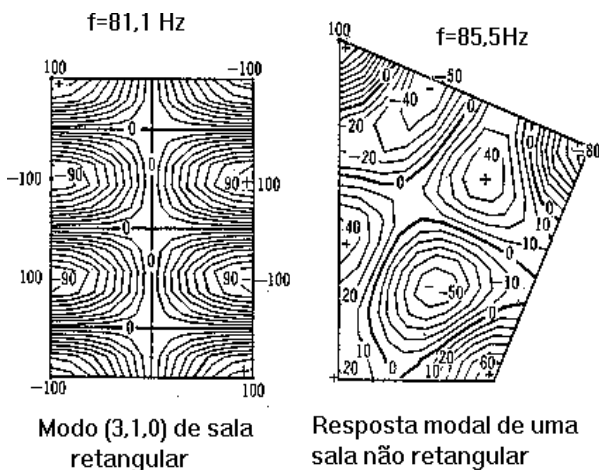


Figura 20: Resposta modal de uma sala.

B. A Dissipação do Som em um Ambiente

O som é dissipado em um ambiente por meio de mecanismos de absorção sonora. Pesquisas desenvolvidas pelo professor Sabine da Universidade de Harvard entre 1895 e 1919 estabeleceram o tempo de reverberação T , como parâmetro proporcional ao volume da sala V e ao parâmetro de absorção A da sala. O tempo de reverberação é definido como o tempo para o nível sonoro decair 60 dB após desligada a fonte de excitação.

Este modelo é simples e não considera alguns aspectos do problema como a resposta modal a distribuição de material

de absorção, etc. Entretanto, permite boas avaliações para uma série de casos práticos. O tempo de reverberação pode ser avaliado por meio de mais de uma equação na forma anteriormente indicada, dependendo do autor e da aplicação específica. Possivelmente a mais conhecida é a equação 19:

$$T = \frac{0,161V}{S \bar{a}} \quad (19)$$

onde:

V - Volume da sala.

S - Área das superfícies.

\bar{a} - absorção média de Sabine

Ainda de acordo com Sabine as áreas absorventes (paredes, etc) podem ser somadas associando-se cada uma delas ao seu coeficiente de absorção. É interessante observar-se que a utilização desta fórmula permite que se estabeleça uma forma de se controlar o tempo de reverberação pelo uso adequado de áreas com superfícies absorvedoras. As experiências iniciais foram todas feitas a 512 Hz. Atualmente são avaliados estes valores para outras frequências, todas nas frequências centrais das bandas de oitava padronizadas, isto é: 125Hz, 250 Hz, 500Hz, etc.

C. A Avaliação de Ambientes

Ambientes devem ser avaliados do ponto de vista acústico considerando-se sua aplicação e faixa de operação. Com relação à faixa de operação é possível organizar-se o estudo de acordo com quatro faixas principais, conforme se apresenta nas figuras 21 e 22.

Observa-se como a relação entre as dimensões principais e o comprimento de onda define de forma determinante o tipo de modelo que deve ser utilizado. Esta definição permite um melhor uso de recursos computacionais de simulação e, é claro, resultados mais confiáveis.

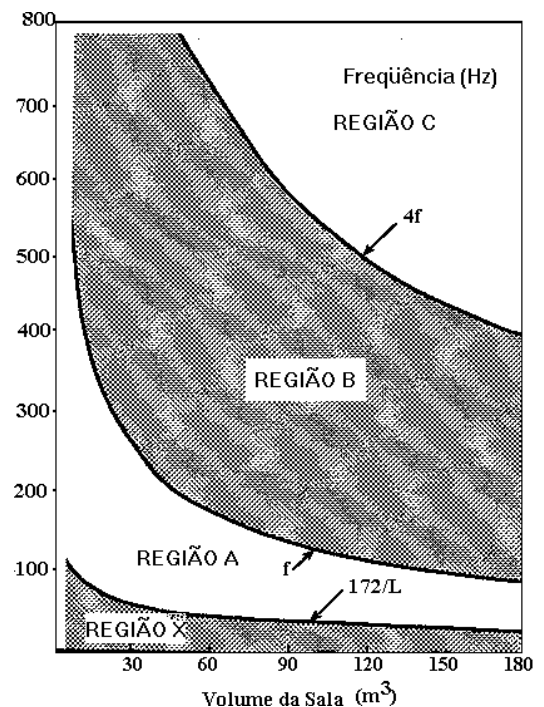


Figura 21: Regiões de avaliação de uma sala típica [5]

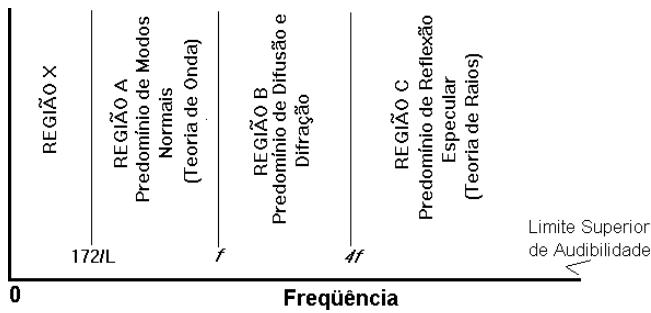


Figura 22: Faixas de Avaliação de Ambientes (adaptado de [5])

Os dois diagramas sugerem a teoria mais adequada para ser utilizada em cada tipo de problema. Entretanto avaliação de níveis, resposta de um sistema e outros parâmetros que podem ser explicitados de forma matemática não indicam o tipo de resultado que se espera de um ambiente de boa qualidade. Em auditórios para fins musicais esta tarefa pode apresentar uma razoável dose de complexidade. Em outros ambientes a tarefa de se definir parâmetros objetivos pode ser mais simples, como é o caso de certos ambientes industriais.

Inicialmente é necessário se fazer uma avaliação entre a relação entre o som direto, o que vem diretamente da fonte sonora, e o som indireto. O som indireto está associado ao campo reverberante, essencialmente função da reflexão nas paredes do ambiente. Com o objetivo de se preservar a inteligibilidade e o conforto, em auditórios para palestras o valor de 0,8 segundo de tempo de reverberação é considerado uma condição limite por Beranek. Por outro lado para música é importante que uma parte do campo acústico que chega no ouvinte seja indireto, variando de acordo com o tipo de música. Alguns valores típicos sugeridos por Beranek variam de 1.0 segundo para pequenas salas com solistas ou música de câmara, até 2,5 segundos para música de órgão ou música em grandes catedrais. É também bastante conhecido o fato que o tamanho da audiência influencia o tempo de reverberação uma vez que a absorção pode variar de acordo com o tamanho da audiência. Para os auditórios de concerto considerados de boa qualidade avalia-se (Beranek) que a energia entre som direto e o som reverberante seja de 0,07. Para um estúdio de gravação este valor é bem menor, tipicamente na faixa de 0,04. Para o auditório de concerto isto significa que a energia reverberante pode chegar a atingir quinze vezes o valor do som direto. Isto além de permitir um ganho apreciável, faz com que a audiência tenha a sensação de potência, grandeza, etc.

Existem outros fatores de importância e de maior dificuldade de avaliação objetiva. Embora fora do escopo de uma avaliação resumida seria possível citar-se os seguintes parâmetros a título de exemplo, sem querer se fazer uma avaliação compreensiva, mas apenas para se indicar os tipos de cuidado que podem ser tomados no projeto e na avaliação de auditórios.

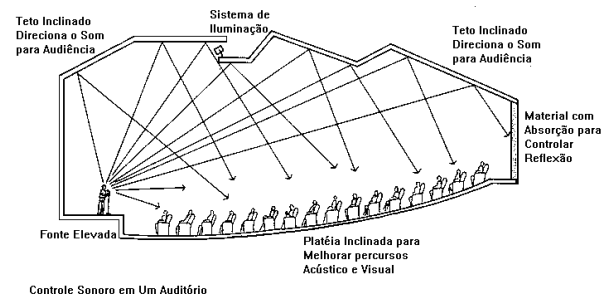
O primeiro parâmetro é designado por “calor” que subjetivamente está associado a um efeito pronunciado dos baixos. Mais objetivamente ele depende da relação existente entre a reverberação das componentes de baixa e as de média frequências. A música do século XIX é tem sua

audição particularmente beneficiada com o aumento deste parâmetro.

O segundo parâmetro é a intimidade. Um ambiente pequeno tem intimidade visual. A intimidade acústica ocorre quando a música tocada parecer estar ocorrendo em um auditório pequeno. Um auditório com intimidade é descrito como tendo “presença”. Este parâmetro é importante tanto para a música como para palestras. A qualidade depende da recepção refletida logo após a recepção direta. Estes sons chegando ligeiramente retardados em relação ao som principal devem ser múltiplos e bem distribuídos pela audiência, de forma a se atingir um equilíbrio adequado. Este objetivo deve ser atingido com um controle cuidadoso da reflexão e da difração para se obter o efeito desejado sem ecos, e com boa distribuição

O terceiro parâmetro citado neste exemplo é a clareza, que indica até que ponto sons individuais se destacam dentro do conjunto de uma apresentação. Embora possa ser função da habilidade dos músicos varia também de acordo com a qualidade acústica do auditório. Uma forma de se atingir a clareza é através da redução dos efeitos de reverberação. Entretanto isto significa uma perda de qualidade para certos tipos de música, conforme já se observou anteriormente. Isto significa que a maneira de se atingir este objetivo é se fazer um som direto com maior potência, o que pode ser conseguido se colocando a audiência em linha direta (visual) com os executantes.

As considerações dos parágrafos anteriores tornam clara a importância de uma correta utilização do conceito de focagem, que pode ser melhor explicado pela observação da Figura 236, onde se observa uma focagem típica para um auditório.



Controle Sonoro em Um Auditório

Figura 23: O princípio do Foco Acústico

Além de permitir o foco visual, o bom projeto permite o correto equilíbrio entre som direto e indireto, bem como o ganho acústico e o tempo de reverberação.

O controle do som em um ambiente é portanto controlado entre outras coisas pela geometria que pode variar de acordo com o que se deseja, assumindo configurações bastante complexas como mostra por exemplo a figura 237, onde se deseja controlar a difusão do som.

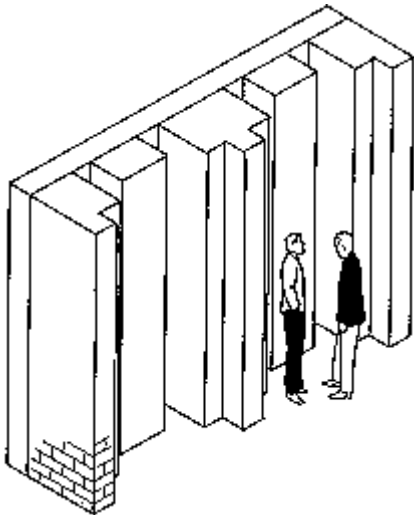


Figura 24: Condicionando o Som com superfícies difusoras

- [6] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders, "Fundamentals of Acoustics", *John Wiley & Sons*, 3rd Edition, 1982.

D. Uma nota sobre controle de ruído

Texto algum sobre fundamentos de Acústica aplicada poderia existir sem a menção da questão do Controle de Ruído. O ruído é um fenômeno de maior importância para o dia a dia da população das grandes e médias cidades. Verificou-se que 70% da população destes centros urbanos reclama de índices de ruído excessivo, configurando-se assim no parâmetro ambiental mais perceptível e problemático para os habitantes dos centros urbanos. Hoje em dia é já bem divulgado o fato que o ruído excessivo pode levar a surdez. Entretanto este não é o único problema que pode ocorrer. Ruído excessivo pode provocar o aparecimento de sintomas graves como problemas vasculares e respiratórios, nível de stress elevado e várias outras patologias.

Em ambientes onde se deseja uma boa qualidade sonora, como nas aplicações em Engenharia de Áudio é fundamental o controle de ruído, de fora para dentro do ambiente e vice-versa. O objetivo é portanto reduzir os "vazamentos de som" de um ambiente para outro. Os conceitos anteriormente desenvolvidos formam a base para este estudo, discutido em maior detalhe em várias referências tais como [4].

AGRADECIMENTOS

O autor agradece aos seus colegas e alunos que de uma forma ou de outra viabilizaram o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Léwy, "Acoustique industrielle et aéroacoustique", *Hermes Science Publication*, 2001.
- [2] A. D. Pierce, "Acoustics, An Introduction to Its Physical Principles and Applications", *The Acoustical Society of America*, 1994.
- [3] L. Beranek, "Concert and Opera Halls, How they sound", *Acoustical Society of America*, 1996.
- [4] S. L. Y. Gerges, "Ruído: Fundamentos e Controle", *Imprensa Universitária, UFSC*, 1992.
- [5] G. Ballou, "Handbook for Sound Engineers", *Focal Press*, Second Edition, 1998.