Elementos de Acústica

Victor E P Lazzarini
Music Department
National University of Ireland, Maynooth

Introdução

Esta apostila foi elaborada durante minha estadia como Pesquisador Recém-Doutor na Universidade Estadual de Londrina, como material para o curso *Laboratório de Música Eletroacústica*, que lecionei para os alunos de Música. Trata-se de uma primeira tentativa de elaborar elementos de acústica para estudantes de Música, área carente de literatura especializada em português. O próximo passo seria a preparação de um livro sobre Acústica Musical com informações completas e atuais. Há muitos assuntos que não foram tratados nesta pequena apostila, e há muito o que se fazer para melhorá-la. No entanto ela já é um começo, e espero que aqueles que a utilizarem possam ser estimulados a explorar o grande universo dos sons. Agradecimentos aos colegas da UEL que me receberam muito bem durante a minha permanência no Departamento de Arte, e em especial ao Núcleo de Música Contemporânea pelo apoio ao meu trabalho. Este trabalho foi possível graças ao Programa de Recém Doutoures do CNPq.

Victor Lazzarini,
Londrina, Julho 1998

Parte I

1 Introdução: o que é som?

Existem várias maneiras de se estudar cientificamente o fenômeno sonoro. Todas essas disciplinas estão interligadas, mas cada uma enfoca um aspecto específico do fenômeno. A *acústica física* estuda a parte material do fenômeno sonoro, enquanto a *psicoacústica* trata da percepção do fenômeno sonoro pelos sentidos. Estas duas disciplinas são as mais relevantes para o estudo que iremos desenvolver. Intimamente ligada, e subordinada, a elas, há também uma parte do estudo da fisiologia que trata das estruturas dos aparelhos fonador e auditivo dos seres vivos. O que chamamos de *acústica musical* relaciona os dados dessas disciplinas com a atividade artística.

A ondulatória é a parte da física que estuda os fenômenos que se apresentam em formas de ondas. Existem dois tipos básicos de fenômenos que se comportam dessa maneira: *ondas mecânicas*, que atuam no nível das moléculas, cujo fenômeno perceptivo associado é o som; e *ondas eletromagnéticas*, causadas pelo movimento de partículas sub-atômicas, cujos fenômenos perceptivos associados são, principalmente, a luz e as cores.

O *som* é uma qualidade perceptiva que é resultado da percepção de distúrbios das moléculas de um meio em um certo espaço de tempo. Esses distúrbios, por sua vez, apresentam-se em forma de ondas em sua propagação pelo meio. Para este fenômeno ocorrer há a necessidade de três elementos relacionados em um sistema:

Emissor - Meio - Receptor

O *emissor* tem a função de produzir um distúrbio no *meio*, que será percebido pelo *receptor*. É importante notar que o meio tem influência na qualidade do distúrbio, pois afeta a maneira como este se propaga. Estes distúrbios de natureza mecânicas são pequenas e rápidas variações de pressão do meio, causadas pelo movimento das moléculas, caracterizados por compressões e rarefações (descompressões, expansões). Esse movimento é sempre relacionado com uma *onda de pressão* que se propaga pelo meio. Ondas mecânicas podem ser de dois tipos: *longitudinais*, onde as moléculas movem-se na mesma direção de propagação da onda; e *transversais*, quando as moléculas movem-se perpendicularmente a essa direção. As ondas de pressão que caracterizam o som, que podemos chamar de ondas sonoras, são do tipo longitudinal que se propagam por uma série de compressões/descompressões em um meio, normalmente o ar. As ondas transversais são usualmente encontradas nas vibrações de partes de certos instrumentos musicais, como nas membranas (peles de instrumentos de percussão) e cordas.

2 Velocidade de propagação

As ondas mecânicas longitudinais viajam a uma velocidade constante, dependente do meio. Fatores que contribuem para a variação de velocidade no caso dos sólidos incluem a densidade do material (isto é a

relação entre volume e massa desse material) e o *módulo de Young,* que é relacionado com a elasticidade do material em questão. A velocidade é proporcional ao quadrado da razão entre o *módulo de Young* e a densidade do sólido em questão. Maior densidade implica em menor velocidade, enquanto maior elasticidade implica em maior velocidade.
No caso dos gases, a velocidade do som depende do tipo de gás, de seu peso molecular e de sua temperatura absoluta, segundo a equação:

$$v = \sqrt{\frac{gRT}{M}}$$

Onde: M = peso molecular do gás (2.87 x 10^{-2} Kg $mole^{-1}$, no caso do ar)
? = uma constante que depende do gás (1.4 para o ar)
R = constante dos gases (8.31 J K^{-1} $mole^{-1}$)
T = temperatura absoluta (em Kelvin)

Por exemplo, podemos achar qual é a velocidade do som em determinada temperatura, utilizando-se desta equação:

$$v = \sqrt{\frac{1.4x8.31}{2.87x\,10^{-2}}\,xT}\,m\,s^{-1}$$

$$v = 20.1\sqrt{T}\,m\,s^{-1}$$

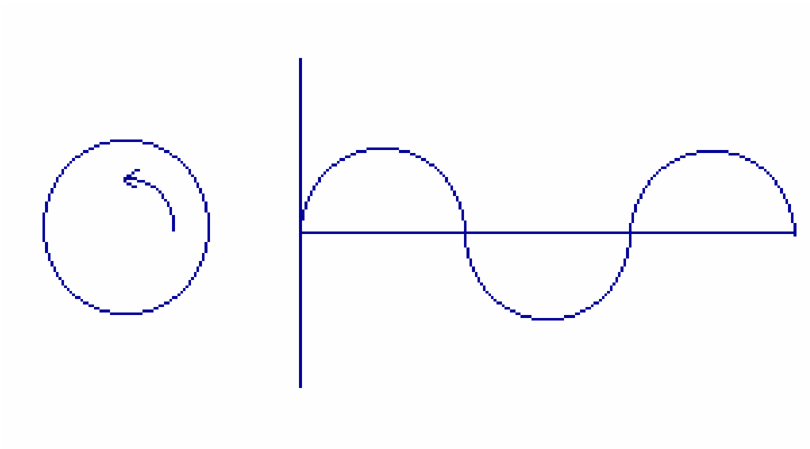
Aqui temos que a velocidade do som no ar então só é dependente da raiz quadrada da temperatura, em Kelvin, que se obtém somando-se 273 ao valor desta em Celsius. Como exemplo, a 20^o C, a velocidade do som no ar é 344 ms^{-1}.

No caso das ondas transversais, o cálculo da velocidade de propagação é mais complexo, pois para qualquer coisa maior que uma corda idealmente (*infinitamente*) fina, ele é influenciado pela geometria do meio de propagação e pelo tipo da onda que se propaga (as vibrações transversais têm varias formas de movimentos em espaços tridimensionais, como transversa e torsional). No entanto, pela importância das vibrações transversais para instrumentos de corda, o cálculo da velocidade de uma onda transversal em uma corda é feito utilizando-se os valores de massa por unidade de comprimento e tensão de uma corda ideal (infinitamente fina), cujo resultado é aproximado para as situações reais.

3 Comprimento de onda, freqüência, amplitude e fase

Os fenômenos ondulatórios podem ser estudados em sua forma mais simples, para se ganhar um entendimento dos seus constituintes mais básicos. A forma mais simples de onda sonora é aquela descrita por funções harmônicas do tipo senoidal, que possuem uma característica periódica, isto é, repetem-se em um certo intervalo de tempo.Veremos, também, que todo e qualquer fenômeno ondulatório longitudinal, seja ele periódico ou não, pode ser decomposto em um número de unidades deste tipo.

A onda periódica senoidal é derivada do movimento circular. Se plotarmos em um gráfico o movimento de uma roda, vamos obter uma representação análoga (similar) a um movimentode partículas em um meio que equivale a onda sonora senoidal **(fig. 1)**. É preciso fazer notar, imediatamente, que nenhum som natural produz uma onda senóide pura, apesar de alguns, como o do diapasão, aproximarem-se muito dessa forma de onda. A senóide é resultado de um movimento circular no tempo.

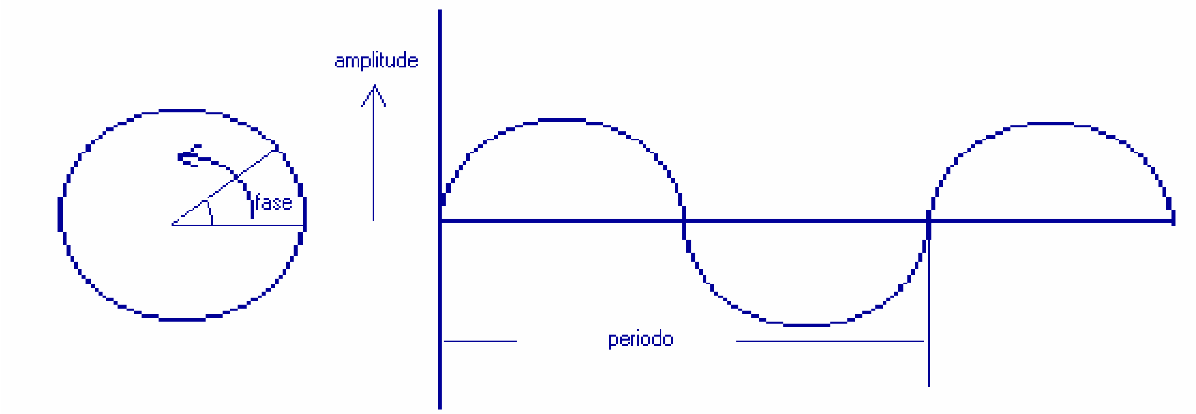


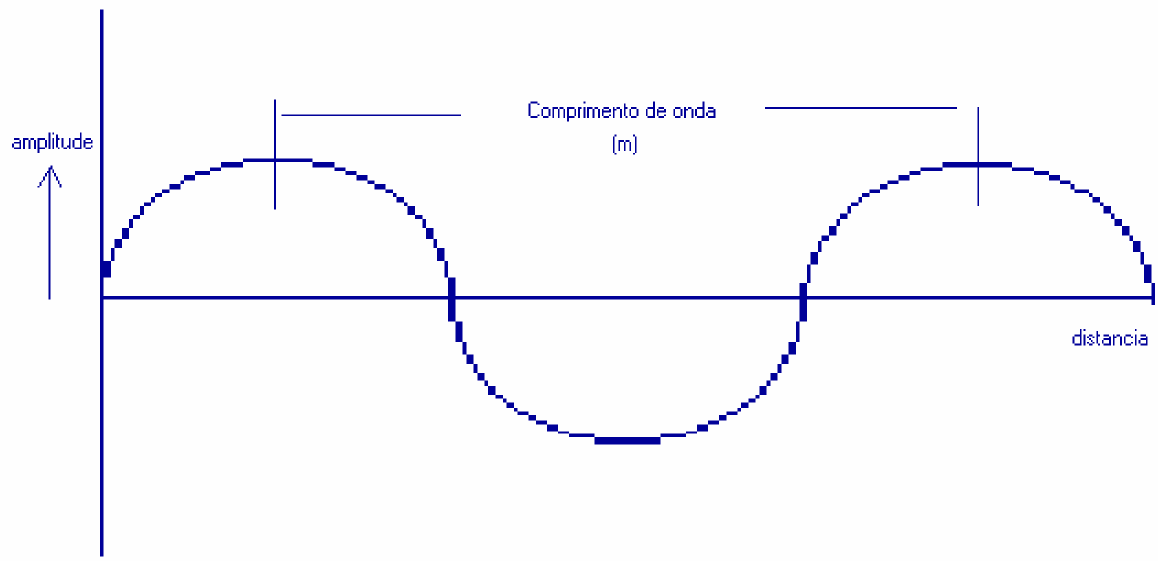
Desta senóide pode se dizer muitas coisas: que ela se repete em um *período* T (em segundos, normalmente); que ela tem uma *amplitude* de deslocamento A, ou seja que ela varia de 0 até + ou - A **(fig.2)**; e que quando se propaga no espaço, ela tem um *comprimento de onda* ?, que é a medida de espaço entre dois momentos idênticos da onda (geralmente em metros) **(fig.3)**. Lembremos que, em se tratando de uma onda sonora, ela deverá se propagar pelo meio em uma velocidade constante.

Dizer que esta onda se repete em um período T de tempo é a mesma coisa, em um raciocínio inverso, que dizer que há uma *freqüência* de acontecimentos ou repetições em um período de tempo. Pode-se dizer que essa freqüência de acontecimentos é de uma vez por período, o que nos traz a definição de outra quantidade importante para o estudo de ondas: a freqüência que é o inverso do período, $\mathbf{f = 1/T}$. Ela é geralmente medida em 1/segundos (s^{-1}), e no caso específico de ondas periódicas como a senóide, em ciclos por segundo, que é a definição da medida chamada Hertz (Hz). A freqüência *f* (ou o período) e o comprimento de onda ? relacionam-se através da velocidade de propagação *V*, pelo produto ***V* = *f*?**.

A última quantidade que deve ser definida quanto às senóides é a da **fase (fig.2)**, que determina a posição inicial de uma onda, ou a posição do começo do movimento. Ela é medida em graus ou em radianos, por ser relacionada com o ângulo inicial do movimento. Nos exemplo acima, a fase é zero graus, pois o ângulo inicial do movimento, medido do centro da circunferência, é zero. Podemos então observar estas quantidades de uma forma gráfica.

Tomando-se uma onda periódica senoidal como modelo, podemos mapear alguns dos parâmetros apresentados acima com qualidades sensorias humanas. A *amplitude* de uma onda de pressão correlaciona-se diretamente com a nossa percepção de intensidades sonoras, por exemplo sons mais intensos serão resultado de uma maior amplitude de variação da pressão do meio (ou seja um deslocamento maior das moléculas). A *freqüência*, e por conseqüência o *período* e o *comprimento de onda*, relaciona-se com a percepção de alturas (ou seja o quão grave ou agudo um som é). Certos valores de freqüências são convencionalmente equivalentes às notas musicais ocidentais, por exemplo 440 Hz é o lá de concerto, usado para a afinação de instrumentos. Em ondas sonoras mais complexas, a correlação entre freqüência e altura é mais problemática. Veremos, mais adiante, questões mais complexas relativas à correlação dos parâmetros físicos com as qualidades subjetivas que são percebidas pelo ouvido, cujo estudo pertence à psicoacústica.

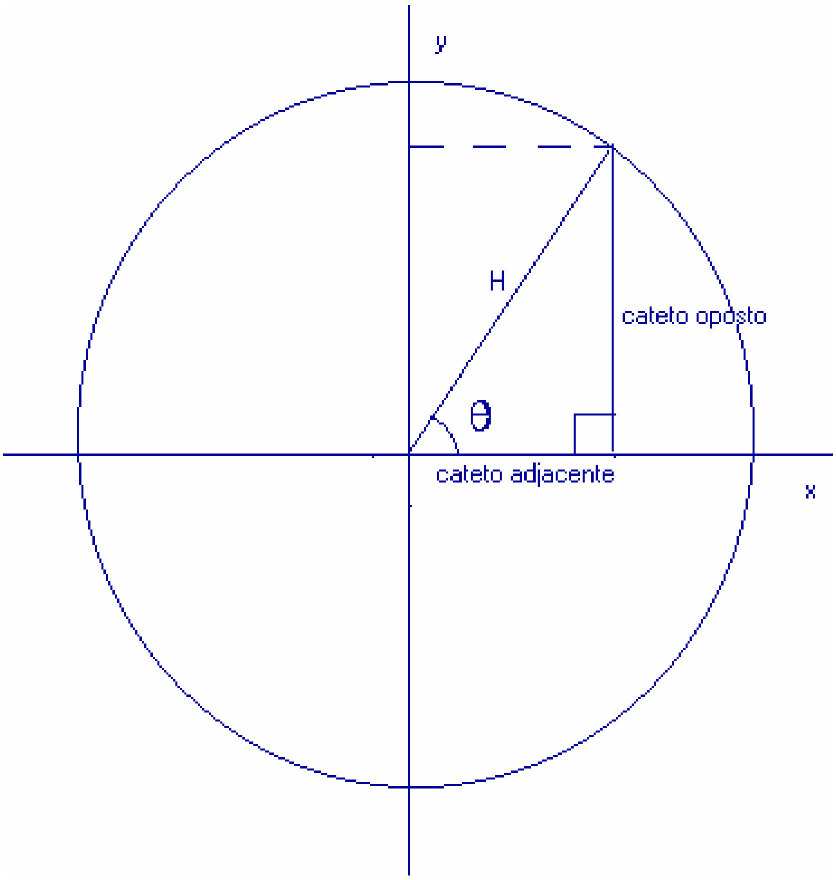




4 Funções trigonométricas

Já foi mencionado anteriormente que as ondas mais simples são do tipo senoidal. Estas ondas podem ser descritas por uma classe de funções matemáticas chamadas harmônicas, a qual as funções trigonométricas pertencem. O **seno** de um ângulo é definido como a razão dos dois lados de um triângulo retângulo contendo aquele ângulo em um dos seus vértices **(fig.4)**. Um ângulo, representado no exemplo pela letra ?, é uma porção de um ciclo, pode ser medido em graus, indo de 0 a 360, ou em radianos, medida linear baseada no número **p** = 3,141592..., a razão entre os comprimentos do diâmetro e da circunferência de qualquer círculo. Dizemos então que 2p radianos equivale a um círculo completo, pois um raio é a metade do diâmetro (p = circ/diam = circ/2*raio; logo circ = 2*p*raio = 2p radianos, se o raio = 1). Então temos uma medida que relaciona ângulos e raio.O seno é a razão do cateto oposto ao ângulo e da hipotenusa de um triângulo retângulo:

sen? = cateto oposto a ? / hipotenusa



as outras relações básicas trigonométricas são:

coseno? = cateto adjacente a ? / hipotenusa

e

tangente? = cateto oposto a ? / cateto adjacente a ?

Para conveniência, fazemos nossas medidas em um circulo de raio 1, chamado círculo trigonométrico. Então o seno, nada mais é que a medida do cateto oposto, que pode ser encontrada no eixo y da figura acima (como indica a linha pontilhada).

y = seno?

Ângulos são, por convenção medidos crescentemente em sentido anti-horário. O seno, ou a medida do cateto oposto, será expressa por um número positivo ou negativo, dependendo do ângulo, se este é menor que meio círculo, ou maior que meio círculo (tudo isto é consequência de lermos o valor do seno no eixo vertical, y).

Um gráfico do seno do ângulo ? traçará portanto um círculo completo da curva senóide se variarmos o angulo de 0 a 2p (=círculo completo). Isso já foi mostrado anteriormente, quando mostramos a relação entre o movimento circular e a senóide **(fig.1)**. Para relacionarmos essas relações trigonométricas com a idéia de ondas sonoras, precisamos incluir a noção de tempo no nosso sistema, pois como já vimos anteriormente, as ondas sonoras são fenômenos que ocorrem no tempo.

Conectando a senóide com o tempo, primeiramente multiplicamos nossa notação para um círculo completo (2p) pelo tempo *t*, em segundos. A quantidade 2p*t* vai de 0 a 2p, ou seja roda o círculo completo, quando *t* vai de 0 a 1. Isso corresponde a *freqüência* de 1 Hertz (ciclos / s), ou seja esse evento acontece no *período* de 1 segundo. Se quisermos representar qualquer outra freqüência, só o que precisamos fazer é multiplicar pelo valor arbitrário (de freqüência) *f* . A quantidade 2p*ft* vai girar *f* vezes em volta do círculo (ou seja indo de 0 a 2p) quando *t* varia de 0 a 1, portanto um gráfico de seno(2p*ft*) vai passar por *f* ciclos cada vez que *t* aumentar de uma unidade.

Com isso definimos uma função temporal que vai descrever os fenômenos ondulatórios sonoros mais simples, a *função seno*. Há ainda dois atributos fundamentais desta função a serem introduzidos. Eles correspondem a algumas quantidades que já foram definidas: a *amplitude* e a *fase*. A amplitude é um multiplicador simples que escala os valores máximos e mínimos que a curva pode tomar (no caso anterior, consideramos o que se chama de *curva senóide normal*, que tem o valor de amplitude 1, ou seja a curva varia entre +1 e -1). A *fase*, como já foi definido, é a quantidade que define o ponto de começo da rotação, quando *t* = 0 (e no caso anterior seu valor era 0).

Portanto, uma onda de pressão senoidal com **amplitude** *A*, **freqüência** *f*, e desvio de **fase** f , é tipicamente descrita como uma função contínua do tempo *t* de acordo com

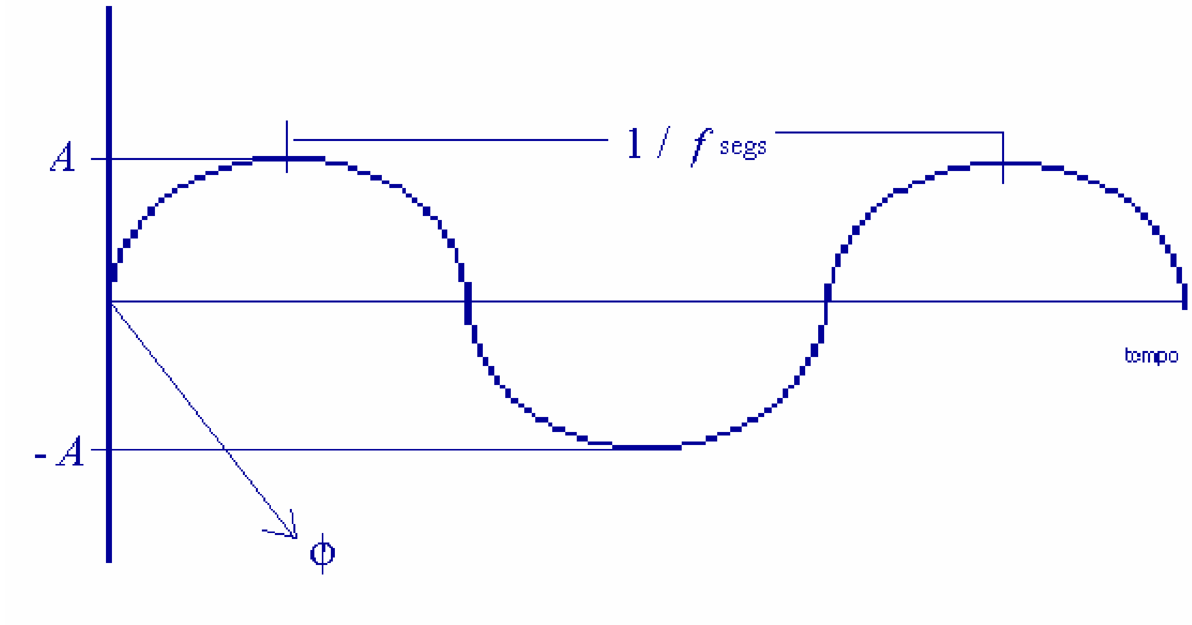
f (*t*) = *A*seno(2p*ft* + f)

ou

f (*t*) = *A*seno(? *t* + f)

pois ? = 2p*f* , a letra grega omega minúscula é usada para definir o produto da freqüência multiplicada por 2p, chamada **freqüência radiana**.

O gráfico das funções apresentadas acima é apresentado abaixo **(fig.6)**.



Esta função é muito importante pois descreve o som senoidal de uma forma geral, pois pode tanto representar a variação de pressão do meio quanto a variação elétrica análogica em sistemas eletroacústicos, e também como veremos adiante, serve para descrever as componentes de ondas mais complexas. Qualquer tipo de onda pode ser decomposto em componentes senoidais, o que quer dizer que as funções apresentadas acima descrevem o elemento mais básico dos fenômenos ondulatórios.

5 Intensidade, potência e pressão sonora

A energia de uma onda sonora, é a medida da quantidade de som nela presente. Normalmente o que nos interessa é a quantidade de energia transmitida por unidade de tempo, e não a energia total transferida, que quer dizer o número em joules por segundo (watts) que se propagam. Som é um quantidade tri-dimensional, por isso temos que levar em conta a área quando se fala em transmissão de energia, isto é temos que definir uma quantidade em termos de watts por unidade de área. Essa quantidade é chamada de *intensidade* sonora, que nos dá uma medida da densidade da potência de um som propagando em um direção particular. A intensidade sonora representa o fluxo de energia por unidade de área. Pode variar em uma escala que é maior que um milhão de milhões (10^{-12}).Por esta causa e pela maneira em que percebemos o volume sonoro, a intensidade é expressada em um escala logarítmica

Existem dois modos principais de percepção, logarítmico e linear. Dizemos que a percepção é logarítmica quando é baseada em uma razão de valores. Neste caso, por exemplo, a variação de 1 para 2 é percebida como a mesma que 2 para 4, ou 4 para 8, pois é baseada em uma razão 1:2. Da mesma forma as intensidades são percebidas logarítmicamente, pois a variação de .001Wm^{-2} para .01 Wm^{-2}, é percebida como a mesma que acontece entre .1 e 1.0 Wm^{-2}. Além da intensidade, a freqüência também é percebida logaritmicamente, pois os intervalos entre notas são baseados em razões entre valores de freqüência. Por exemplo, um salto de oitava equivale a razão 2:1. Já a percepção linear é baseada na diferença entre valores, a variação de 1 para 2 é percebida com a mesma que de 7 para 8, por exemplo. A variação de distância é algo que percebemos linearmente.

A escala logarítmica usada aqui é baseada na razão entre a densidade de potência real e uma intensidade de referência (1 picowatt por metro quadrado, $10^{-12}Wm^{-2}$):

$$SIL = 10\log\left(\frac{I_r}{I_{ref}}\right)$$

SIL = nível de intensidade sonora
I_r = o fluxo de potência sonora real (em Wm^{-2} , Watts por metro quadrado)
I_{ref} = o fluxo de potência sonora de referência ($10^{-12}Wm^{-2}$)

O fator de 10 aparece pois faz do resultado um número em que uma variação de número inteiro produz uma mudança que é aproximada à menor variação que o ouvido humano pode perceber. Uma mudanca de fator 10 na razão da densidade de potência é chamada de bel. Na equação do nível de intensidade sonora, isso provocaria uma variação de 10 no resultado ($SIL = 10\log_{10}10 = 10$). Então uma mudança equivalente a uma unidade inteira (um número inteiro) é chamada de decibel (dB).

O nível de *potência* sonora (PWL ou SWL), por sua vez é a potência sonora total irradiada em todas as direções pela fonte sonora. É similarmente expressado como o logaritmo de uma razão, em decibeis, entre a potência sonora real e uma potência sonora de referência de 1 picowatt (10^{-12}W):

$$SWL = 10\log\left(\frac{W_r}{W_{ref}}\right)$$

SWL = nível de potência sonora
W_r = potência sonora real (em W)
W_{ref} = potência sonora de referência (10^{-12}W)

O nível de potência sonora mede a potência sonora total gerada por uma fonte arbitrária, e não depende do contexto acústico.

O nível de *pressão* sonora (SPL) é a medida mais usual quando se fala em amplitude da onda sonora, por duas razões: pela sensibilidade do ouvido às variações de pressão e por ser uma quantidade simples de ser medida. A pressão sonora para fontes sonoras reais pode variar de menso de 20 microPascais (20×10^{-6} Pa) até mais que 20 Pa (1 Pa = 1 Nm^{-2}). Esses dois níveis de pressão correspondem mais ou menos ao mínimo de audição (20µPa) e ao limiar da dor (20 Pa), para o ouvido humano, a 1Khz de freqüência. Se compararmos o valor para o mínimo da audição humana com a pressão média atmosférica de 100000 Pa, observamos como é alta a sensibilidade do nosso ouvido. Por causa das caracteristícas da audição humana, o nível de pressão também é expresso numa escala logarítmica. Ela é baseada na razão entre a pressão sonora real e o limiar da audição a 1 Khz (20mPa):

$$SPL = 20 \log\left(\frac{P_r}{P_{ref}}\right)$$

SPL = nível de pressão sonora
P_r = a pressão sonora real (em Pa)
P_{ref} = a pressão sonora de referência (20 µPa)

O multiplicador de 20 serve a dois propósitos: fazer do resultado um número em que uma variação de número inteiro seja aproximadamente o mínimo possível de mudança percebida pelo ouvido humano, e prover alguma equivalência às medições de intensidade sonora. Se há apenas uma onda de pressão sonora no ponto de medição, isto é nenhuma interferência devida a reflexões, etc, o nível de intensidade sonora (SIL) é aproximadamente equivalente ao nível de pressão sonora (SPL). E toda variação medida em SIL será equivalente a variação em SPL, em qualquer caso, uma mudança de 10dB em SIL resultará em uma mudança de 10dB em SPL.

A cada 6 dB de mudança, um som dobra de intensidade. Isso é facilmente verificado pela relação abaixo:

$$\begin{aligned} SPL_{40\mu Pa} &= 20 \log_{10} (40\mu Pa/20\mu Pa) \\ &= 20\log_{10} (2) = 20 \text{ X } .3 = 6dB \end{aligned}$$

7 Adição de sons

Nestas considerações sobre a amplitude dos sons, pensávamos somente em sons simples de fonte única. Observaremos agora alguns pontos sobre a soma de sons, que pode ser entre:

a) sons *correlacionados*: no caso onde sons provêm de várias fontes relacionadas entre si. Neste caso várias fontes seriam derivadas de uma só. Exemplos: fontes relacionadas por uma reflexão simples, onde o atraso em tempo de uma fonte para outra é pequeno; fontes eletroacústicas, onde sons são tocados por vários alto-falantes, que recebem o mesmo sinal, mas estão separados no espaço.
b) sons *não-correlacionados*: onde os sons vem de fontes não relacionadas entre si. Exs.: reflexões mais complexas, instrumentos tocando juntos, vozes num coral, etc..

Quando os sons são correlacionados, a amplitude ou nível de pressão sonora total é a soma das

$$P_{total}(t) = P_1(t) + P_2(t) + \ldots + P_n(t)$$

amplitudes das fontes.

Por causa da periodicidade das ondas, é importante notar que a pressão de diferentes fontes poderá ter sinais diferentes (positivo, negativo), dependendo de sua fase relativa: se dois sons estão em fase, suas amplitudes são somadas; por outro lado, se dois sons estão em fase oposta (180^0 ou p), suas amplitudes são subtraídas. O primeiro caso é chamado interferência aditiva e o segundo, subtrativa.

Quando os sons não são correlacionados, devemos efetuar a soma dos quadrados das amplitudes de pressão envolvidas. Para obter o resultado desta soma como pressão, precisamos calcular a raiz quadrada do valor total:

$$P_{total}(t) = \sqrt{(P_1^2(t) + P_2^2(t) + \ldots + P_n^2(t))}$$

$$P_n = \sqrt{(P^2 + P^2 + \ldots + P^2)} = \sqrt{(NP^2)} = P\sqrt{N}$$

E então, para N fontes não-correlacionadas:
Por último, devemos notar que para se realizar uma soma de amplitudes de pressão expressas em decibéis (dB), não podemos simplesmente somar os valores. Estes são medidos em uma escala logarítmica, portanto uma simples soma não obterá o resultado correto. É preciso, então, converter esses valores de volta as suas razões de amplitudes. Se precisamos de um resultado em decibéis, devemos converter de volta o resultado obtido na soma.

Exemplo:

Qual é o aumento no nivel de pressão quando dois sons não-correlacionados de 71 e 69 dB SPL são somados?

$$SPL = 20\log_{10}((P_1^{\ 2} + P_2^{2} + ... + P_n^{2})^{1/2} \ / P_{ref})$$

$$= 10\log_{10}((P_1^{\ 2} + P_2^{2} + ... + P_n^{2}) / \ P_{ref})$$

Precisamos substituir cada amplitude P, pelos valores que as SPLs representam, para isso usamos a relação:

$$P^2 = 10^{(SPL/10)} P_{ref}^{\ 2}$$

$$P^{\ 2}_{69dB} = 10^{(69/10)} \times 4 \times 10^{-10} N^2m^{-4} = 3.18 \times 10^{-3} N^2m^{-4}$$

$$P^{\ 2}_{71dB} = 10^{(71/10)} \times 4 \times 10^{-10} N^2m^{-4} = 5.04 \times 10^{-3} N^2m^{-4}$$

$$SPL = 10\log_{10}((P_{69dB}^{\ 2} + P_{71dB}^{2}) / \ P_{ref})$$

$$= 10\log_{10}((3.18 \times 10^{-3} + 5.04 \times 10^{-3}) / 4 \times 10^{-10}) = 73.1 \text{ dB}$$

O resultado demonstra que apenas um pouco mais de 2 dB foram adicionados a pressão sonora inicial e não 69dB como seria em uma soma direta de valores.

8 Projeção sonora

Sons são irradiados tridimensionalmente em todas as direções. Com isso, existe uma dispersão da energia acústica original. A intensidade sonora em função da distância pode ser calculada utilizando-se a área de uma esfera hipotética que se forma em torno da fonte. Tal área é relacionada com o quadrado do raio na seguinte relação:

Área da esfera = $4pr^2$

Portanto a intensidade sonora, que é a razão entre a potência sonora sobre a área decresce com o aumento da distância da fonte de acordo com a seguinte equação:

$$I = \frac{W_{fonte}}{A_{esfera}} = \frac{W_{fonte}}{4p\ r^2}$$

Utilizando-se esta equação observa-se que a 1m da fonte a intensidade sonora é 11dB menor, e a partir daí, decresce pela metade (6 dB) cada vez que a distância dobra. Para distâncias muito pequenas, geralmente equivalentes ao raio do tamanho físico da fonte, a equação apresentada é inválida, pois os valores da intensidade podem variar bastante. A equação também não leva em conta que a fonte pode estar apoiada em uma ou mais superfícies, direcionando a irradiação sonora, que assim não é mais uma esfera perfeita. Para adequá-la a essa situação, temos que multiplicá-la por um fator **Q**, equivalente à direcionalidade da fonte (em relação à uma esfera). Esse fator é equivalente a 2, para uma superfície, 4 para duas, 8 para três, e assim por diante. Cada uma dessas superfícies em que a fonte se apóia adiciona 3dB à intensidade sonora percebida em um ponto.

9 Interações sonoras

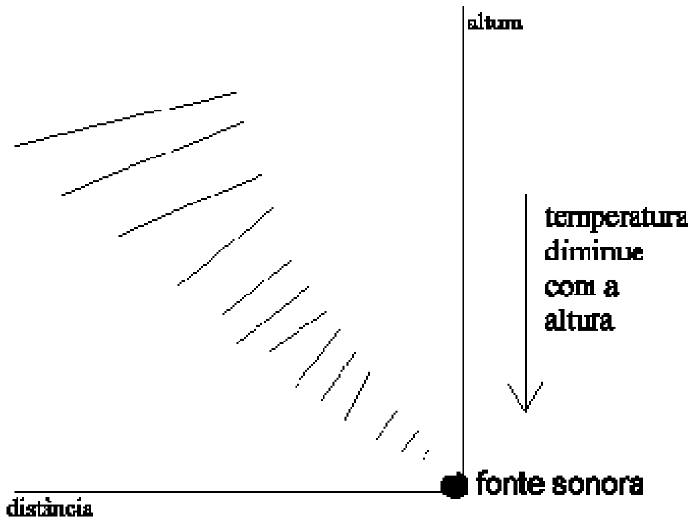
Até agora consideramos o som em isolamento, mas em situações reais veremos que as ondas sonoras interagem com outras ondas sonoras, com objetos e com mudanças no meio. Essas interações sonoras são de vários tipos, que veremos em seguida.

9.1 Sobreposição

Como vimos, anteriormente, duas ondas sonoras podem interferir destrutivamente com elas mesmas. Quando isso acontece, apesar de haver um cancelamento mútuo, e em casos a amplitude de variação de pressão pode ser até zero, as ondas não desaparecem, pelo contrário, continuam o seu fluxo normal, pois seu conteúdo de energia é preservado. O que acontece é que a amplitude de pressão em um dado ponto é simplesmente a soma das ondas individuais presentes naquele ponto. Esta característica chama-se *sobreposição linear***,** e com ela podemos entender uma onda sonora em um certo ponto como a soma linear de componentes individuais.

9.2 Refração

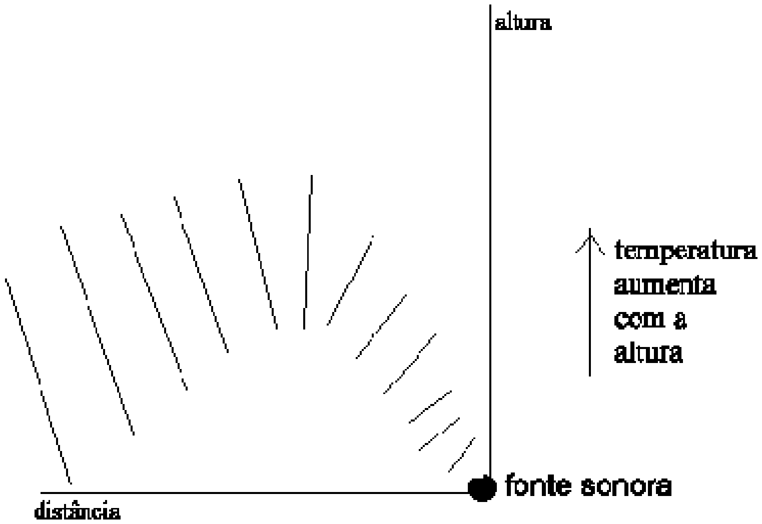
Como vimos anteriormente, a velocidade do som no ar varia com a temperatura. Duas áreas com diferentes temperaturas de ar podem ser consideradas, efetivamente, dois meios diferentes. Quando o som passa de um meio para outro, acontece o fenômeno da refração, e a direção de propagação sonora é modificada por um certo fator. Além disso, em situações ao ar livre, o vento também pode ser um fator que altera a velocidade e direção de propagação das ondas sonoras.

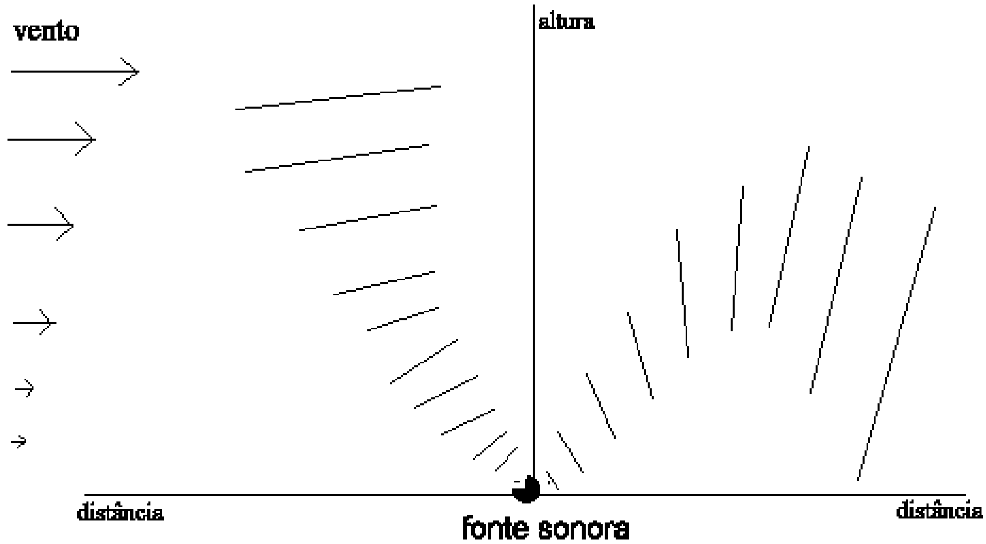


Exemplos:

a) Normalmente a temperatura do ar reduz-se com a altura. Coma a velocidade do som é menor para o ar mais frio, o som tende a ser desviado da sua direção original, tendendo a tomar uma curvatura ascendente **(Fig.6)**. Por isso, a percepção da intensidade desse som a nível do solo tende a diminuir bastante com a distância, mais do que previsto pelos cálculos mostrados anteriormente.

b) Em certas situações menos comuns, o ar próximo ao solo está mais frio que aquele a certa altitude. Nesse caso, as ondas sonoras tendem a curvar-se de cima para baixo, incorrendo em sons mais intensos a uma grande distância da fonte **(fig.7)**.





c) O vento tende a modificar a velocidade de propagação do som. A velocidade do som em um meio em movimento é a soma das velocidades do som (em um meio em repouso) e do próprio meio. Assim, o som tende a ter maior velocidade em direção ao vento, e tende a ser retardado em direção contrária. A direção de propagação também é afetada. Como o vento tende a ser maior quanto maior a altitude, as ondas em direção contrária ao vento tendem a ser curvadas para cima enquanto as em mesma direção tendem a ser curvadas para baixo **(fig.8)**.

9.3 Absorção

Som é absorvido quando entra em contato com qualquer objeto físico. Isso acontece porque o objeto atingido tenderá a vibrar, dispersando energia da onda sonora, e também por causa da perda por fricção dentro do material. Em geral, materiais porosos, por causa da grande quantidade de área de interação disponível, tendem a ser os melhores absorventes de som. Por isso, lã de vidro, tecidos, cortiça, etc., são os melhores materiais para a absorção de som.

9.4 Reflexão

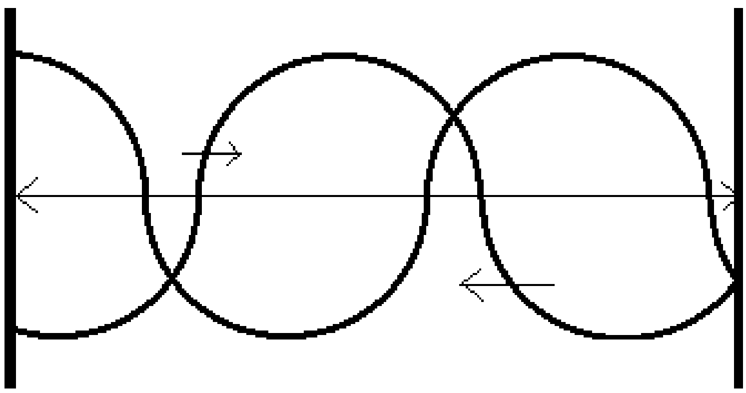
Quando o som atinge uma superfície rígida ele tende a refletir-se de volta. Esse é o fenômeno básico da reflexão. Isso tende a gerar os efeitos conhecidos do eco e da reverberação. O eco é geralmente uma repetição simples com diferença de tempo de mais de .08 segundos do som original e de sua reflexão. Reverberação é um conjunto de reflexões rápidas e complexas em superfícies de um ambiente fechado.

9.5 Interferência

O fenômeno da interferência ocorre quando dois sons correlacionados (por exemplo de duas fontes eletroacústicas idênticas) interagem entre si. A interferência ocorre quando, por alguma razão dois sons correlacionados atingem o ouvinte em intervalos de tempo diferentes, o que quer dizer, que vão atingi-lo com fases diferentes em seu ciclo de osciclação. Quando isso ocorre, dois tipos extremos e seus intermediários de interferência podem existir: a interferência aditiva (ou construtiva) e a interferência subtrativa (ou destrutiva). A interferência decorre diretamente da característica de sobreposição linear das ondas sonoras, onde a amplitude em um ponto é a soma das amplitudes das ondas que se sobrepõem. Os valores de amplitude de uma onda de pressão podem ter sinal negativo ou positivo. No caso da interferência construtiva, os sinais das ondas presentes num determinado ponto de espaço são do mesmo tipo (positivo ou negativo), e no caso da inteferência destrutiva os sinais são contrários.

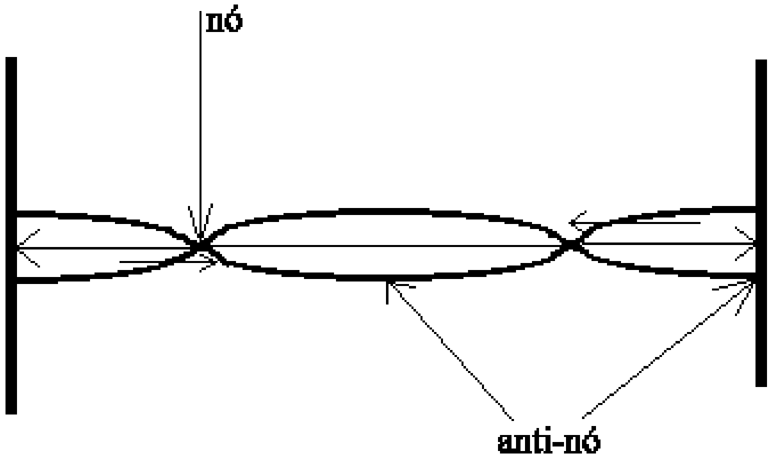
9.6 Ondas estacionárias

Ondas estacionárias ocorrem entre superfícies refletivas. O mais simples sistema em que isso pode ocorrer é como uma reflexão entre duas superfícies rígidas, como mostrado abaixo **(fig.9)**.



A onda estacionária realiza incessantemente o caminho entre os dois refletores, retraçando as mesmas posições que são relacionadas com alguns comprimentos de onda específico (e por conseqüência,

freqüências específicas), relacionados com a distância entre as superfícies (**fig.10)**.
Note-se que a onda de pressão possue pontos onde a amplitude de pressão é zero, chamados *nós*, e pontos onde a amplitude é máxima ou mínima, chamados *anti-nós*. Onde a onda toca a superfície são formados os anti-nós, que vão determinar pro sua vez o comprimento da onda estacionária formada.



É possível determinar a partir da distância entre as superfícies, algumas caraterísticas das ondas estacionárias que ocorrem entre elas. A maior onda que pode caber neste sistema tem metade de um comprimento de onda equivalente a distância entre os refletores. Isso é demonstrado pela relação:

$$f_{maior} => L = \frac{l}{2} => f_{maior} = \frac{v}{2L}$$

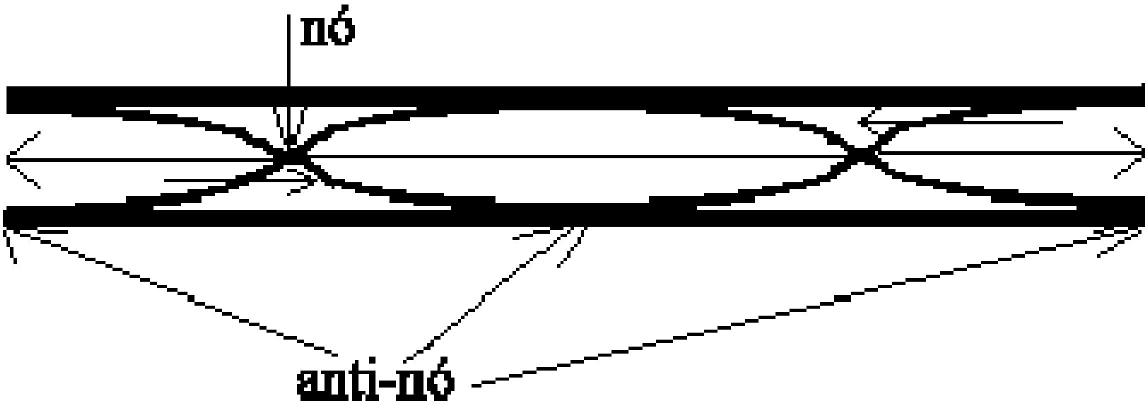
onde f_{maior} = a freqüência da onda em Hz
L = a distância entre as superfícies em m
? = o comprimento de onda em m
v = a velocidade do som no ar em m s^{-1}

Além disso, qualquer múltiplo inteiro da metade do comprimento de onda pode caber entre esses dois refletores. Por essa razão existem infinitos valores de freqüências que as ondas estacionárias podem possuir, definidos pela seguinte equação:

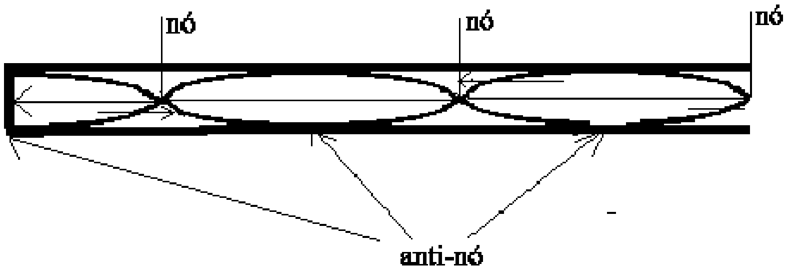
$$f_n = \frac{nv}{2L}$$

onde f_n = a freqüência da onda em Hz
n = 1, 2, ..., ∞

Ondas estacionárias do mesmo tipo mostrado acima ocorrem também em outras situações, como em tubos, abertos ou fechados dos dois lados, cujas freqüências são obtidas utilizando-se da mesma relação mostrada acima. Essas freqüências são também chamadas *freqüências modais* de um tubo, equivalentes aos modos de vibração desse tubo (que são as ondas estacionárias) **(Fig.11)**.



Uma outra classe de ondas estacionárias existe em um situação onde temos um tubo com um lado fechado (uma só superfície refletora) e outro aberto **(fig.12)**. Neste caso as ondas refletem de um lado do tubo e estão livres do outro lado. Por isso a maior onda estacionária que pode caber no tubo tem 1/4 do comprimento de onda equivalente ao comprimento do tubo. Pelo fato de que um dos dois lados ser aberto, não existe a formação de um anti-nó na onda de pressão no lado da abertura (o anti-nó só se forma na superfície refletora). O efeito disso é que não existirão freqüências modais em múltiplos pares da freqüência mais baixa.



A equação que define as freqüências que podem existir neste tipo de tubo é:

$$f_n = \frac{(2n+1)v}{4L}$$

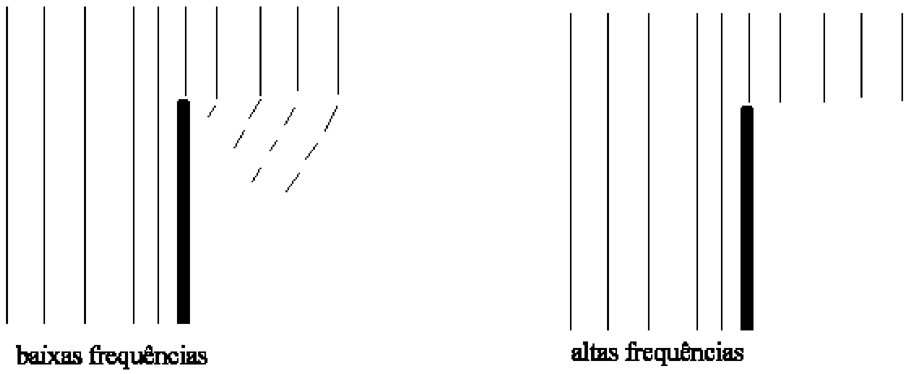
onde f_n = a freqüência da onda em Hz
n = 1, 2, ..., ∞

9.5 Difração

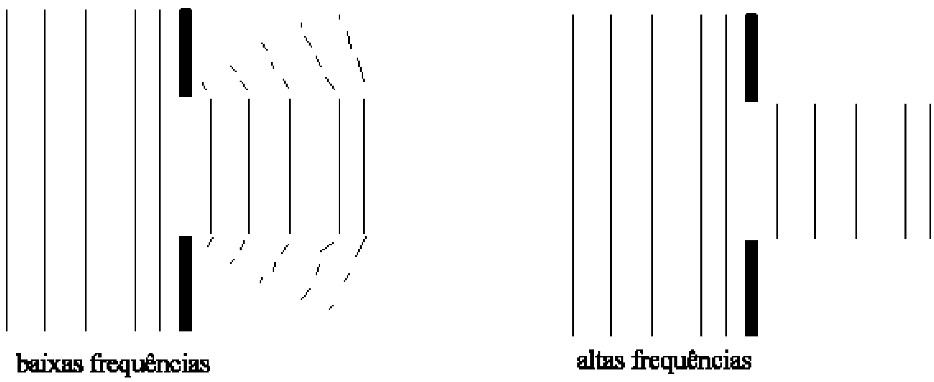
A difração acontece quando o som encontra um objeto que impede parte da passagem do som, jogando uma "sombra" em sua irradiação. Isso acontece por exemplo, em esquinas, em muros descontínuos, portas, etc.. O som tem a abilidade de se reconstruir e continuar se espalhando por difração, no entanto o grau de diifração do som depende de seu comprimento de onda, e assim de sua freqüência. Sons mais graves, com ondas mais longas têm uma quantidade maior de difração que aqueles sons mais agudos. Sons mais agudos tendem a ser direcionais, enquanto sons graves espalham-se melhor.

Exemplos:

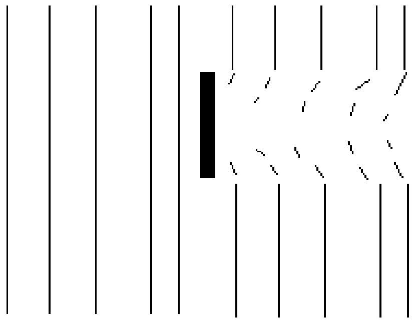
a)Difração em um canto:



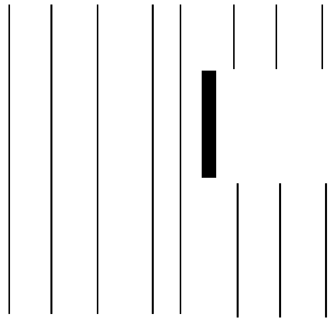
b) Difração através de uma abertura:



c) Difração em volta de um objeto



baixas frequências

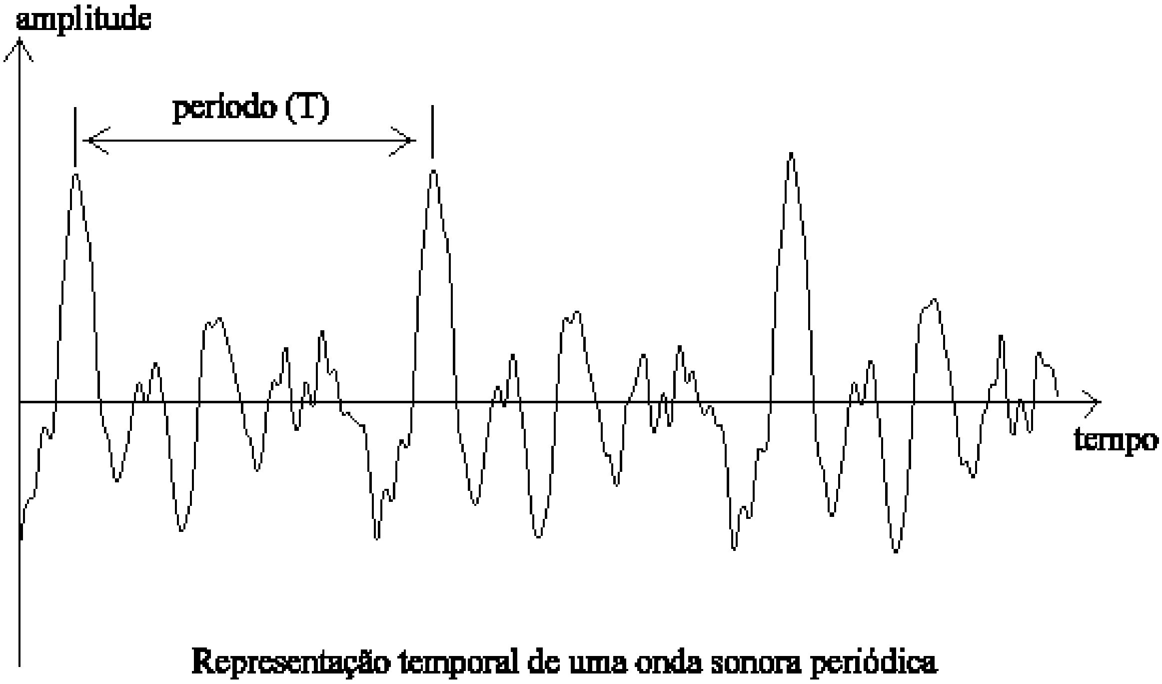


altas frequências

10 Timbre

Até agora, estavamos considerando o nosso universo sonoro de uma forma limitada. Representávamos todos os fenômenos acústicos baseando nosso modelo sonoro nas ondas do tipo senoidal. Como vimos, este tipo de onda é obtido apenas de forma eletrônica. Já os sons da natureza são de uma natureza mais complexa.Se observarmos a representação de uma onda sonora, em um gráfico *amplitude X tempo*, produzida por um instrumento, como a viola **(fig.16)**, veremos que ela difere muito da forma de onda do tipo senoidal **(figs. 1, 2, 3 e 5)**. Isso pode nos dar uma pista com relação às diferenças qualitativas que percebemos entre os diferentes sons que percebemos. Outro aspecto interessante que é observado na comparação entre esses dois tipos de onda, é que ambos são *periódicos*, ou seja se repetem em um espaço de tempo. Essa característica comum significa que, para a nossa percepção, tanto o som senoidal, quanto o som
do instrumento em questão vão possuir *alturas definidas*. Ou seja, em termos simples, sons periódicos são relacionados com instrumentos *afinados*, e a freqüência dos ciclos inteiros de onda, que define a altura de determinadada nota, vai ser chamada de *freqüência fundamental.* A distinção entre freqüência e freqüência fundamental vai ser muito importante nos estudos que se seguirão. Existem é claro, os sons instrumentais ou não, que não têm altura definida. Para esses, em geral, veremos que a sua forma de onda é *aperiódica*, ou seja, que não possue um padrão audível de repetição. Por essas razão, esses sons não vão possuir uma freqüência fundamental audível, e por conseqüência, nenhuma altura definida.

Para identificar os diversos sons produzidos tanto por instrumentos musicais como por outras fontes, utilizamos uma qualidade auditiva que chamamos de *timbre,* ou *cor* sonora, que é um atributo muito importante da acústica musical. Essa qualidade, como vimos acima está correlacionada com a forma da onda sonora. Em função disso é preciso investigar como essas ondas são complexas formadas para sabermos mais sobre os diferentes ons percebidos por nós. No estudo do timbre, precisamos aprender um outro tipo de representação para as ondas sonoras que vai ser tão útil quanto a representação da amplitude (de pressão) *versus* tempo, que temos utilizado correntemente.



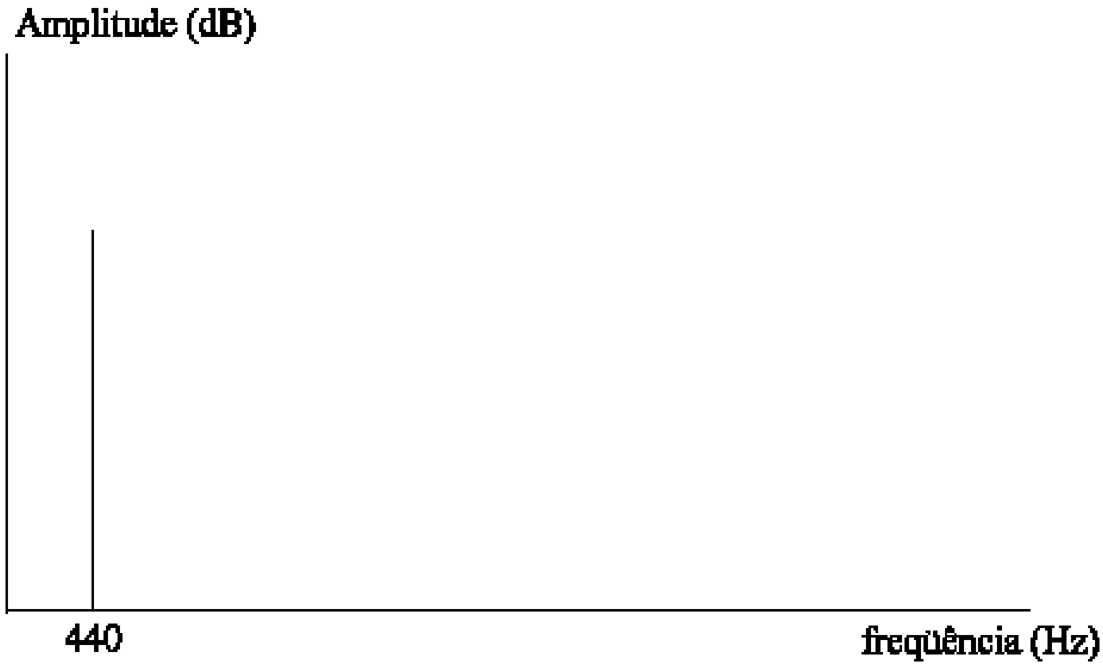
Representação temporal de uma onda sonora periódica produzida pela viola

11 Domínios temporal e espectral

Até agora, nós temos representado graficamente o som como a variação da amplitude de pressão, produzida pelo movimento das moléculas de um certo ponto no espaço, em um certo espaço de tempo tempo. Assim pudemos estudar as definições de freqüência, período, amplitude, etc.. Essa representação é chamada *domínio temporal* ou *do tempo*,que equivale ao quanto certa quantidade (como a amplitude, varia no tempo). As diferentes formas de onda podem bem definidas dessa forma.

A outra representação que podemos ter de uma onda sonora, relaciona a amplitude com a freqüência. Ou seja, em um eixo vertical temos a amplitude, que neste caso não é a amplitude instantânea de pressão da onda, mas o *pico de amplitude*, ou seja o máximo/mínimo que a amplitude de pressão pode ter, e em outro temos a freqüência **(fig. 17)**. Essa representação é chamada de *domínio espectral*, *das freqüências* ou apenas *espectro*. Por que precisamos dessa representação para melhor entender o timbre? A resposta está relacionada com o fato, que já foi mencionado, de que as ondas mais simples, senóides, são unidades em que ondas complexas podem ser decompostas.

Nesse caso, as freqüências das ondas senoidais são freqüências puras, que vão aparecer no nosso gráfico amplitude *versus* tempo, como uma barra vertical, de altura proporcional à sua amplitude de pressão (veja na secção 5). O gráfico de uma senóide de amplitude arbitrária e 440 Hz de freqüência é mostrado abaixo.

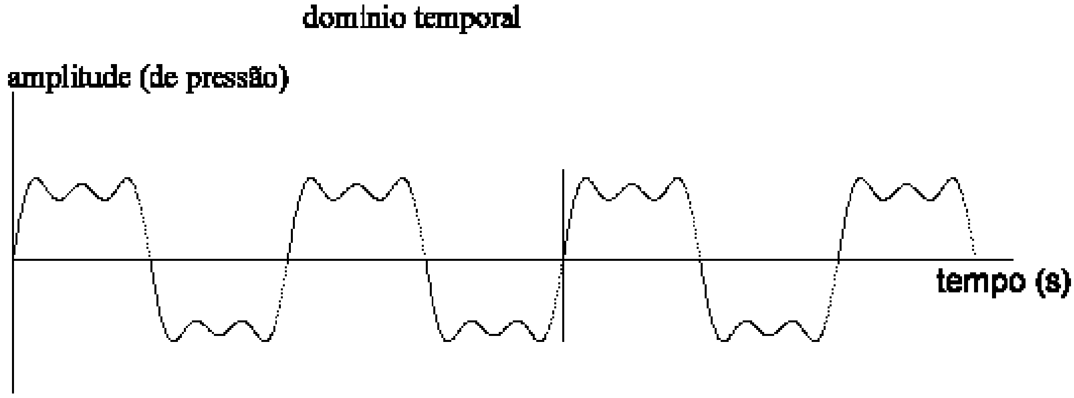


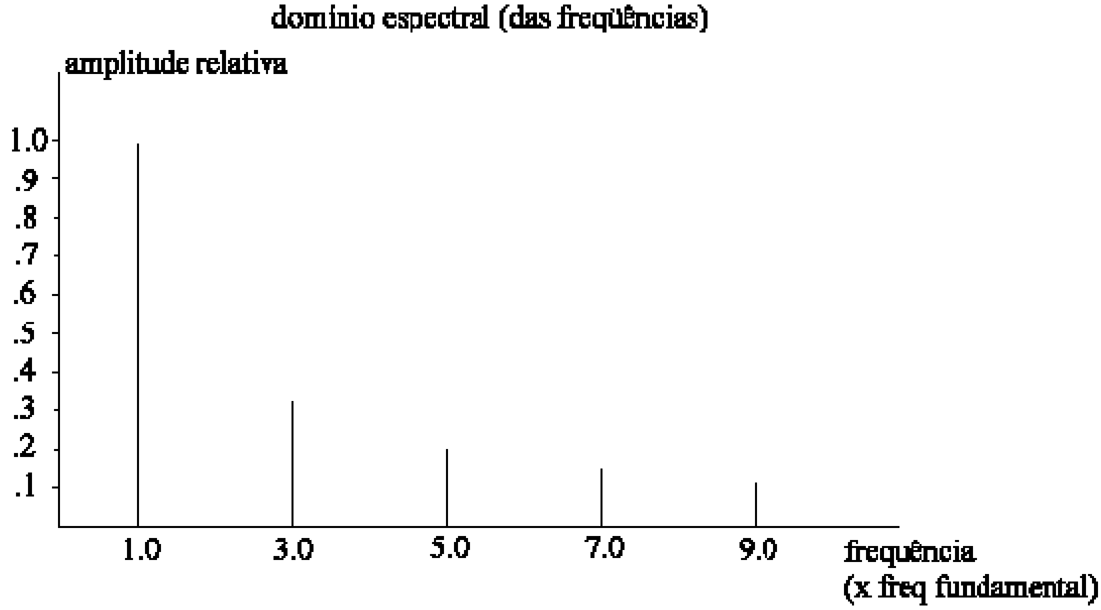
Representação espectral de uma senóide de 440 Hz

Portanto, um som complexo, não importando se é períodico, poderá sempre ser decomposto em um número de sons senoidais, cada um com freqüência, amplitude de pico e fase individual. A representação espectral é como se fosse a fotografia de um som em um determinado momento, um congelamento do tempo, onde retiramos da variação temporal da onda informações sobre as *componentes senoidais* dessa vibração complexa.

12 Análise e síntese espectral

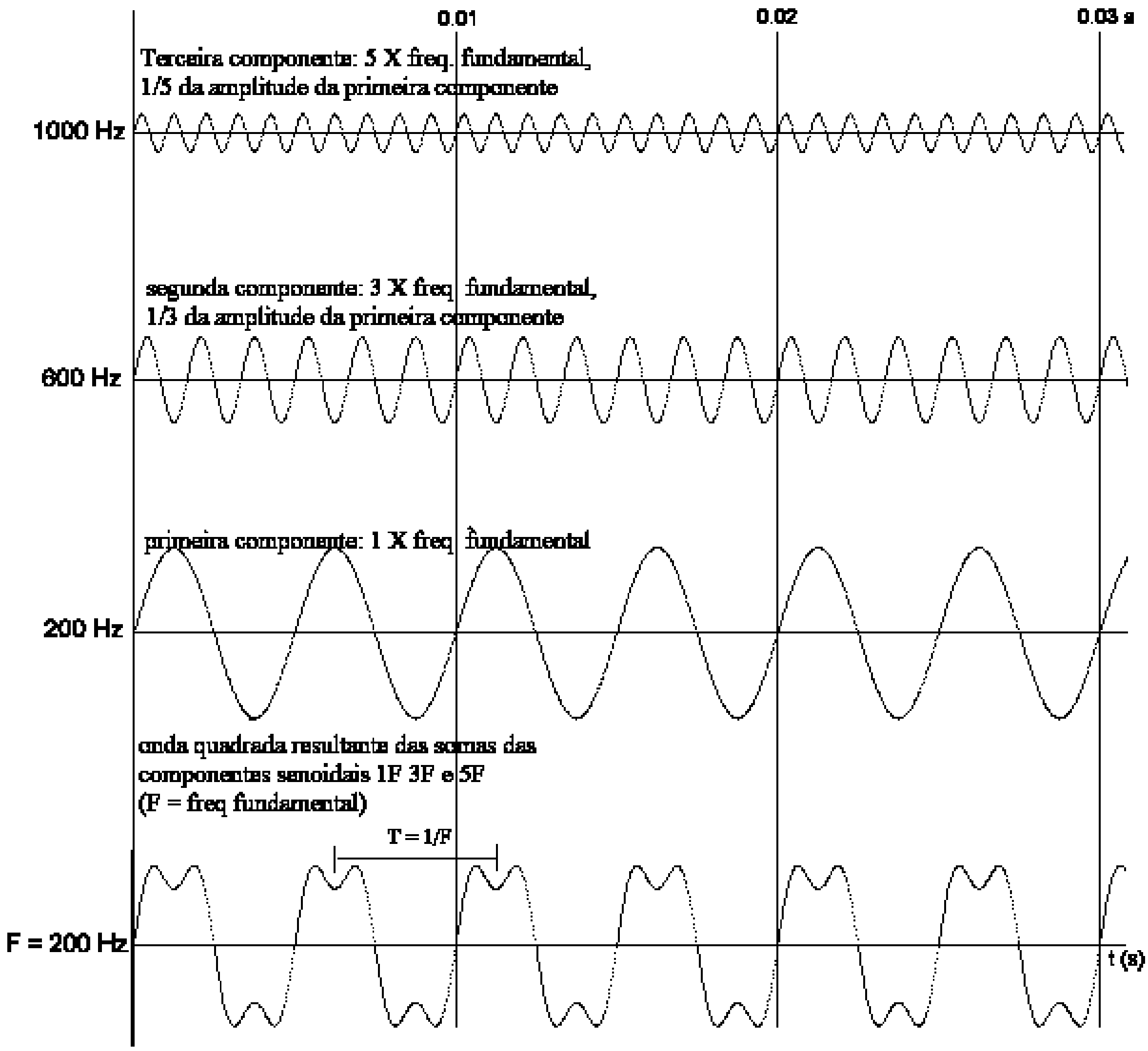
A relação entre formas de ondas complexas e senóides foi descoberta pelo matemático francês do séc XVIII, Joseph Fourier. A decomposição de sons complexos em simples é uma ferramenta muito útil para o estudo da acústica. Essa decomposição se chama *análise de Fourier*, que transforma a representação temporal na representação espectral. Como primeiro exemplo, a senóide quando analisada revela apenas uma componente no espectro, equivalente a sua própria freqüência de oscilação **(fig.17)**.





Vibrações mais complexas, como a da onda quadrada, apresentam uma série de componentes senoidais. Neste caso, o domínio espectral mostrará um número de barras verticais equivalentes às componentes senoidais de diferentes freqüências que, somadas linearmente (ponto a ponto, ou seja, sobrepostas) formam uma onda complexa **(figs. 18 e 19).** A onda quadrada, dos exemplos, é uma forma de onda resultante soma de compontes senoidais que possuem freqüências que são múltiplos inteiros ímpares da fundamental, conforme mostra o gráfico (5 componentes na **figura 18** e 3 na **figura 19**). Além disso, cada componente senoidal possue uma amplitude relativa. A componente que possue 1X a freqüência fundamental é a mais intensa, enquanto as outras vão decrescendo aos poucos. A segunda componente, que possue 3X a freqüência fundamental, tem 1/3 da amplitude da primeira componente.

Uma onda quadrada como soma linear de suas componentes harmônicas



Quando as freqüências das componentes de um som são relacionadas de uma forma simples, como múltiplos inteiros da freqüência fundamental, as componentes são chamadas de *parciais harmônicos,* ou somente *harmônicos*. Neste caso, o som terá uma uma freqüência fundamental audível, e conseqüentemente altura definida. Um som complexo cujas componentes mais significantes são N harmônicos poderia ser descrito pela seguinte função:

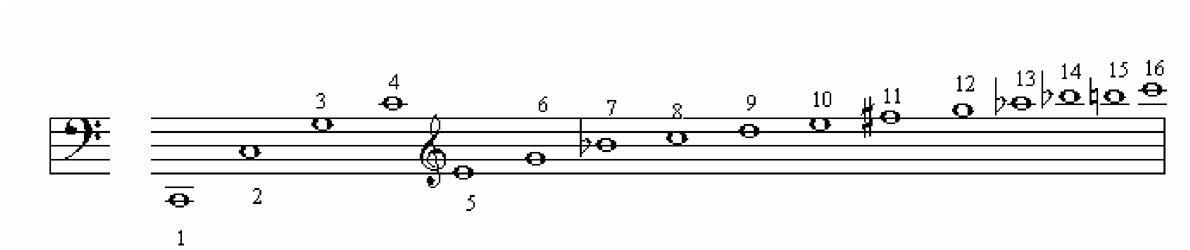
$$\mathbf{f}\,(t) = A_0\mathbf{seno}(?\,t + \mathrm{f}\ _0) + A_1\mathbf{seno}(2?\,t + \mathrm{f}\ _1) + A_2\mathbf{seno}(3?\,t + \mathrm{f}\ _3) + \ldots + A_{n-1}\mathbf{seno}(N?\,t + \mathrm{f}\ _{n-1})$$

Ou seja, uma soma de N senóides cujas freqüências são relacionadas por uma série de números inteiros (1, 2, 3, ... , N). Quando fazemos essa soma de senóides estamos fazendo o processo inverso da análise de Fourier, a *síntese* a partir das componentes harmônicas do som.

Agora podemos contruir uma teoria provisória do timbre: o timbre de um som é relacionado com as suas componentes senoidais. Estas componentes têm freqüências diferentes que podem ser relacionadas de forma simples, como múltiplos inteiros de uma freqüência fundamental, quando são chamadas de harmônicos. Quando as componentes senoidais não se resolvem como múltiplos de uma fundamental, temos sons mais complexos, que não possuem uma altura definida, e neste caso, os componentes são chamados de *parciais inarmônicos*. O espectro de um som, que determina seu timbre, é a representacão das freqüências destas ondas e suas amplitudes relativas.

13 A Série Harmônica.

Uma das consequências das descobertas que fizemos é a descoberta de uma relação de números inteiros entre as freqüências de componentes senoidais de alguns sons de certos instrumentos musicais. De acordo com a nossa teoria provisória do timbre, a presença ou não de certos componentes é a razão pela qual percebemos diferentes timbres ou cores. Nós chamamos essas componentes de harmônicos, e o seu conjunto de *série harmônica* **(fig. 20).**.



A série harmônica mostrada acima em notação musical tradicional é uma aproximação dos valores de freqüência para os dessa nossa notação, o que quer dizer que não vão corrresponder exatamente às freqüências para essas notas em certos instrumentos temperados (como o piano por exemplo). Estudaremos a razão isso quando falarmos de afinação e temperamento. A presença da série harmônica é evidente nos instrumentos de metal, onde ela é usada como meio de emitir as doze notas da nossa música ocidental.

O que se vê quando analisamos a série é que há um espaçamento grande entre os primeiros harmônicos que vai se fechando à medida em que vamos subindo pela série, devido à natureza logarítmica do fenômeno das freqüências quando representado de modo linear, como é o caso da nossa notação tradicional de alturas. Lembremos que dizemos que a percepção se dá logaritmicamente quando é baseada na razão entre dois valores, como neste caso das freqüências onde as relações entre notas (intervalares) são percebidas como razões entre freqüências. Basta lembrar que para se pular de oitava temos que sempre multiplicar por dois a freqüência original, e se olharmos na série acima, as notas em oitavas ascendentes estão sempre relacionadas pela razão 2:1 (utilizando-se os números de ordem dos harmônicos, dados acima das notas na **fig.20**). Isso vale também para os outros intervalos, onde a sua forma pura vai ser dada pelas razões encontradas na série. Por exemplo: a quinta pura ascendente tem uma razão 3:2, retirada da nossa representação musical da série harmônica **(fig.20)**, de dó (2, pois é o 2º harmônico) a sol (3º harmônico), o que quer dizer que se sabemos que a nota *lá* tem uma freq.

fundamental de 220Hz, para sabermos a freqüência da nota *mi*, quinta acima, multiplicamos aquele valor por 3/2,

$$220 \text{ X } 3/2 = 660/2 = 330 \text{ Hz},$$

logo a freqüência de um *mi* puro calculado a partir de um *lá* 220Hz, possue a freqüência de 330 Hz. E assim por diante podemos utilizar as outras razões da série harmônica correspondentes aos devidos intervalos para calcular suas relações puras de freqüência. Note-se que quando chegamos a harmônicos mais altos, alguns intervalos vão possuir diferentes razões (que se refletem em diferentes tamanhos), e esse problema é uma das razões por que existem diversos tipos de temperamento, que estudaremos adiante.

14 O espectro e as formas de onda.

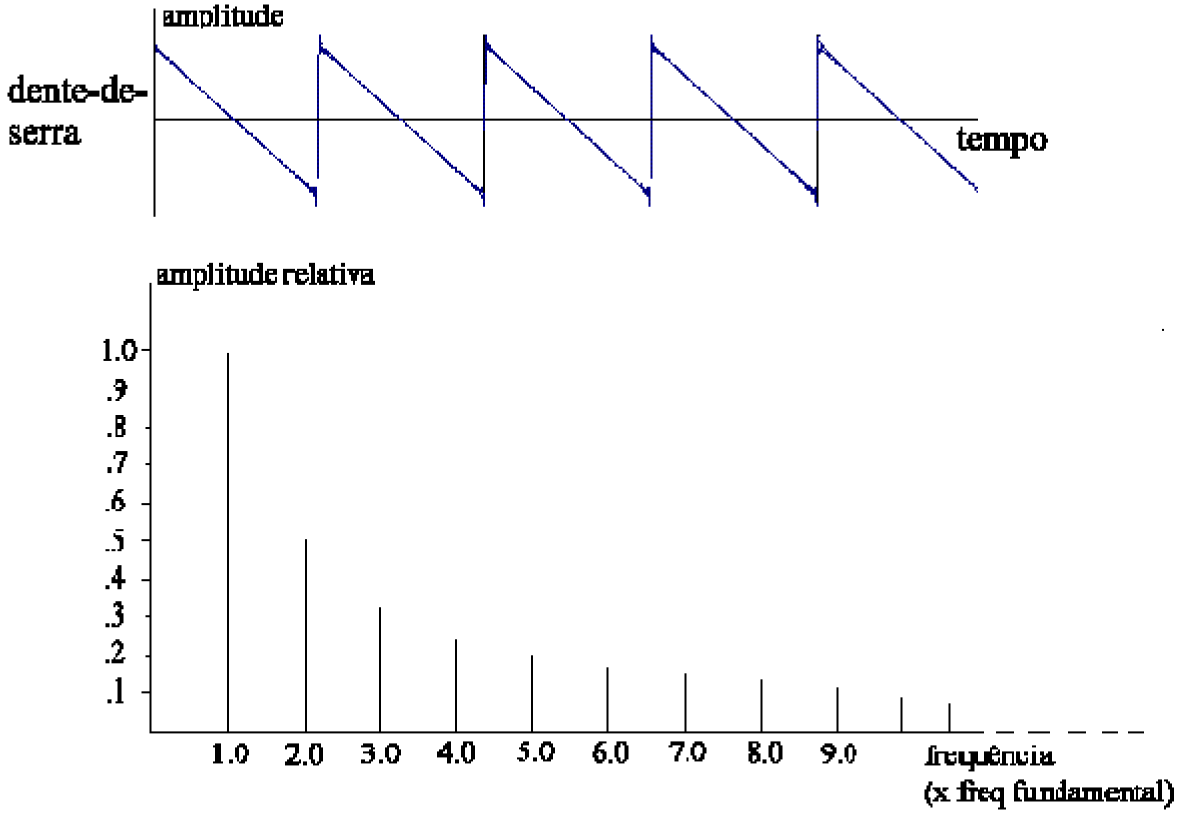
Falamos extensivamente que o timbre depende das componentes senoidais que estão presentes no som percebido. Isso quer dizer que devemos somar as ondas senoidais de diversas freqüências para obtermos o nosso som, essas componentes sendo relacionadas por números inteiros quando tivermos harnônicos. Ora, se somarmos diferentes ondas é claro que vamos alterar a forma da nossa onda original. Se ela inicialmente tinha uma forma senóide, dependendo de quais componentes, de sua amplitude relativa, nós vamos obter diferentes formas de onda que então estão correlacionadas com o timbre que percebemos.

Falamos que o domínio das freqüências nos mostra a amplitude relativa das componentes de um som. Se temos a nossa onda com uma forma qualquer, podemos obter, através de cálculos matemáticos, as componentes senoidais dessa onda em um dado instante. Isso pode ser feito de várias formas, que são mais ou menos equivalentes. Uma delas é usando a transformada de Fourier, que é uma ferramenta muito útil para análise de espectro, que pode ser usada em conjunto com a transformada inversa de Fourier, para ressintetizar-se o som a partir de seus componentes senoidais. Outra maneira que podemos fazer é essa análise é com o uso de *filtros,* que como o próprio nome diz, filtram o espectro, deixando passar somente certas freqüências. Filtros são também muito utilizados para a modificação de sons, por isso os estudaremos em detalhe quando tratarmos de processamento de som.

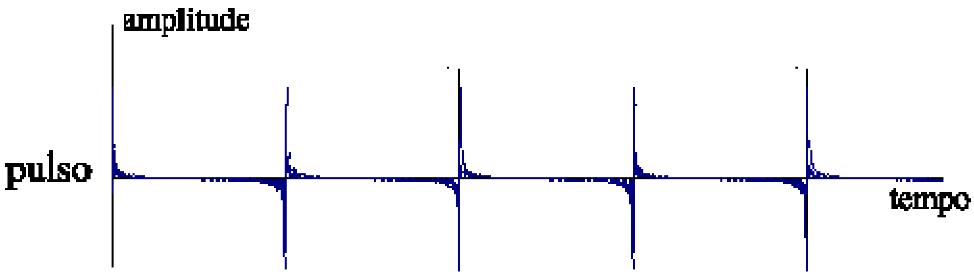
Alguns tipos comuns de formas de ondas com componentes harmônicas:

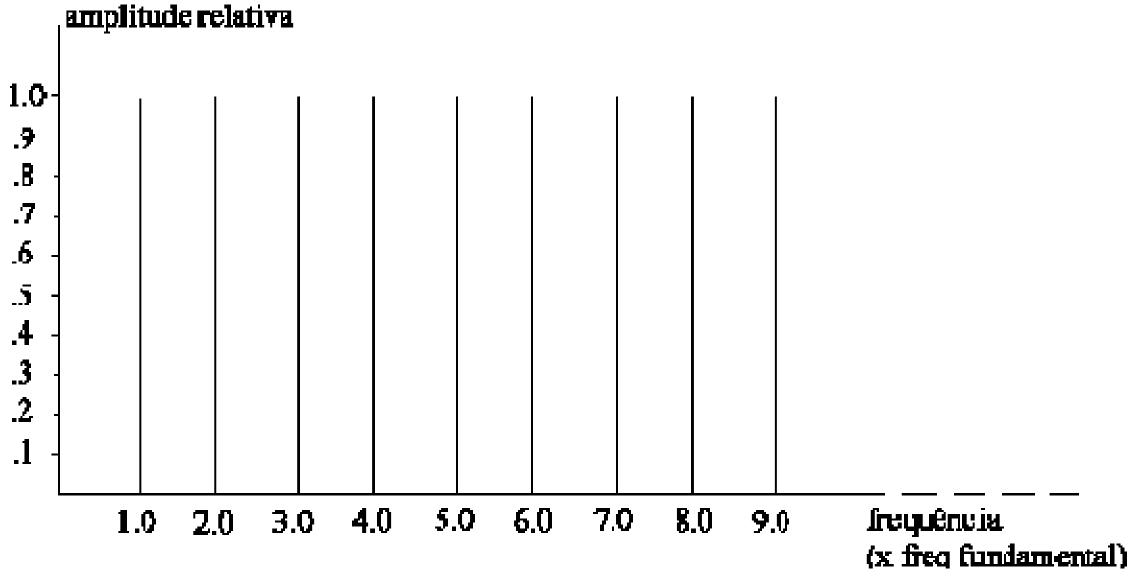
Dente-de-serra: tem a forma descrita pelo nome **(figs. 21).** Possue todos os harmônicos com amplitudes relativas que caem segundo 1/número do harmônico, ou seja o primeiro harmônico tem amplitude 1/1, o segundo, 1/2, o terceiro, 1/3, etc.... Pode ser associada, de uma forma geral, com o timbre emitido por instrumentos de corda, como o violino.
Triângulo: tem a forma triangular. Não possue harmônicos pares, a amplitude relativa de seus harmônicos decresce abruptamente, ela é inversamente proporcional ao quadrado do número do harmônico.
Quadrada: tem a forma quadrada **(figs. 18 e 19)**. Não possue harmônicos pares, e as suas amplitudes caem segundo 1/número do harmônico. Ela é associada com o som do clarinete.

Pulso: tem a forma de um pulso **(fig. 22)**. Possue em teoria todos os harmônicos em igual amplitude.



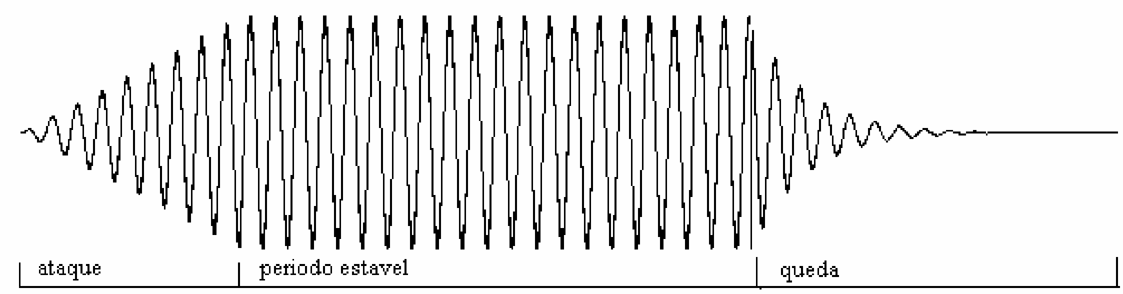
Os exemplos gráficos mostram duas ondas, dente-de-serra e pulso, ambas com 80 harmônicos, representadas em seus domínios temporais e espectrais (até o 9º harmônico). Nos gráficos podemos observar a diferença em forma causada pelas diferentes amplitudes relativas dos harmônicos. A onda pulso tem ângulos bem acentuados, causados pela presença em grande amplitude de componentes de alta freqüência (agudas). Em geral, quanto maior a presença de parciais em freqüências altas, mais acentuada será a angulação da forma de uma onda.





15 A teoria clássica do timbre

Hermann von Helmholtz em seu livro *On the Sensations of Tone*, montou, no final do séc.XIX, um corpo teórico que é a fundação do que hoje sabemos sobre o timbre. Helmholtz caracteriza os sons como consistindo de uma onda de forma arbitrária fechada em um envelope (ou envoltória) de amplitude feito de três partes: ataque (ou tempo de crescimento), período estável e queda (ou tempo de queda). O ataque é o tempo que a amplitude de um som leva para sair do zero e subir até o seu valor de pico. O período estável é onde a amplitude é idealmente constante, e o som some no período da queda (onde a amplitude cai até zero) **(fig.23)**.



Diferentes sons têm diferentes envoltórias de amplitude. Podemos pensar por exemplo em dois

instrumentos como o violino e o piano, e nas características de seus sons em termos de timbre, e veremos que suas envoltórias são bem características: o piano tem um ataque curto seguido por um período estável e uma queda longa, se deixarmos a nota solta; já o violino tem um ataque mais lento (observe que o som não é tão percussivo como o do piano) e um período estável de duração variável, e uma queda curta. Podemos inferir que diferentes maneiras de tocar (p.ex. diferentes golpes de arco) podem resultar em diferentes formas de envelope, e portanto em diferentes características sonoras.O envelope de amplitude, isto é, a maneira em que a amplitude de um som varia no tempo, é pois muito importante no modo como percebemos diferentes sons.
Helmholtz descobriu também que sons que evocam um sensação definida de altura correspondem a ondas periódicas (ou seja ondas que sempre se repetem em um certo período de tempo). Ele estabeleceu que a forma dessas ondas tem grande influência no timbre percebido de um som. Para relacionar melhor a maneira em que forma de onda e timbre se relacionam, ele usou o legado teórico de Fourier, já citado acima, que provava que qualquer onda periódica pode ser decomposta em um conjunto único de componentes senoidais. Portanto qualquer forma de onda pode ser descrita em termos de suas componentes senoidais, e cada componente senoidal será caracterizada por três parâmetros: freqüência, amplitude e fase relativa à fundamental. Os dois primeiros parâmetros têm uma grande importância para a definição do timbre, enquanto as relações de fase têm um efeito menor na percepção do timbre. Foi mostrado anteriormente que um som então pode ter duas representações: a da onda (de pressão), amplitude X tempo; e a do espectro, amplitude X freqüência, onde podemos observar as componentes senoidais de um som.

A conclusão de Helmholtz foi de que o espectro tem uma correlação muito simples com as qualidades timbíisticas do som. Por exemplo, a descrição qualitativa de um som brilhante correlaciona-se com espectros que possuem muita energia nas freqüências altas, ou seja componentes agudas com amplitudes bem significativas. Sons com harmônicos pares faltando são auditivamente relacionados com aqueles do clarinete. A maioria dos sons percussivos têm espectros que não são harmônicos (ou seja fora das relações de números inteiros), como por exemplo, os sinos, que possuem um espectro altamente inharmônico. Alguns instrumentos possuem harmônicos levemente "desafinados", o que contribue para a riqueza de certos timbres, como o piano.

Parte II

1. Introdução à Psicoacústica

Psicoacústica é o estudo de como os seres humanos percebem o fenômeno sonoro. Aqui o interesse é a resposta subjetiva ao som em termos de sua altura, volume, duração, timbre e posição aparente. As categorias do estudo da psicoacústica não são estanques, pois existe considerável interdependência entre elas. Por exemplo, a nossa sensação de altura é dependente do tempo, e nossa percepção de volume varia consideravelmente com a freqüência e o timbre.

É importante que se note que a maioria dos resultados obtidos no estudo da psicoacústica têm sido colhidos experimentalmente. Tais resultados são inferidos de testes em situações cuidadosamente preparadas, com um grupo de ouvintes, cujas respostas a estímulos sonoros são monitoradas e analisadas. Estes experimentos são geralmente baseados em comparação de dois sons diferentes, por meio de uma escala subjetiva de valores. Os ouvintes são questionados sobre o que ouviram, por exemplo, em termos de "mais alto" ou "mais brilhante", etc.. Muitas das descobertas da psicoacústica ainda residem no plano experimental, pois razões físicas ou anatômicas sobre a sua causa ainda não são conhecidas. No entanto os dados apresentados pela psicoacústica são muito importantes para o entendimento da relação entre a percepção humana e o ambiente sonoro que a envolve.

2. A anatomia do ouvido

O *ouvido externo* é composto pela orelha, que é um orgão especializado em concentrar as ondas sonoras na cavidade do ouvido, e pelo canal auditivo. Este é um tubo de mais ou menos 3 cm de comprimento, fechado na parte interna pelo tímpano. Na parte interna deste está o que chamamos de *ouvido médio*, que é conectado ao fundo da garganta pelo tubo de eustáquio para que as mudanças na pressão atmosférica sejam equalizadas dos dois lados do tímpano e não causem distorção na atuação deste. O ouvido médio é composto de três ossículos: o martelo, a bigorna e o estribo, conectados como na figura 1, acima. Estas conexões não são rígidas. O martelo é conectado ao tímpano para se mover com ele. Do outro lado, o estribo está conectado a uma membrana chamada janela oval.

O *ouvido interno* é a porção do ouvido que está além da janela oval. Consiste em parte de uma cavidade na estrutura óssea do crânio, chamada cóclea, cuja forma lembra um caracol, com quase três voltas. A cóclea, que na fig.1 é mostrada estendida para melhor visualização, é preenchida por um fluído incompressível chamado perilinfa, e dividida ao meio em sua largura por uma repartição chamada mebrana basilar. Esta então forma dois compartimentos longos, um dos quais é ligado aos ossículos do ouvido médio pela janela oval. O outro compartimendo é separado do ouvido médio pela janela circular. Os dois compartimentos estão interconectados por uma pequena abertura na membrana basilar no final de sua extensão, na extremidade da cóclea que é chamada de ápice. A outra extremidade deste orgão, conectada ao ouvido médio é chamada de base. Milhares de conexões nervosas estão ligadas à membrana basilar, que, recebendo os distúrbios mecânicos, transmitem informação ao cerébro. O conjunto de células que respondem aos estímulos mecânicos da membrana basilar, transformando-os em impulsos nervosos é chamado de orgão de corti. A figura abaixo exemplifica a anatomia do ouvido (Backus, 1969):

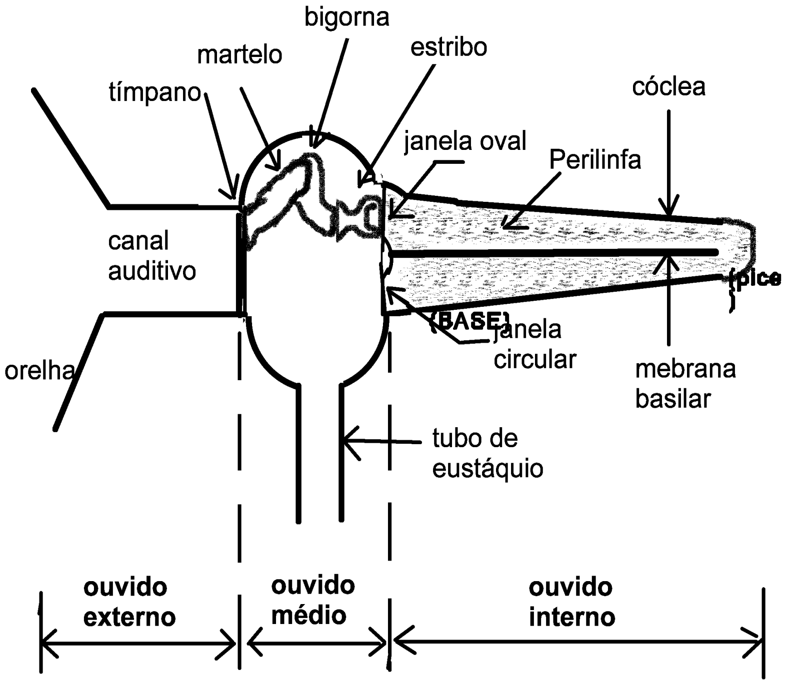


Diagrama esquemático do ouvido,
c/ a cóclea desenrolada.

2.1 O ouvido externo.

A orelha tem a função de acentuar certas freqüências e nos ajudar a localizar as fontes sonoras. A sua forma ajuda o ouvido a perceber se o som está a frente ou atrás do ouvinte com boa acuidade, e também acima ou abaixo (com menor precisão). O ouvido externo como um todo ajuda a modificar o som que o penetra, devido a efeitos de ressonância, principalmente do canal auditivo, cuja freqüência de ressonância é por volta de 4KHz. A membrana do tímpano é fina e elástica, formando a divisão entre ouvido externo e ouvido médio. Ela converte as variações de pressão do ar, que constituem as ondas sonoras, em vibrações mecânicas no ouvido médio.

2.2 O ouvido médio.

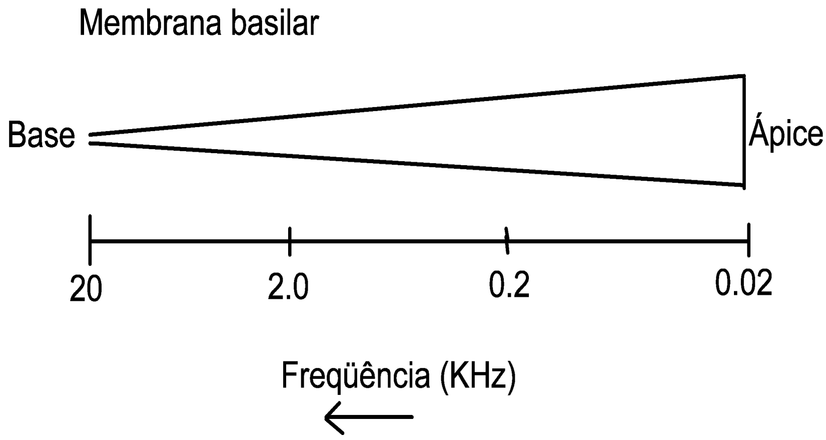
Os ossículos do ouvido médio formam um conjunto único, móvel, que transmite a energia aplicada no tímpano para a cóclea, o ouvido interno. As suas funções são duas: 1) transmitir os movimentos do tímpano sem perda de energia; 2) proteger o sistema auditivo dos efeitos danosos de sons muito altos.

Os ossículos agem na transformação da impedância acústica do sinal que entra no ouvido. Isto é necessário pela diferença entre os meio externo (o ar) e o meio líquido do ouvido interno, e conseqüentemente, diferentes resistências a propagação da onda. A resistência do fluído do ouvido interno é mais alta que aquela do ar, por isso os ossículos têm que atuar como conversores de impedância. Isso é realizado devido a dois fatores que atuam no processo: o efeito alavanca entre o martelo e a bigorna, devido ao seu arranjo espacial; e a diferença entre as áreas do tímpano e da parte do estribo que está em contato com a janela oval, o que concentra a energia imposta no sistema. Esse efeito tende a resultar, para o ouvido interno, em uma aumento de 30 dB entre os níveis de pressão sonora no tímpano e na janela oval.

A segunda função do ouvido interno é realizada pelos músculos que se unem ao tímpano e ao estribo. Sons com níveis de pressão sonora acima de 75 dB SPL fazem com que esses músculos se contraiam automaticamente em resposta aos sons, enrijecendo o sistema e fazendo com que a transmissão de energia não seja muito eficiente. Isso atua como uma proteção do ouvido a sons muito altos. Aproximadamente 12 a 14dB de atenuação são conseguidos, mas esses valores são para sons abaixo de 1 Khz somente. Este efeito é conhecido com *reflexo acústico*. Ele não é imediato, pois leva de 60 a 120 ms para entrar em funcionamento, por isso o ouvido não está protegido para sons muito impulsivos (como por exemplo, o som de uma arma de fogo)

2.3 O ouvido interno.

A cóclea tem a forma de um caracol, uma estrutura rígida e é preenchida por um líquido incompressível. As vibrações transmitidas através do ouvido médio são recebidas pela janela oval, e deslocam-se através do fluído. A janela circular existe para compensar o deslocamento da janela oval. A membrana basilar é responsável pelo processo de percepção do som, perfazendo uma análise das freqüências componentes de um som. Diferentes partes da membrana basilar são sensíveis a diferentes freqüências puras. Sabe-se que a extremidade da membrana basilar que é próxima à base da cóclea é mais fina e estreita, sendo também sensível às freqüências mais altas do espectro percebido pelos humanos. A membrana basilar torna-se mais grossa e mais larga ao longo de sua extensão em direção ao ápice da cóclea, sendo sensível às freqüências mais graves, de acordo com a figura 2 abaixo. As diferentes freqüências puras assim causam deslocamentos em diferentes partes da membrana basilar, que são então correspondentes aos diferentes pontos do espectro, por isso dizemos que o ouvido faz uma análise de freqüências componentes dos sons. O fato de que a membrana basilar é excitada em diferentes pontos por freqüências é a base da teoria tópica da percepção de alturas.



Para que os movimentos da membrana basilar sejam transmitidos para o cérebro, eles devem ser transformados em impulsos nervosos. Este processo é feito pelas células do orgão de corti, que são pequenas células em forma de pêlos que disparam impulsos quando são dobradas pela ação do deslocamento da membrana basilar. Estes impulsos então são transmitidos pelos nervos conectados a essas células.

3 A percepção de alturas: bandas críticas.

Já sabemos que o som que entra o ouvido interno é analisado pela membrana basilar, causando deslocamentos em determinados pontos de sua extensão. O importante agora é saber qual a acuracidade do ouvido para componentes individuais de freqüência (isto é, parciais senoidais do som), o quão precisa é a percepção destes. O deslocamento causado por um som individual em um local da membrana basilar espalha-se para os dois lados desse ponto. A precisão que o ouvido terá em perceber dois sons como separados é relacionada com esse fato: se dois picos claramente separados forem criados pelos dois sons que entram, ouviremos dois sons separados.

Suponha-se que dois sons puros A e B, com freqüências FA e FB, e amplitudes AA e AB são tocados juntos. Mantendo-se FA fixa, e variando FB desde o uníssono com FA para cima e para baixo, o seguinte geralmente é ouvido:

a) Quando FA = FB (uníssono), uma nota só é ouvida.

b) Quando aumentamos (ou diminuimos) a freqüência FB, ouvimos uma variação periódica de amplitude, que chamamos de batimentos. A freqüência desses batimentos é igual a FB - FA, se FB > FA , ou FA - FB, se FA > FB. A amplitude vai variar entre (AA + AB) e (AA - AB), no primeiro caso, ou entre (AB + AA) e (AB - AA), no segundo. Note-se que se as amplitudes são iguais, a amplitude do som resultante vai variar entre 0 e 2A. A altura da nota percebida vai ser equivalente a média das freqüências envolvidas, (FA+FB)/2. Para a maioria dos ouvintes, essa sensação de batimento desaparece quando a separação dos sons ultrapassa 12.5 Hz.

c) Assim que a separação é maior que 15Hz, temos uma sensação de um som fundido, com uma característica áspera.

d) Aumentando ainda mais a diferença, passamos a perceber os sons separadamente, mas ainda com uma sensação áspera.

e) Finalmente, se aumentarmos suficientemente a separação dos sons, a sensação passará de áspera para suave.

Não existe uma definição exata de onde os sons passam de fundidos para separados e também onde eles causam a mudança de uma sensação de aspereza para uma de suavidade. O ponto onde dois sons são ouvidos como separados pode ser pensado como o ponto onde dois picos separados de deslocamento são gerados na membrana basilar, em oposição a um só deslocamento. Nesse ponto, os picos ainda estão juntos o suficiente para interferir entre si, causando a sensação de aspereza. O ponto em que a sensação passa de áspera para suave é aquele em que os dois picos estão separados o suficiente para que não haja interferência entre eles. Esse ponto marca um extremo daquilo que chamamos *banda crítica*.

A banda crítica é uma faixa de freqüências acima e abaixo de uma certa freqüência de um som puro que interferirá na percepção de outro som, se a freqüência deste estiver dentro daquela faixa.
A banda crítica não é a mesma para todas as regiões de freqüências do espectro: ela é maior (mais larga) na região grave e mais estreita na região aguda. Em por volta de 100Hz, ela é de 7 semitons, descendo para abaixo de 4 semitons para sons acima de 200Hz, e diminuindo para um
mínimo de 2 semitons a 2000Hz. Por essa razão algumas regras tradicionais de orquestração e harmonia determinam um espaçamento maior entre sons nos registros graves que nos registros agudos. E por outro lado, efeitos interessantes podem ser criados, justamente desobedecendo essa regra. Tudo isso tira vantagem de características de nosso mecanismo de percepção de alturas.

4 Consonância e dissonância.

A base psicoacústica para a percepção de dois sons como dissonantes ou não é relacionada com a nossa discussão a respeito das bandas críticas. O padrão estabelecido para a consonância ou dissonância de dois sons senoidais é:

a) Quando suas freqüências são iguais, sons são consonantes perfeitos.

b) Quando suas freqüências são separadas por mais de uma banda crítica, são consonantes.

c) Quando suas freqüências são separadas por valores entre 5% e 50% da banda crítica, o intervalo é dissonante.

d) A maior dissonância ocorre quando o intervalo entre esses sons é 1/4 de banda crítica.

Poucos instrumentos musicais alguma vez produzem ondas senoidais, mas os resultados acima podem ser usados para avaliar a consonância de intervalos em sons complexos. Para estes, cada harmônico até por volta do sétimo contribue para a percepção geral de consonância ou dissonância do intervalo. Potanto podemos medir a consonância geral de dois sons, com base na contribuição de cada harmônico até o sétimo.

Exemplos:

1) Grau de consonância de duas notas em intervalo de quinta (3:2), a freqüência fundamental da nota inferior sendo igual a 220 Hz (Howard & Angus, 1995).
2)

Primeiros sete harmônicos da nota mais grave	Harmônicos da nota mais aguda	Diferença de freqüências	Freqüência média	Banda Crítica da freqüência média	Metade da Banda Crítica da freqüência média	CONSONANTE consonante dissonante DISSONANTE
220						
440	330	110	385	65	32.5	consonante
660	660	0	Uníssono			CONSONANTE
880						
1100	990	110	1045	133	66.5	dissonante
1320	1320	0	Uníssono			CONSONANTE
1540	1650	110	1595	193.3	96.7	dissonante

Para o exemplo acima, consideramos que se os harmônicos mais próximos estão em uníssono, eles são CONSONANTES. Se estão separados por mais de uma banda crítica (ou seja se estão fora da banda crítica de uma freqüência média entre eles), são consonantes. Se estão dentro da banda crítica da freqüência média, mas fora da metade dessa banda crítica, são dissonantes. Se estão dentro da metade da banda crítica da freqüência média, são DISSONANTES. Como resultado dessas considerações, o intervalo de quinta tem uma quantidade maior de consonâncias que dissonâncias, e pode ser considerado consonante. E como complemento, abaixo é mostrado como o intervalo de segunda pode ser considerado dissonante.

2) Grau de consonância de duas notas em intervalo de tom (9:8), a freqüência fundamental da nota inferior sendo igual a 220 Hz (Howard & Angus, 1995).

Primeiros sete harmônicos da nota mais grave	Harmônicos da nota mais aguda	Diferença de freqüências	Freqüência média	Banda Crítica da freqüência média	Metade da Banda Crítica da freqüência média	CONSONANTE consonante dissonante DISSONANTE
220	247.5	27.5	234	50.7	25.4	dissonante
440	495	55	477	74.7	32.5	dissonante

660	742.5	82.5	701	97.1	48.6	dissonante
880						
1100	990	110	1050	133	66.5	dissonante
1320	1237.5	82.5	1280	158	79.1	dissonante
1540	1485	55	1510	184	92	DISSONANTE

5 A percepção de amplitudes e alturas: as gamas de sensibilidade à pressão e freqüências.

Diz-se que o ouvido humano possue em geral, uma sensibilidade em freqüências de 20 a 20K Hz. Se observarmos atentamente, veremos que existe uma variação muito grande entre indivíduos. A capacidade de percepção de freqüências muda com o processo do envelhecimento. Por exemplo, uma criança saudável possue o limiar agudo de 20 KHz, que pela idade de 20 anos pode ter caído para por volta de 16 Khz, e até a 8000 Hz, ao final da vida.

A sensibilidade do ouvido a sons de diferentes freqüências varia em um gama muito grande de valores de pressão. Em geral o som mais baixo que se pode ouvir por volta de 4000 Hz é aproximadamente 10 micropascais, e o som mais alto, antes do limiar da dor é equivalente a 20 Pascais. Essa gama, entre o som mais baixo e o som mais alto, é equivalente a um número muito grande: 2 000 000. Por essas razões,e pelo fato de que percebemos os sons logaritmicamente, é que usamos a escala de decibeis, e se calcularmos o nivel de pressão sonora com relação ao limiar da audição, teremos então um gama de 120 dB, entre o som mais baixo e o som mais alto.
Esta variação, de 0 a 120, é mais conveniente para ser usada.

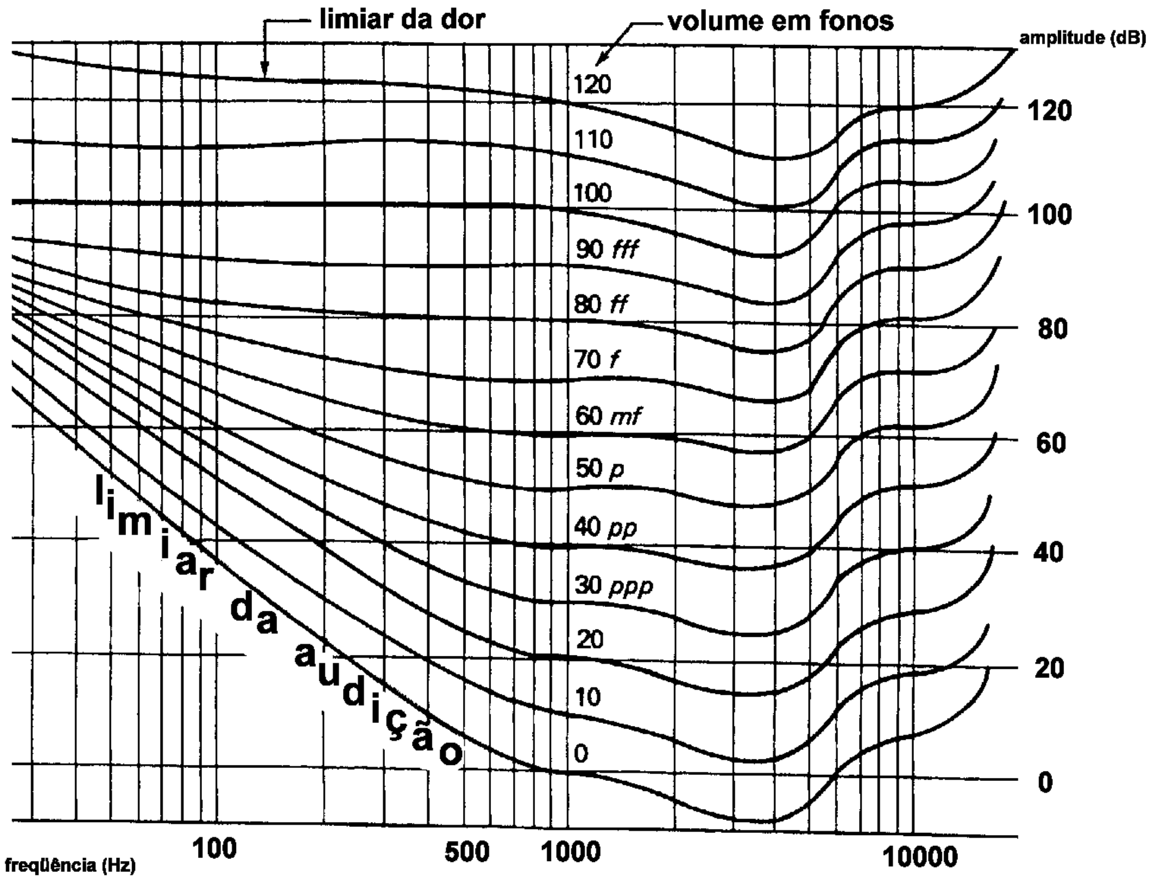
O limiar de audição varia com a freqüência. O ouvido é muito mais sensível na sua região média, que aos seus extremos. Já o limiar da dor é constante para todas as freqüências. Por isso, a gama completa de 120 dB entre o som mais baixo e o mais alto só ocorre em uma pequena porção do espectro.

6 A percepção de volume e as curvas de Fletcher-Munson

Embora o volume que percebemos está correlacionado com a amplitude de pressão de uma onda sonora, a relação entre estes dois parâmetros é mais complexa. Como um efeito psicoacústico, o volume é afetado tanto pela natureza como pelo contexto dos sons. Outra dificuldade nas medidas de volume é ofato de que elas são dependentes da interpretação individual de cada pessoa.

A amplitude de pressão não nos dá um valor direto do volume percebido. De fato, é possível que uma onda com maior amplitude de pressão ser percebida como tendo menor volume que uma onda com maior amplitude. Na verdade, a sensibilidade ao volume do ouvido varia com a freqüência. Em 1933, dois pesquisadores, Fletcher e Munson, mediram a sensibilidade do ouvido humano a diferentes

freqüências puras (senoidais), e estabeleceram a relação entre freqüências, amplitudes e o volume percebido. Essas curvas mostram o quão alto um som deve ser em termos de medida de amplitude de pressão para ter o mesmo volume de um som de 1 KHz.Estas curvas
mostram o quanto varia a sesnsibilidade do ouvido ao longo do espectro de nossa audição.



A percepção de volume segundo Fletcher-Munson

As curvas mostram algumas características de nossa audição que são importantes de se observar:

a) Existem alguns picos de sensibilidade acima de 1 KHz . Isso é devido aos efeitos de ressonância do canal auditivo, que é um tubo de cerca de 25 mm, com um lado aberto e outro fechado, o que resulta em um o pico de ressonância por volta de 3.4 KHz , e devido à sua forma regular, um outro pico menor a 13 KHz . O efeito dessas ressonâncias é aumentar a sensibilidade do ouvido àquelas freqüências.

b) O segundo ponto a ser notado é que existe uma dependência de amplitude na sensibilidade do ouvido. Isto é devido a maneira em que o ouvido atua como transdutor e interpretador do som, e como resultado a resposta a freqüências é dependente da amplitude. Este efeito é particularmente notável em baixas freqüências, onde quanto menor a amplitude menos sensível é o ouvido.

O resultado desses efeitos é que a sensibilidade do ouvido é função tanto da freqüência quanto da amplitude. Portanto, dois sons de diferentes freqüências, mas de amplitudes iguais podem soar com volumes completamente diferentes. Por exemplo, um som a 20 Hz soará com muito menos volume que um de mesma amplitude a 4 K Hz. Sons de diferentes freqüências então deverão ter amplitudes de pressão diferentes para serem percebidos como tendo a mesma amplitude.

O volume percebido de sons senoidais, como função da freqüência e do nível de pressão sonora é dado pela escala de *FONOS*. Trata-se de um a escala de julgamentos subjetivos baseada nos níveis de pressão sonora percebidos em um som senoidal de 1 KHz. Então a curva para N *fonos* intersecta a freqüência de 1 KHz em N dB SPL, por definição. Pode-se notar que as curvas de *fonos* começam a ficar mais planas em níveis de pressão sonora mais altos. Por isso, o relativo balanço entre as diferentes regiões de freqüências, grave, médio e agudo, é alterado sempre que se varia o nível de amplitude dos sons. Isso é percebido no dia a dia, quando ouvimos uma gravação e abaixamos o volume do aparelho de som, resultando na supressão de parte dos agudos e dos graves, e com isso ficamos com um som carregado de médios, sem muito brilho ou expressão.

7 Localização auditória

Localização auditória é a percepção humana da posição de uma fonte sonora no espaço. O ouvinte recebe informações que definem a direção e distância da fonte. Para determinar a direção da fonte, o ouvinte utiliza-se de pistas que lhes são dadas pelas diferenças em tempo e intensidade na audição estereofônica. Para a determinação da distância, tanto a qualidade timbrística do som, quanto a sua intensidade vão ser fatores influentes, além da questão da reverberação

7.1 Diferença Interaural de Tempo (DIT)

A diferença de tempo em que um som leva para atingir um ouvido após o outro dá ao ouvinte uma pista com relação à direção angular da fonte sonora, e essa diferença é chamada *diferença interaural de tempo*. Se a fonte está a frente ou atrás do ouvinte, a DIT é zero, se o ângulo da fonte está mais que um grau fora de centro, temos uma DIT acima de 20 microsegundos, e a direção do som consegue ser percebida. As pistas dadas pela DIT começam aficar imprecisas à medida em que a fonte se move para uma posição lateral ao ouvinte.

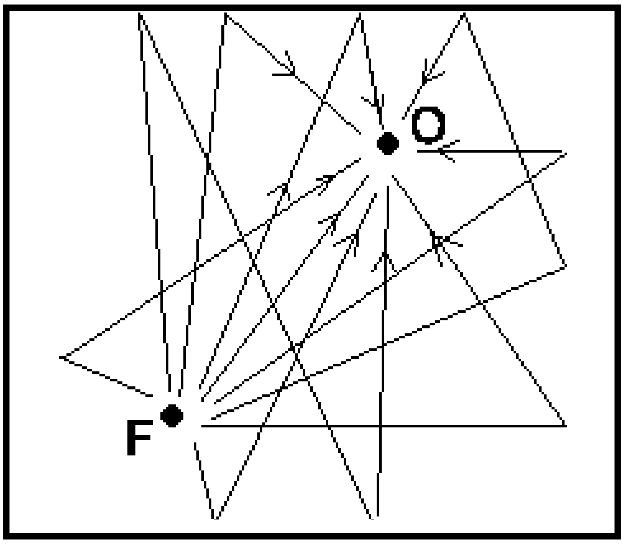
7.2 Diferença Interaural de Intensidade (DII)

A *diferença interaural de intensidade* acontece quando a fonte sonora não está centrada com relação à cabeça do ouvinte, e esta parcialmente desvia uma porção do som destinada ao ouvido oposto à fonte, jogando uma sombra que diminue a intensidade percebida por aquele ouvido. Além disso, o ouvido externo perfaz uma filtragem nas freqüências abaixo de 5KHz. A reposta de amplitude dessa filtragem varia com a direção em que o som chega ao ouvinte, ajudando a definir se o som vem de frente, de trás, de cima ou de baixo.

Tanto a DII quanto a DIT dependem da distribuição espectral das freqüências de um som. Abaixo de 270 Hz, nenhuma dessas pistas é efetiva para a localização auditória, portanto a direção dos sons de baixa freqüência não pode ser determinada. As informações dadas pela DIT funcionam bem entre 270 e 500 Hz, mas são inefetivas acima de 1400Hz, já a DII atua bem acima de 500Hz e seu efeito cresce com a freqüência, de modo que a 6KHz, a diferença de intensidade pode chegar a 20 dB para um som lateral. Na região entre 500 e 1400 Hz as informações dadas pelas DII e DIT relacionam-se de uma maneira complexa. Em geral, no caso de sons naturais, as pistas dadas por elas correlacionam-se bem, o que não é o caso de sons de fonte eletrônica.

8 Reverberação natural

Reveberação natural é produzida pelas reflexões de sons em superfícies, que dispersam o som, enriquecendo-o por sobreposição de suas reflexões. A quantidade e qualidade da reverberação que ocorre em um ambiente natural é influenciada por vários fatores, o volume e dimensões do espaço; o tipo, forma e número de superfícies com que o som se encontra. A figura abaixo mostra uma situação hipotética, uma sala sem móveis e com paredes perfeitamente lisas e sólidas. Energia acústica proveniente da fonte (F) espalha-se por todas as direções, e apenas uma pequena porção do som chega ao ouvinte (O). Ele também recebe várias imagens atrasadas do som original,



refletidas pelas superfícies, que também aumentam o tempo em que o som é percebido. A amplitude de cada som é reduzida por uma quantidade que é inversamente proporcional à distância percorrida pelo som: as reflexões não só chegam mais tarde, como também possuem amplitudes menores que o som direto. O som reverberado terá um envelope que decai ao longo do tempo.

A caracterização da reverberação natural de uma sala é uma tarefa complexa, pois a qualidade de reverberação não pode ser quantificada objetivamente. Quatro parâmetros são normalmente correlacionados com o caráter percebido da reverberação: tempo de reverberação, a dependência de freqüências do tempo de reverberação, o atraso da chegada da primeira reflexão e a taxa de crescimento da densidade de eco.

8.1 Tempo de reverberação

Indica a quantidade de tempo requerida para um som morrer a 1/1000 (-60 dB) de sua amplitude, após a fonte parar de emiti-lo. Isso não quer dizer diretamente a medida de tempo em que um ouvinte vai parar de ouvir um som após sua fonte silenciar, mas sim uma medida que é proporcional a isso. Esse fato depende muito em outros fatores, como a amplitude do som e a presença de outros sons. Se o tempo de reverberação é o suficientemente grande, o som sobrepor-se-á as suas reflexões criando uma textura densa. Estudos identificaram uma correlação entre o volume de uma sala e o seu tempo de reverberação: quanto maior o volume da sala, maior tende a ser o seu tempo de reverberação. A quantidade de superfícies absorventes ou refletivas também influenciará o tempo de reverberação.

8.2 Dependência de freqüência

O tempo de reveberação não é uniforme através do espectro de freqüências. É mais ou menos definido que, em uma sala de concertos bem desenhada, as freqüências baixas são favorecidas, estas vão desaparecer mais lentamente que as altas. Sabe-se que materiais absorventes tendem a refletir freqüências baixas mais que as altas, e materiais altamente refletivos tendem a ter uma resposta mais igual ao longo do espectro. O vapor de ar também contribue para a atenuação de sons com alta freqüência, quanto mais um som viajar em um ar com alguma umidade, mais suas freqüências altas serão atenuadas.

8.3 O atraso da primeira reflexão

Essa quantidade afeta muito a qualidade da reverberação percebida. Se a diferença de tempo entre o som direto e a sua primeira reflexão for muito grande (> 50 msegs), então se ouvirá ecos distintos. Se o atraso for pequeno (< 5 msegs) o ouvinte terá impressão de uma sala pequena. Uma diferença de 10 a 20 msegs é achada em boas salas de concerto.

8.4 O crescimento da densidade de ecos

Após a primeira reflexão, a densidade de ecos tende a crescer rapidamente. Um ouvinte pode distinguir densidades de eco até o patamar de 1 eco/msegs. O tempo que o som leva para chegar a esse patamar influencia o caráter da reverberação, em uma boa situação ele é por volta de 100 msegs. Esse tempo é mais ou menos proporcional à raiz quadrada do volume da sala, portanto espaços pequenos são caracterizados por um rápido crescimento da densidade de ecos.

8.5 Distância

O ouvinte geralmente recebe tanto sons diretos da fonte como imagens refletidas atrasadas do som original. A intensidade relativa dos sons diretos e suas reflexões é a informação primária sobre a distância em que a fonte sonora se encontra. Sons mais próximos possuem uma razão grande entre o som direto e suas reverberação, com o crescimento da distância, a quantidade de som direto diminui.

Em distâncias muito grandes, muito pouco do som é percebido diretamente. Uma pista adicional em distâncias grandes é a perda de componentes de pouca energia em um som, na maioria dos casos isso resulta na ausência de componentes de alta freqüência. Pelo fato de reverberação ser usada para a estimativa de distâncias, sons impulsivos e curtos são mais facilmente localizados, enquanto sons longos são mais difíceis (também pelo fato de que o ouvido estima a distância quase apenas durante o tempo de ataque de um som).

9. Sistemas de afinação

Historicamente, as diversas culturas desenvolveram os seus próprios conceitos e regras para a organização dos sons e alturas. O conceito de escala é comum à várias culturas: a organização das alturas do contínuo em 'pontos discretos'. em uma certa proporção lógica. Em nossa cultura, o ponto de partida para o desenvolvimento de nossas escalas e para a base teórica foi dado na Grécia Antiga. Pitágoras estudou os modos de vibração de uma corda estendida e descobriu a relação matemática entre os harmônicos. Os primeiros sistemas de afinação foram baseados nos fenômenos relacionados coma série harmônica. Eles baseavam a relação das alturas nas razões dos diversos intervalos obtidas na série harmônica

O sistema *pitagórico* basea-se nos intervalos de quinta e quarta, ou seja nas relações justas dadas pelos primeiros quatro sons da série harmônica, fundamental (1), oitava (2), quinta (3) e a 2ª oitava (4). Com estes sons podemos obter os seguintes intervalos perfeitos: oitava (2:1), quinta
(3:2) e quarta (4:3). Neste sistema, partindo-se do Dó, acha-se a quinta acima, 3:2 vezes a freqüência do dó, que é a nota Sol; depois, acha-se o Ré, quarta baixo deste sol, 3:4 vezes aquela freqüência; e assim por diante, achando o Lá, o Mi e o Si. Para se achar o Fá, pode-se partir do Dó oitava acima (2:1), achando-se a quinta abaixo dessa nota (2:3 vezes a freqüência daquele Dó). Para se obter a escala completa em todas as oitavas, basta repetir o esquema. Não obtemos, porém nenhum sustenido ou bemol. Quando usamos este método para se achar as 12 notas, uma coma, ou disparidade, resulta na afinação. Considere o círculo de quintas:

C G D A E B F# C# D# A# E# B#

A razão de freqüência entre dois sons adjacentes no círculo é 3:2, então **B#** pode ser representado por $(3:2)^{12}$. A relação entre o primeiro e o último som do círculo é :

$$\mathbf{(3:2)^{12} : 1 = 129.74634 : 1}$$

No entanto, a relação entre o primeiro **C** e um **C** sete oitavas acima (2^7), que deveria ser enarmônico daquele **B#**, e':

$$\mathbf{2^7 : 1 = 128 : 1}$$

Portanto aquele **B#** acaba sendo mais alto que o **C**. A disparidade é claramente audível. Ela é chamada de coma pitagórica, podendo ser demonstrada pela seguinte razão:

129.74634 / 128 = 1.01364 : 1

No sistema de afinação *Justa*, gera-se uma escala com os intervalos de terça maior e menor (5:4) e (6:5), além de quartas e quintas. Este sistema produz acordes de I, IV e V grau perfeitamente afinados (4:5:6). Como resultado, outros intervalos produzem batimentos, e as segundas do sistema são de tamanhos diferentes. Os sustenidos e bemóis são produzidos dividindo-se as segundas em dois intervalos menores. Por isso, modulação para tons com mais de 2 sustenidos ou dois bemóis de diferença torna-se impossível.

O sistema chamado *Mesotônico* (mean-tone) representa um meio-termo entre os sistemas pitagórico e justo. Resultando em quintas um pouco menores, e terças menores um pouco maiores que o pitagórico. O sistema consiste na diminuição da quinta perfeita (3:2) para 1.49533:1 . Tradicionalmente, ele inclue Dó, Fá e Sol sustenido, e Si e Mi bemol. Em modulações mais distantes, o sistema começa a quebrar. Uma das razões para isso é a chamada "quinta do lobo",formada entre Sol sustenido e Mi bemol, que é mais de 1/3 de semitom mais alta que a quinta normal, provocando um batimento audível.

O sistema de temperamento igual tenta resolver as ambiguidades dos sistemas anteriores, dividindo a oitava em 12 intervalos iguais:

oitava = 2:1 ou 2
semitom = $\mathbf{2^{1/12}}$

A expressão geral para se encontrar a razão de um intervalo no sistema temperado é:

$$\mathbf{2^{m/12}}$$

onde m é igual ao número de semitons do intervalo.

No sistema temperado igual, costuma-se usar a unidade de *centos*, para se determinar certo intervalo. Neste caso, a oitava seria correspondente a 1200 centos, e a menor subdivisão possível, o menor intervalo possível, de 1 cento seria:

$\mathbf{1:2^{1/1200} = 1:1.00005778}$

Portanto um semitom no temperamento igual possue o tamanho de 100 centos. O sistema temperado igual foi adotado no início do período clássico e possibilitou a expansão da harmonia tonal ocorrida durante o período romântico. Este sistema também possibilitou o desenvolvimento da técnica dodecafônica por Schoenberg.

A tabela abaixo mostra uma comparação entre os quatro sistemas de afinação previamente citados (Dodge & Jerse, 1985):

Temperamento igual	Pitagórico	Justo	Mean-tone

	razão	Centos	razão	centos	razão	centos	razão	Centos
Uníssono	1:1	0	1:1	0	1:1	0	1:1	0
Unis aum					1:1.055	92	1:1.045	76
2ª menor	1:1.059	100	1:1.053	90	1:1.067	112	1:1.070	117
2ª maior	1:1.122	200	1:1.125	204	1:1.125	204	1:1.118	193
3ª menor	1:1.189	300	1:1.185	294	1:1.200	316	1:1.196	310
3ª maior	1:1.260	400	1:1.265	408	1:1.250	386	1:1.250	386
4ª justa	1:1.335	500	1:1.333	498	1:1.333	498	1:1.337	503
Trítono	1:1.414	600						
4ª aum			1:1.404	588	1:1.406	590	1:1.398	580
5ª dim			1:1.424	612	1:1.422	610		
5ª justa	1:1.498	700	1:1.500	702	1:1.500	702	1:1.496	697
6ª menor	1:1.587	800	1:1.580	792	1:1.600	814	1:1.600	814
6ª maior	1:1.682	900	1:1.687	906	1:1.667	884	1:1.672	890
6ª aum					1:1.778	996	1:1.747	966
7ª menor	1:1.792	1000	1:1.778	996	1:1.800	1018	1:1.789	1007
7ª maior	1:1.888	1100	1:1.898	1109	1:1.875	1088	1:1.869	1083
Oitava	1:2	1200	1:2	1200	1:2	1200	1:2	1200

Bibliografia

Backus, John. *The Acoustical Foundations of Music***.** W W Norton, New York, 1969.
Dodge, Charles & Jerse, Thomas. *Computer Music*. Schirmer Books, New York, 1985.
Horward, David M & Angus, James. *Acoustics & Psychoacoustics***.** Focal Press, Oxford, 1995.
Moore, F Richard. *Elements of Computer Music.* Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1990.