



Musica:

Arte e Tecnologia

Jorge Kaschny e Marcos Ferreira
Vitória da Conquista (2008)



O que é o som?

- Uma onda mecânica longitudinal, ou ainda, uma “onda de pressão”.
- Alternativamente, podemos dizer, que é qualquer perturbação do meio que seja audível, ou seja, detectável pelo nosso aparelho auditivo.
- Sendo uma onda mecânica, necessita de um meio material para se propagar, tipicamente o ar.

Para ilustrar isso, talvez seja melhor observarmos o funcionamento de um alto-falante

- O cone ao se deslocar para frente comprime o ar provocando um ligeiro aumento de pressão.
- O cone ao se deslocar para trás rarefaz este ar causando uma queda de pressão.



(Clique na figura para ver a animação!)



Tal perturbação se propaga pelo meio material até chegar aos nossos ouvidos, que decodificam tais variações de pressão, gerando pulsos elétricos que são interpretados por nosso cérebro.

Tais perturbações podem ser bem pequenas, ou quase imperceptíveis.

Para ilustrar isso, observemos a animação do diapasão abaixo.



(Clique na figura para ver a animação!)

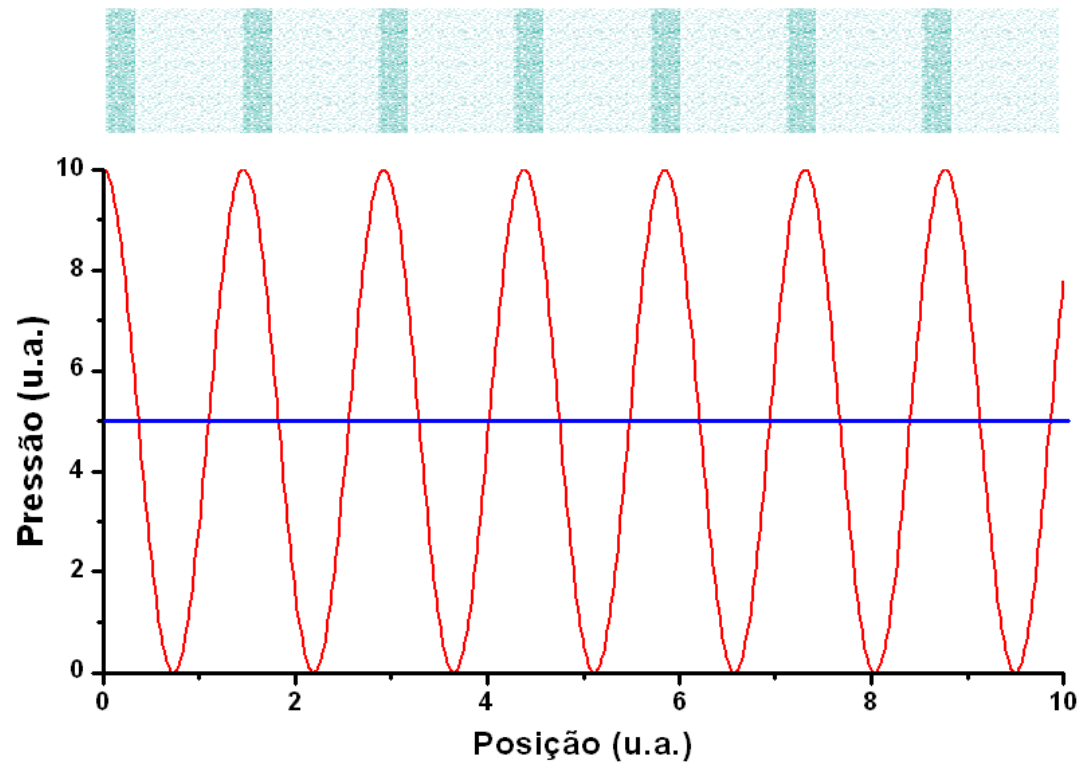
É imprescindível a presença de um meio material. De fato, a velocidade de propagação de tais perturbações depende muito da densidade do meio. No ar esta velocidade (velocidade do som) é da ordem de **340 m/s**.



Podemos ilustrar isto se imaginarmos uma onda sonora congelada em um instante de tempo fixo.

Na figura temos uma ilustração das moléculas do ar e abaixo um gráfico que mostra a pressão como função da posição. A linha azul faz referencia a pressão atmosférica normal. Toda região onde o ar esta comprimido ficaria acima desta linha. Abaixo dela temos as zonas de rarefação.

Note que esta ilustração é bastante exagerada. Na realidade tais variações são bastante sutis.





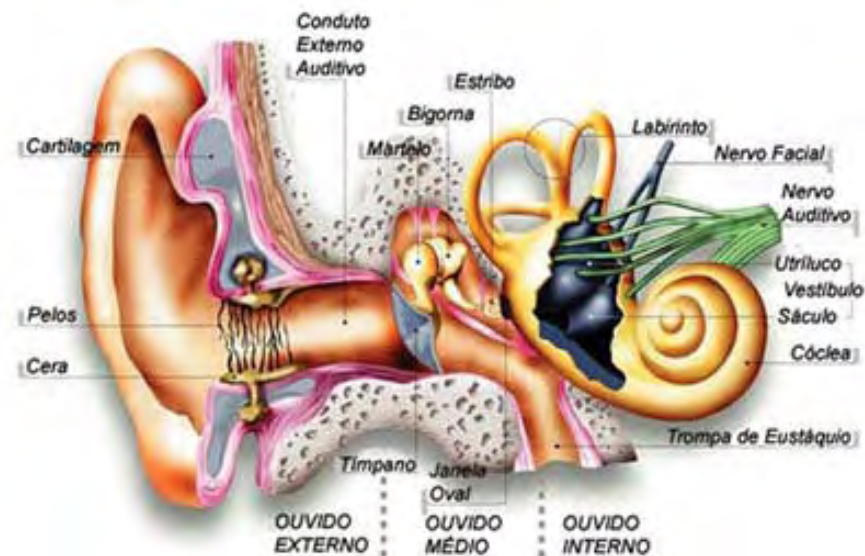
Ao descongelarmos o tempo, esta perturbação na pressão (ou densidade) viaja pelo ar (se propaga) com uma velocidade característica (≈ 340 m/s), tal como ilustrado pelo diapasão. Isto é a essência de um sinal sonoro.



(Clique na figura para ver a animação!)

Tais perturbações, finalmente chegam aos nossos ouvidos que traduzem este sinal para o nosso cérebro de maneira definitivamente espetacular.

A interpretação do significado desse sinal é feita inteiramente pelo cérebro!





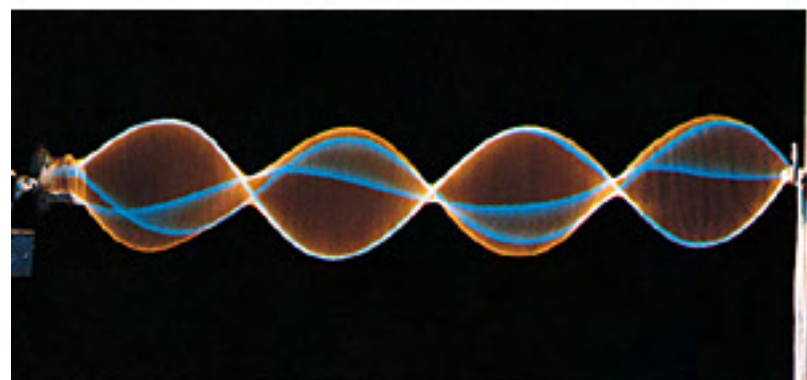
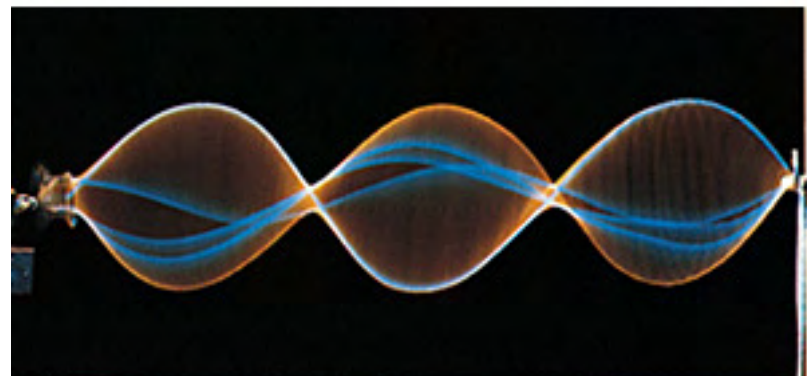
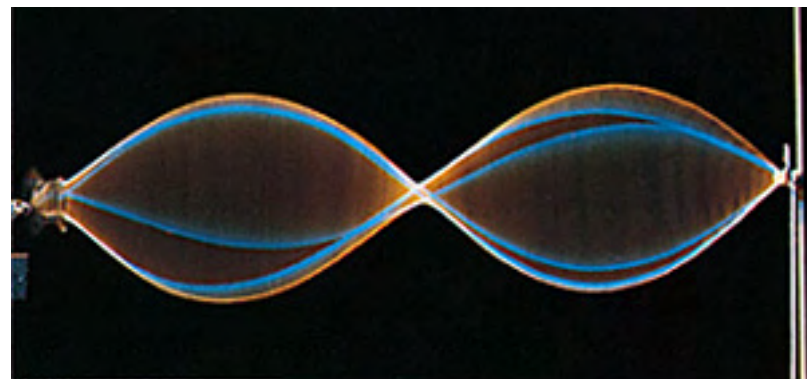
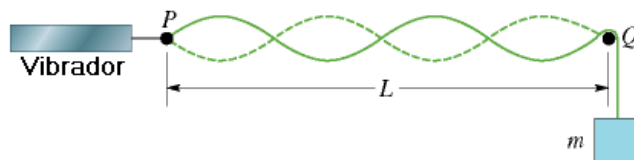
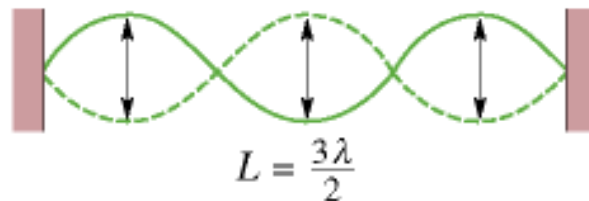
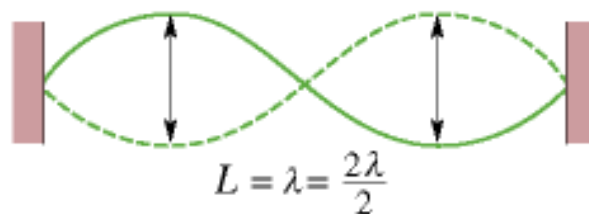
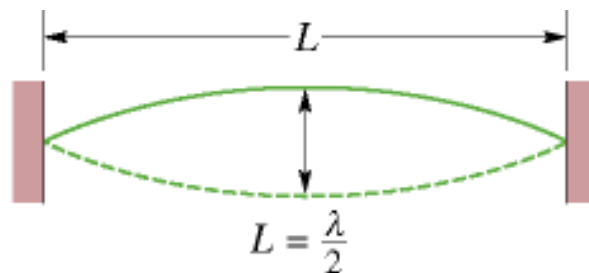
O que produz o som?

Em princípio, qualquer processo que possa provocar o surgimento de uma onda mecânica. No ar, isso significa compressões e rarefações no meio.

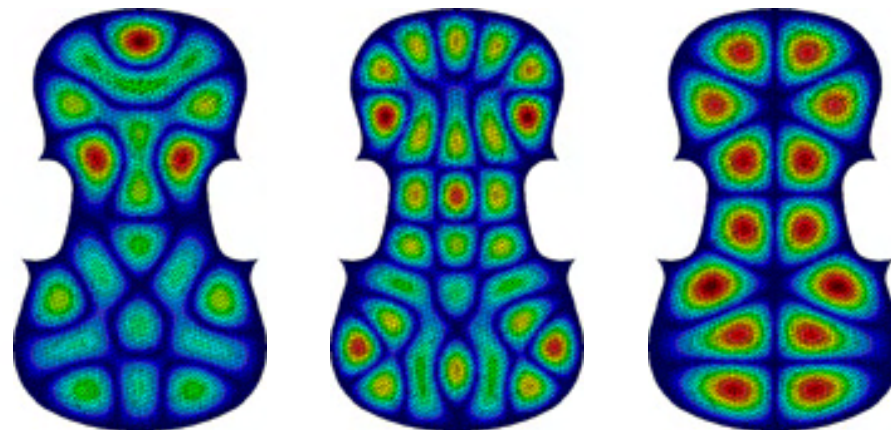
- Um objeto caindo sobre uma mesa: Neste processo, pequenas deformações plásticas, tanto no objeto como na mesa, interagem com o ar ao seu redor provocando o surgimento de uma onda sonora.
- Uma corda tencionada sendo dedilhada em um violão ou num baixo, ferida pelo arco em um violino ou numa viola, ou ainda percutida em um piano: Tais perturbações no equilíbrio mecânico da corda causam o surgimento de uma onda estacionária transversal na corda fazendo a mesma vibrar. Tal vibração interage com o ar da vizinhança causando o surgimento de uma onda sonora.
- O fluxo de ar em uma flauta, ou num tubo de um “órgão de igreja”, ou num saxofone, num oboé, num trombone, ou ainda a membrana de um tambor sendo percutida, etc

Cada instrumento (fonte sonora) possui características particularidades quanto ao processo de produção de som.

No caso de uma corda tensionada podemos facilmente visualizar a vibração da corda. Isto é ilustrado abaixo.



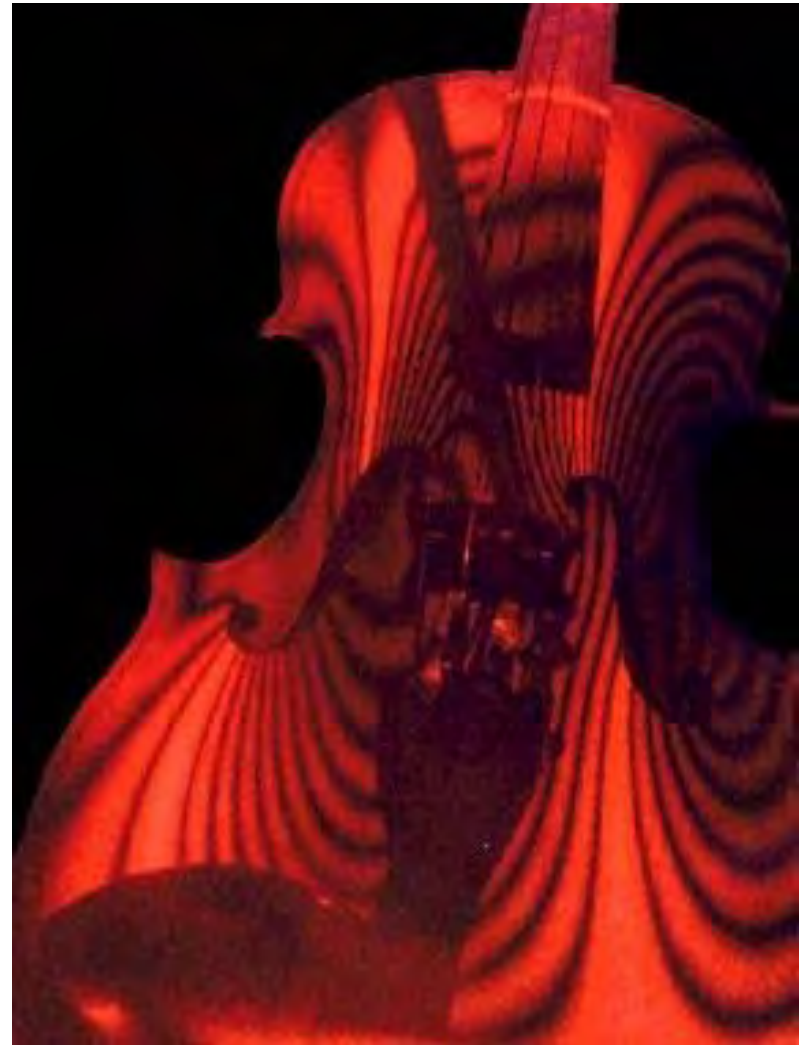
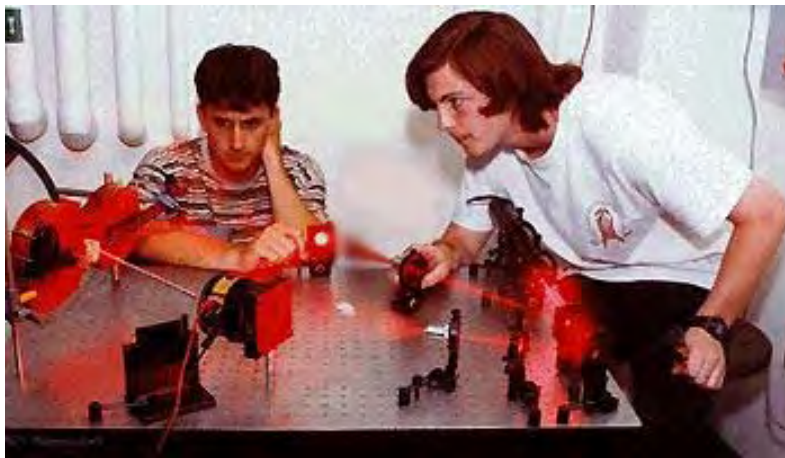
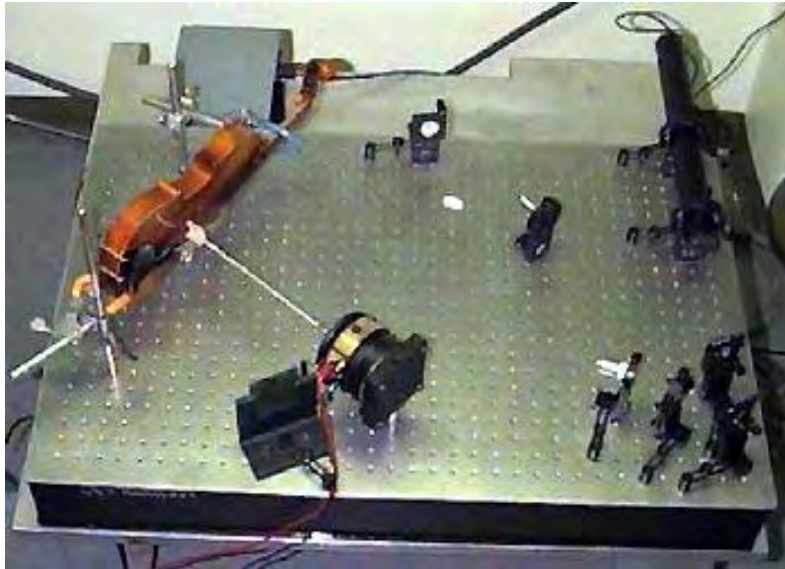
Ao mudarmos a tensão na corda ou o comprimento efetivo dela, podemos alterar significativamente as características de tais vibrações. Contudo, não é somente a corda a responsável pelo som produzido. De fato, todo o instrumento participa do processo. Por exemplo, no caso de um violino, as figuras a seguir mostram os modos de vibração na caixa do instrumento.



Simulação computacional (cor falsa).



Em termos práticos, podemos ver isso usando técnicas de holografia.

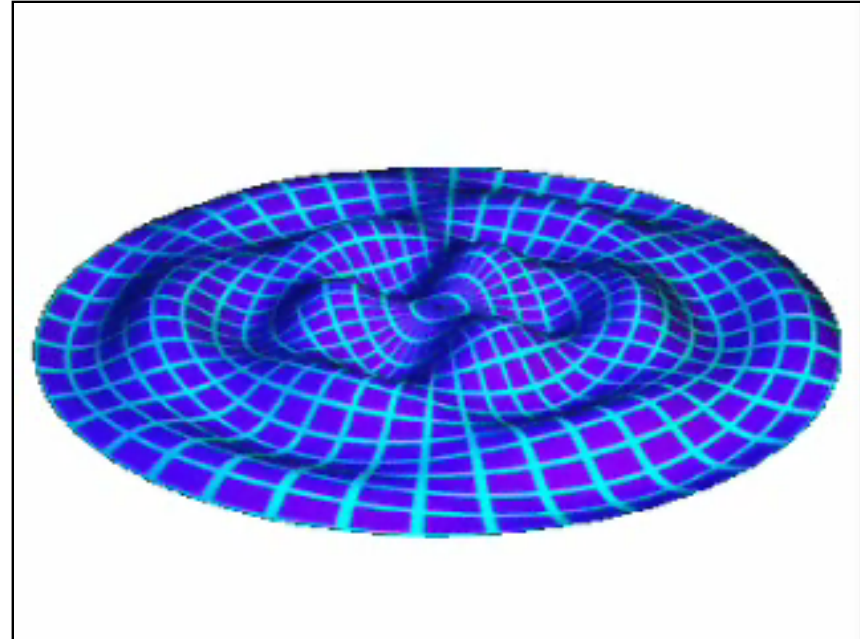


Imagens retiradas do website do Goshen College (USA).



No caso de uma membrana circular, por exemplo em um tambor, é possível vermos o processo via uma animação computacional (simulação) do processo.

Muitos dos processos de produção de som nos instrumentos musicais podem ser calculados e simulados, levando a uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos. Salienta-se que cada instrumento merece um estudo em particular que pode ser bastante complexo.



Goshen College (USA).

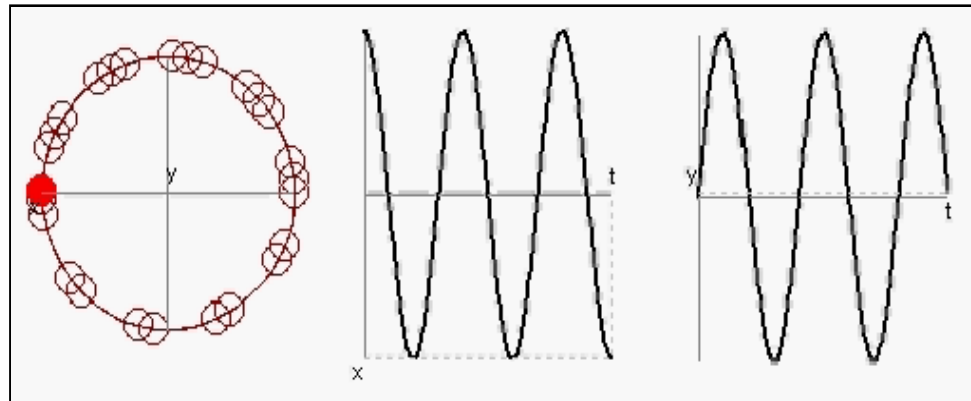
(Clique na figura para ver a animação!)

Luthier é o profissional especializado na construção e manutenção de instrumentos musicais (em Port. Liutaio ou Lutiê – a atividade Liuteria).

Em síntese, podemos ver que pequenas alterações plásticas (ou elásticas), em uma corda ou membrana, mesmo que sejam imperceptíveis a nossa visão, podem provocar perturbações no ar que são audíveis.

O que caracteriza um som?

As características de uma onda sonora são conectadas com os conceitos físicos originários da observação de Fenômenos Periódicos, tal como o Movimento Circular Uniforme (MCU) e o Movimento Harmônico Simples (MHS).



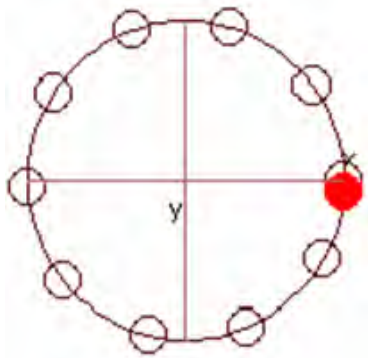
C.A. Silva e S.R. Vieira, CEFET-BA (2008)

(Clique na figura para ver a animação!)

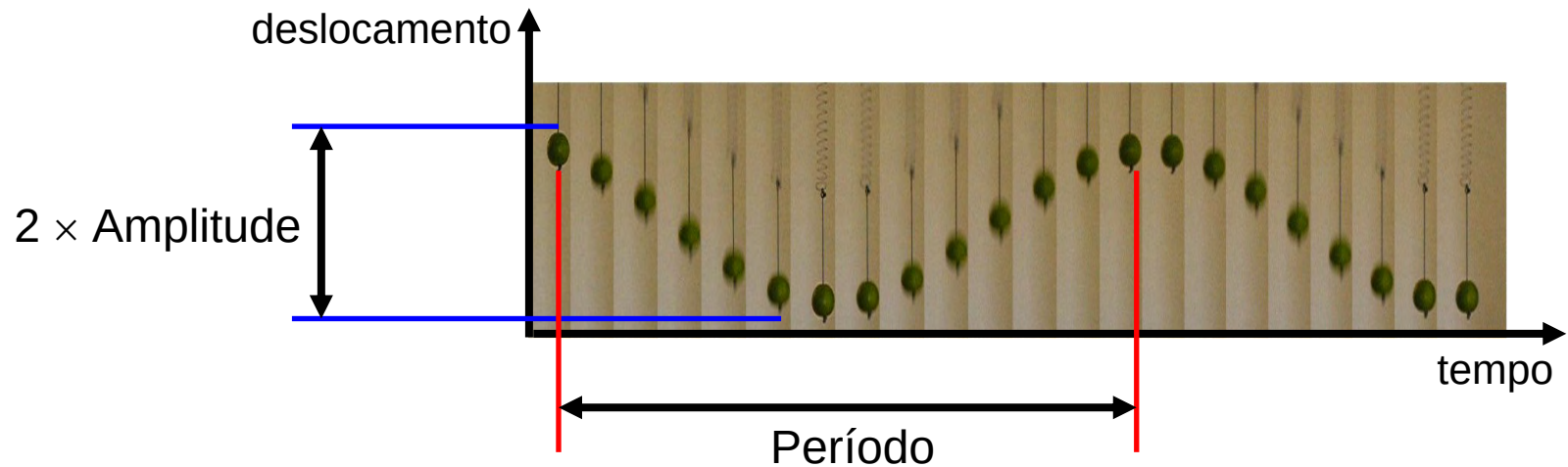
Noções Básicas: Amplitude (A) e Frequência (f).



Observando os Movimentos Circular Uniforme e Harmônico Simples, fica fácil compreendermos as noções de Amplitude e Frequência.



- A amplitude (A) corresponde ao raio do círculo.
- Frequência (f) ao número de voltas por segundo.
- O período (T) é o tempo que leva-se para efetuar uma volta, onde, $T = 1 / f \Rightarrow f = 1 / T$

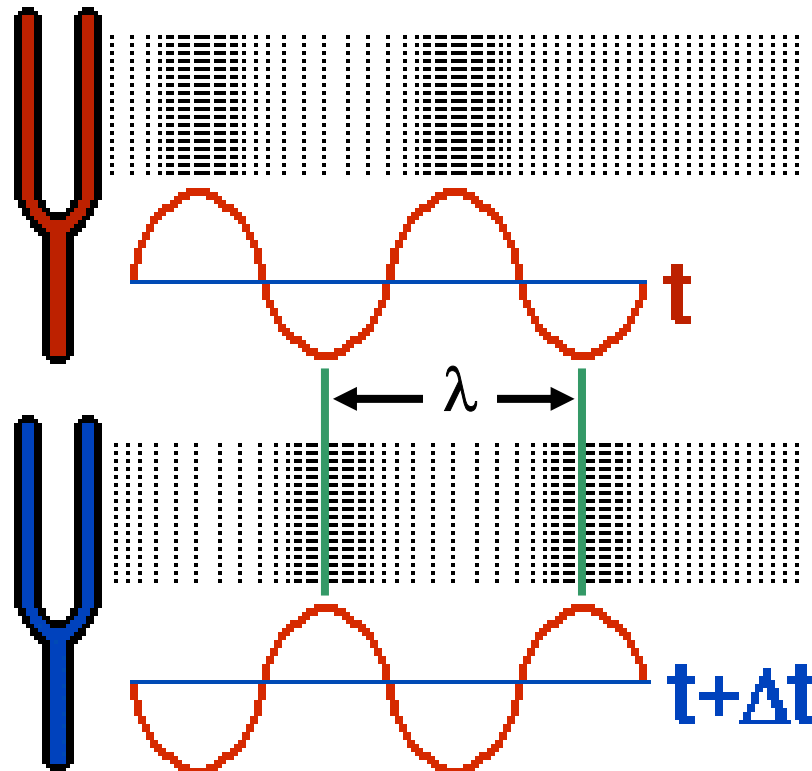




No caso de uma onda sonora ocorre algo similar. Contudo, temos que Pensar um pouco melhor sobre o processo de propagação da onda.



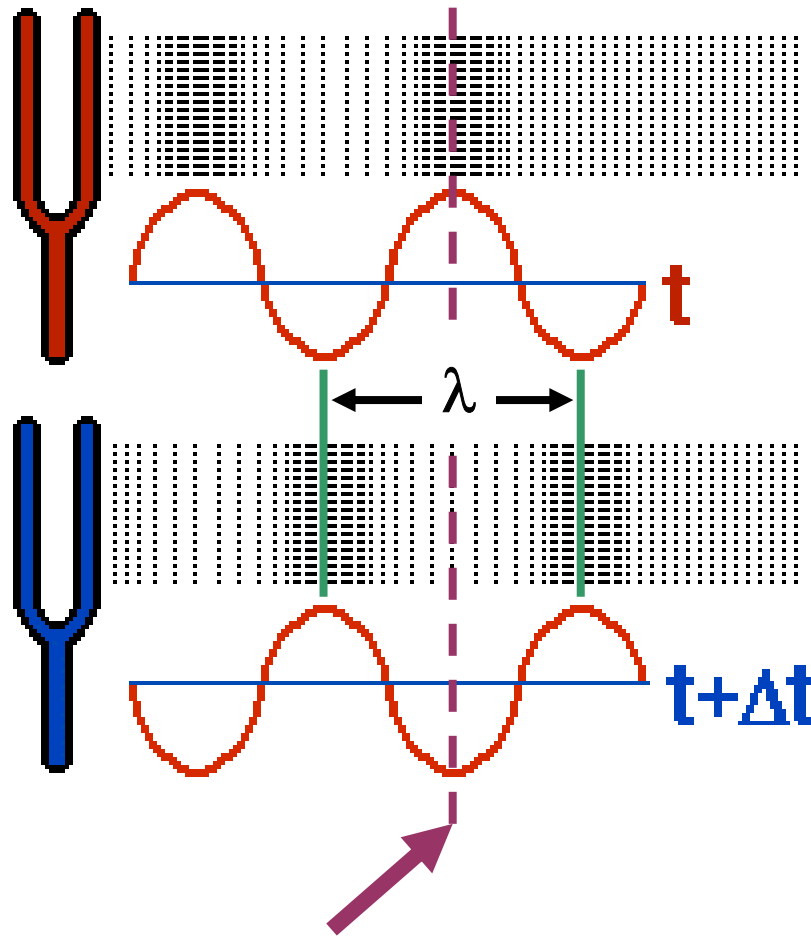
(Clique na figura para ver a animação!)



Temos agora dois aspectos a serem analisados, pois estamos tratando de “algo” que esta se “propagando temporalmente” no espaço.

Congelando a onda sonora em dois instantes de tempo podemos ver a necessidade da introdução do conceito de “Comprimento de Onda” (λ). Sendo $\mathbf{v}$ a velocidade de propagação temos $\mathbf{v} = \mathbf{f} \times \lambda$

Temos também as noções correspondentes de Amplitude e Freqüência.



Outra possibilidade está em analisar as coisas ficando parado, em uma dada posição (do espaço), observando como a pressão varia.

Assim podemos obter a noção exata de como a sonda sonora se propaga.

Sendo a onda sonora uma “onda de pressão”, temos:

Amplitude: corresponde ao quanto a pressão varia entre o valor máximo (na compressão) e o mínimo (na rarefação).

Frequência: o número de compressões e rarefações por segundo.

Período: o tempo transcorrido entre uma compressão e uma rarefação.

Comprimento de Onda: seria a distancia entre as regiões de compressão e rarefação.

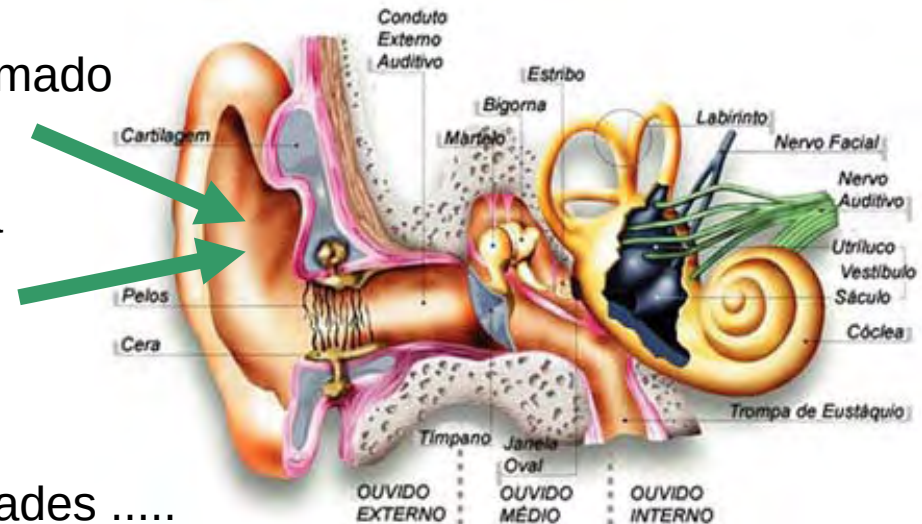
Velocidade de propagação: é a velocidade com que uma compressão ou rarefação se desloca no meio (ar).



Transportando tais noções para nossa experiência auditiva temos:

Amplitude: normalmente chamado “volume” de um som. 

Frequência: representa a dita tonalidade de um som, ou seja, o quão grave ou agudo é um som. 



Falando um pouco sobre unidades

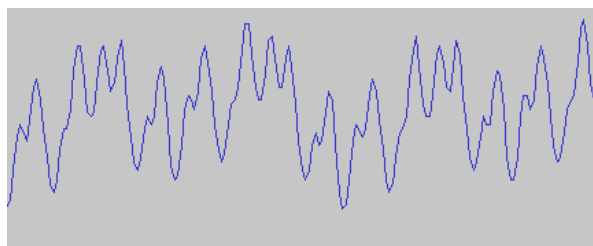
Amplitude: é medida em unidades que correspondem a variação de pressão (Pa ou dyna/cm²) ou densidade de energia (W/cm²). Contudo, como nosso aparelho auditivo responde de forma não proporcional, ou seja não linear, às excitações sonoras, a quantificação é mais complicada. Normalmente expressamos a intensidade sonora em decibel [**dB SPL**].

Frequência: é medida em Hertz [**Hz**] = [**1/s**], ou seja, ciclos/segundo.

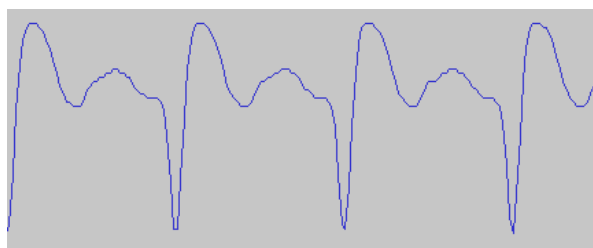
As demais quantidades físicas mencionadas possuem importância fundamental. Contudo, não se relacionam “tão diretamente” com nossa experiência auditiva usual. Falaremos sobre isso só quando necessário.

É somente isso?

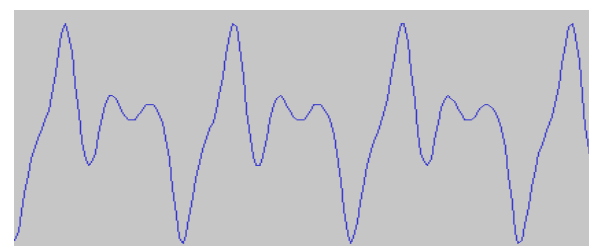
NÃO! Existe ainda outros detalhes extremamente relevantes que vamos explorar posteriormente. Um desses detalhes é comumente chamado **TIMBRE**, que vem caracterizar a fonte de um som, ou seja, o tipo de fonte sonora ou o instrumento musical que esta produzindo o som. Tal característica está conectada diretamente com a “forma” da onda sonora.



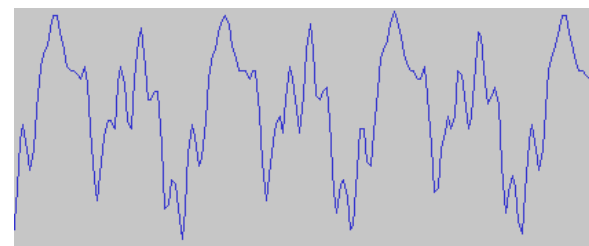
Órgão



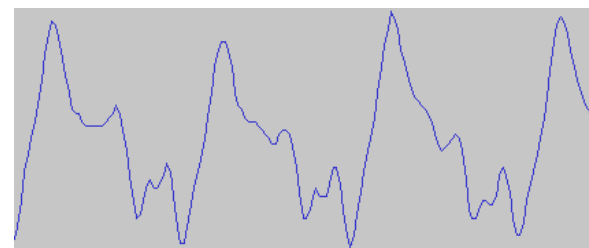
Trombone



Flauta



Violino



Piano

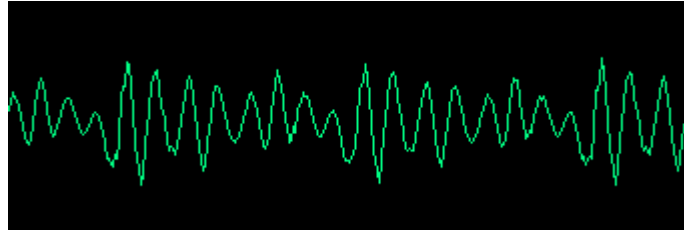
NOTA: Todas as figuras ilustram amplitude versus tempo!



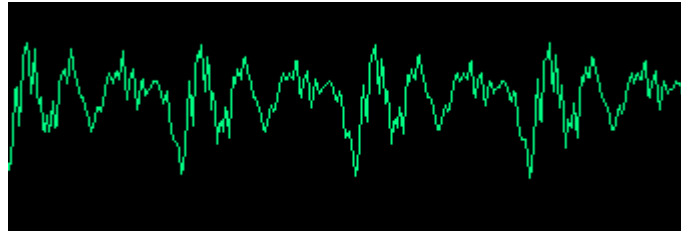


Algo similar ocorre também para a fala humana, por exemplo as vogais:

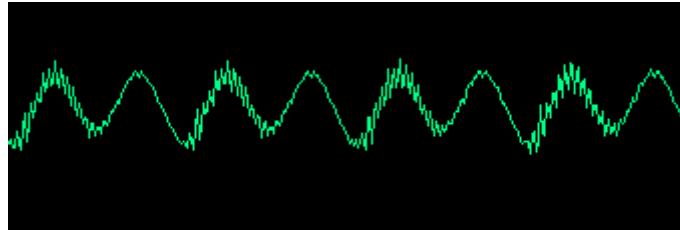
A



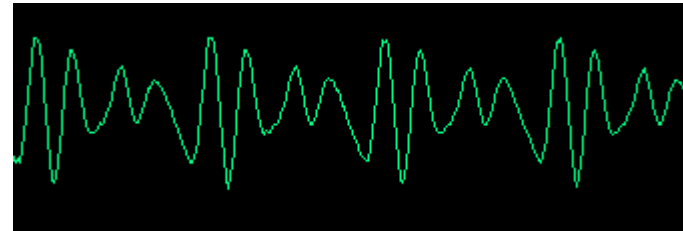
E



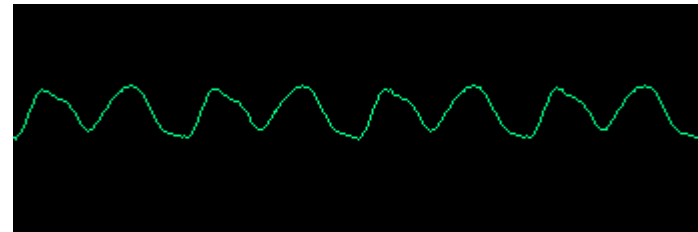
I



O



U



NOTA: Na fala humana ocorre mudanças de timbre em conjunto com variações de frequência e amplitude, simultaneamente!

Voltaremos a falar disso mais tarde. Antes vamos falar sobre a audição



E nossa audição?

Assim como todos os sentidos humanos, a audição possui uma forte componente subjetiva e depende muito de cada individuo. Na verdade podemos falar somente de tendências medias, baseadas em testes efetuados via a amostragem de uma dada população. Os profissionais responsáveis por isto são tipicamente médicos e fonoaudiólogos.

Falar desse assunto, neste momento, irá nos ajudar a entender melhor os tópicos que iremos comentar posteriormente. Até a própria construção da escala musical esta ligada com as características de nossa audição.

Salienta-se que iremos fazer comentários sobre as características do aparelho auditivo humano em conexão com a percepção dos sons. Considerações sobre a percepção musical e sensações psico-acústicas serão feitas ocasionalmente.

O primeiro passo é analisar a reação do sistema auditivo com relação a amplitude (intensidade ou volume) de um som.

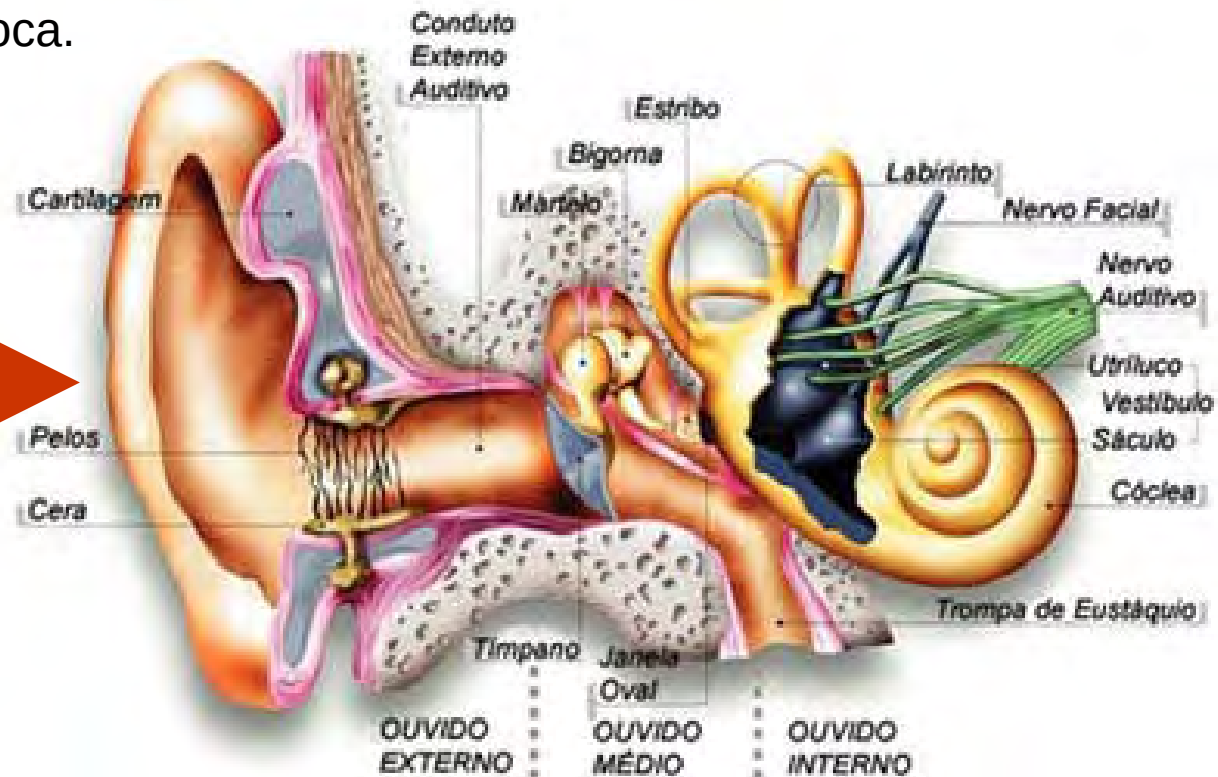
Vamos lá



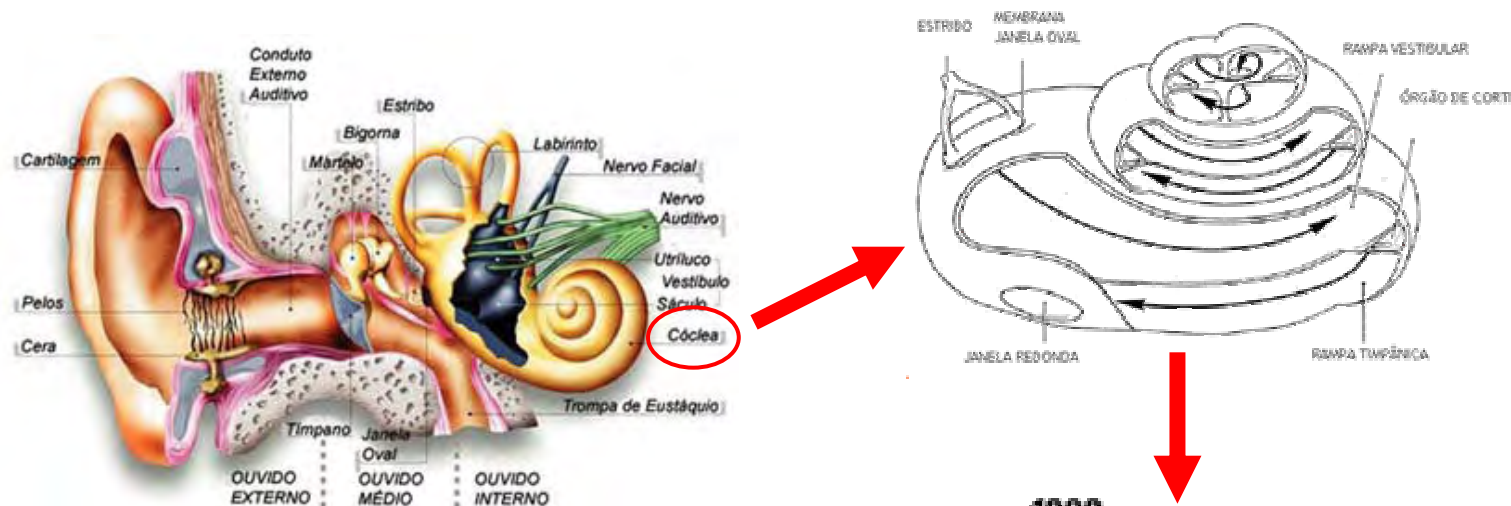
Tal como mencionado anteriormente, o som é uma “onda de pressão”. Normalmente buscamos uma escala de medida linear para as grandezas físicas. Sendo assim, medimos a amplitude de uma onda sonora pela diferença de pressão que ela produz ou a quantidade de energia (mecânica) que ela transporta por tempo por área. Portanto, usamos como unidade o Pascal [Pa] ou ainda potência por unidade de área [W/cm²].

Contudo, isso não contempla as características próprias da audição humana. Em outras palavras, uma escala linear para medir a intensidade de um som não irá corresponder diretamente a uma medida da sensação que ele provoca.

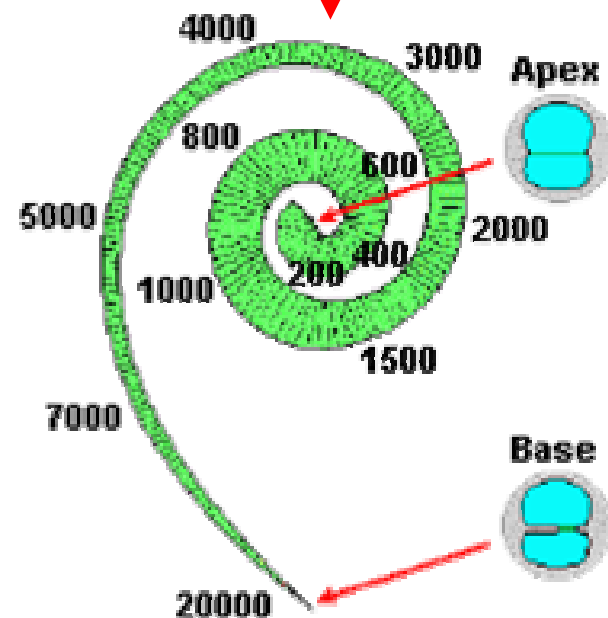
**Aparelho
Auditivo
Humano** →



Olhando mais de perto o aparelho auditivo humano, temos:



- Cada célula capilar da espiral cócliana possui uma sensibilidade natural a uma frequência de vibração particular. Quando a frequência da onda sonora casa com a frequência natural da célula nervosa, a célula irá ressoar com uma grande amplitude de vibração. É o chamado fenômeno da ressonância. Tal ressonância induz a célula a liberar um impulso elétrico que passa ao longo do nervo auditivo para o cérebro. Em um processo que ainda não é compreendido inteiramente, o cérebro é capaz de interpretar as qualidades do som pela reação dos impulsos nervosos. São as maravilhas engenharia biológica da natureza.





Antes de prosseguir, um parêntesis

- Quando uma pessoa não ouve por problemas na cóclea, faz-se um implante cóclear. O aparelho de implante coclear não é um amplificador de som. Trata-se de um estimulador elétrico. Na verdade, ele fará o papel de todo o ouvido. Este papel consiste na captação do som, transformação do mesmo em estímulo elétrico e estimulação do nervo auditivo diretamente. Não há necessidade de orelha, membrana do tímpano, ossos do ouvido e cóclea.

- Este aparelho consiste basicamente de um microfone, um filtro de frequências sonoras, tal como em um equalizador de áudio, um microcomputador em miniatura, uma antena geradora, uma antena receptora e os eletrodos de estimulação.





Tendo em mente isso, usamos uma escala de medida logarítmica que na realidade mede uma razão entre a amplitude de um som relativamente a um som de referencia, ou seja:

$$A = 20 \times \log \left(\frac{P}{P_{\text{ref}}} \right)$$

P = pressão sonora em Pa

P_{ref} = pressão de referência
(0.02 mPa = 0.00002 Pa)

A = nível ou amplitude em dB,
o decibel [dB SPL].

Q: Então, nosso sistema de audição é logarítmico?

R: Sob um certo aspecto sim! Mas

O sistema auditivo humano, ou melhor, a sensação auditiva humana não responde igualmente para vibrações sonoras (ondas sonoras ou de pressão) que tenham frequências diferentes, ou seja, em nossa audição a amplitude e a frequência de um som são fatores indissociáveis.

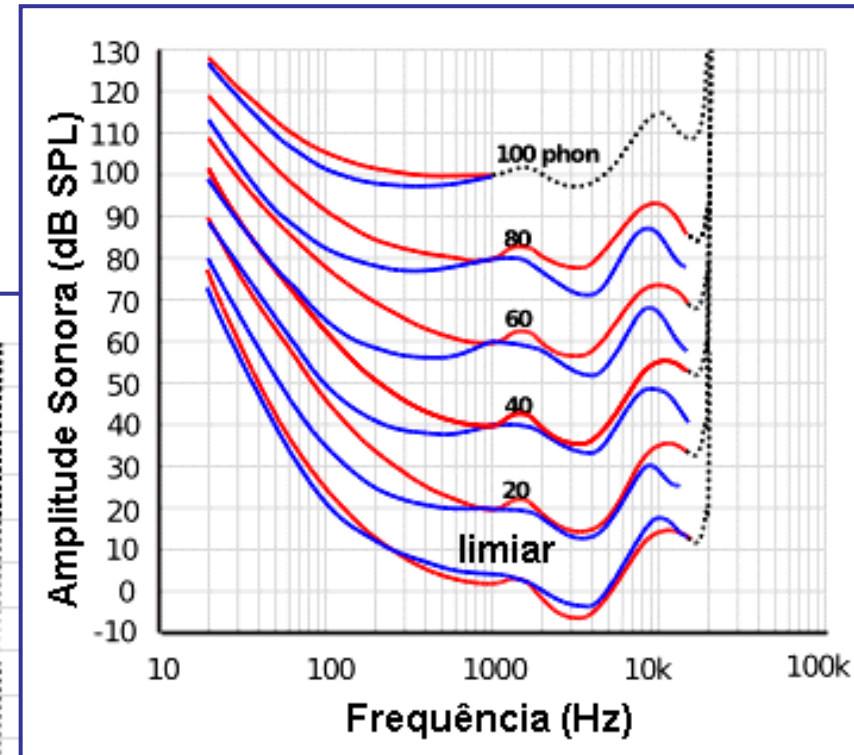
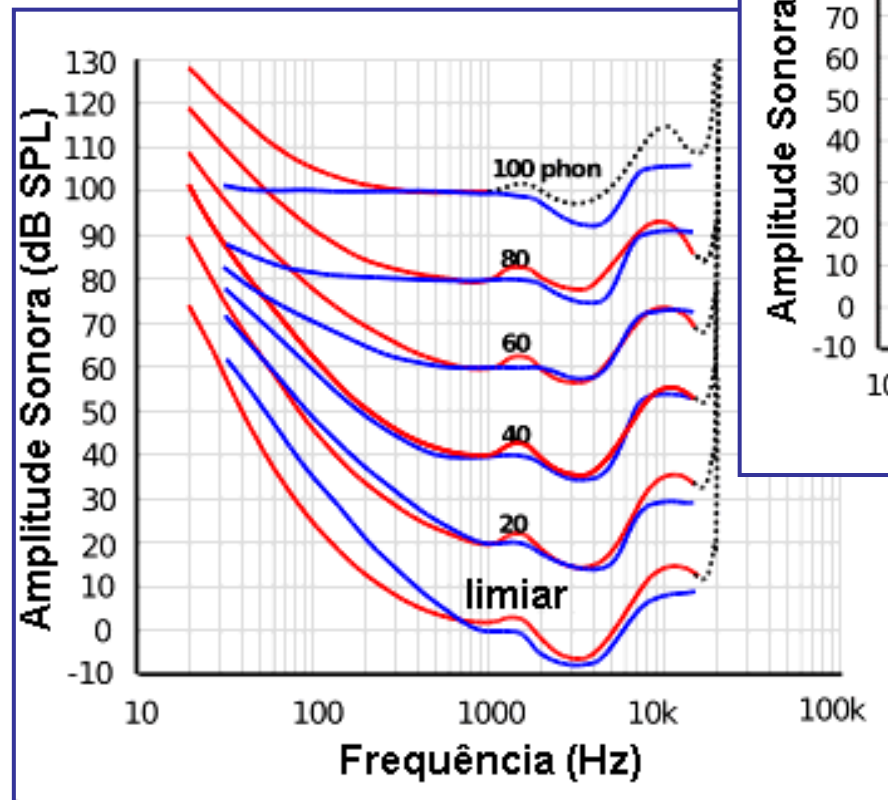
Define-se então uma outra escala de medida chamada **phon**. Tomando como frequência de referencia o valor de 1000 Hz, ou seja, 1 kHz, 1 phon corresponde diretamente a 1 dB (1 phon = 1dB para um som de 1 kHz).

Para as demais frequências, 1 phon deixará de corresponder a 1 dB, sendo vinculado a amplitude sonora que um som com uma frequência diferente de 1 kHz deverá ter para produzir uma sensação de igual magnitude.



Com base em testes de audiometricos de uma amostra de indivíduos, se obtém as curvas abaixo. As diferentes curvas referem-se a condições de avaliação distintas, ou seja, usando fones de ouvido, ou c/ ouvido livre em cabine, ou em ambiente amplo, ou etc

Fletcher-Munson



Robinson-Dadson

Em vermelho temos as curvas ISO-226:2003

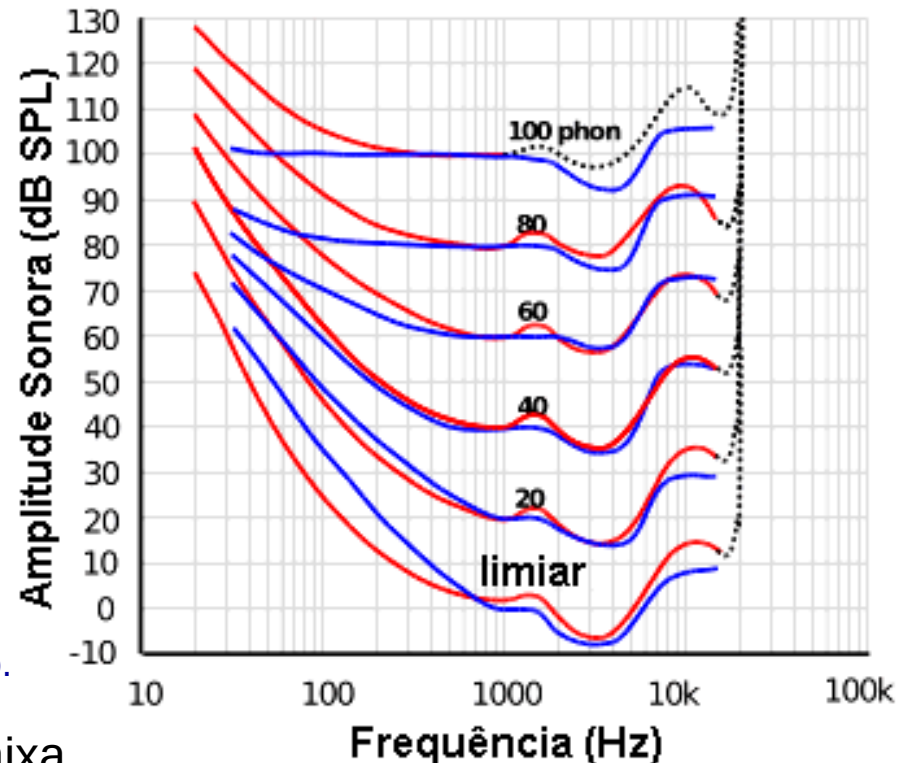


A partir dessas curvas é possível obter vários dados com relação a nossa audição, como por exemplo:

- O limiar de audição, que usualmente adota-se como sendo ao redor de 0 dB SPL, para sons de 1000 Hz* (depende da frequência sonora).
(* **NOTA:** Isto é consequência do fato da pressão adotada como referência estar próximo do nosso limiar de audição).

- Tipicamente adota-se como faixa, ou banda audível, o intervalo de frequências entre 20 Hz e 20000 Hz, ou seja, 20 kHz. Na verdade o limite superior deste intervalo situa-se normalmente entre 12 e 16 kHz (12000 e 16000 Hz).

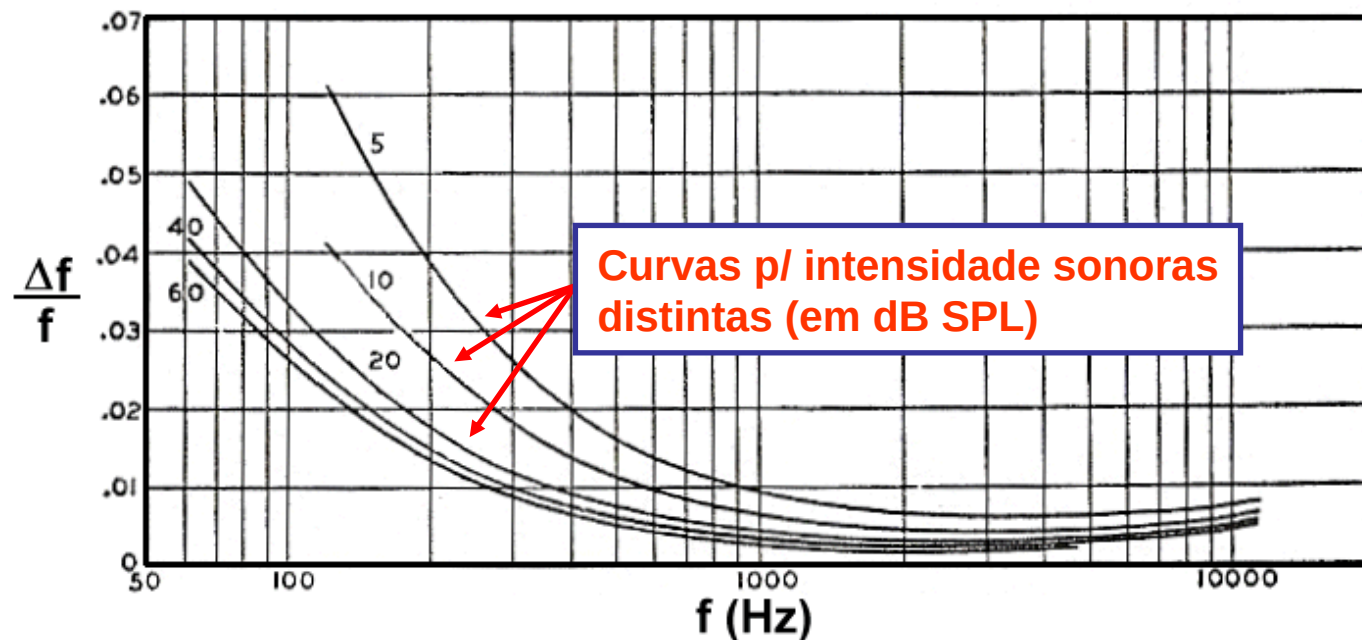
Ainda falando em amplitude, testes complementares revelam que o limite da audição humana situa-se entre 110 e 120 dB SPL (limiar do desconforto) sendo o máximo admissível situado entre 130 e 140 dB SPL (limiar da dor). É fato que a exposição sistemática a sons de grande intensidade pode, assim como o envelhecimento, provocar perda de audição.





Além dessas características, cabe salientar mais alguns outros aspectos muito importantes da nossa audição.

- Tanto com relação a duração de um som como a separação entre dois impulsos sonoros consecutivos, o limiar de percepção é ≈ 10 ms (0.01 s).
- Relativo a percepção de variações de frequência, testes revelam que ela depende da frequência e amplitude da onda sonora.



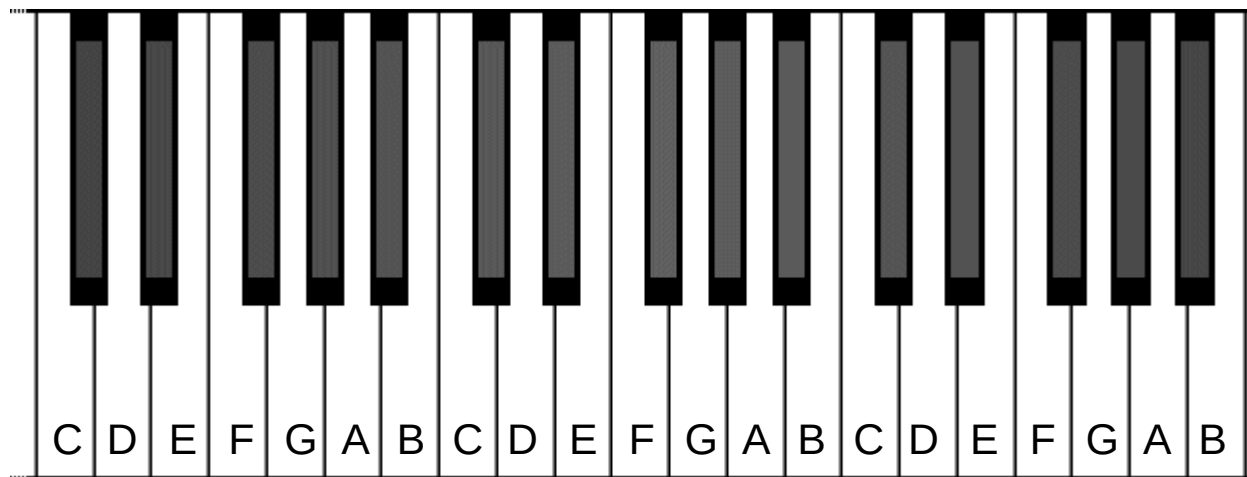
Ex.: Para distinguirmos uma mudança de frequência para um som de 100 Hz e intensidade de 20 dB SPL, a variação necessária deverá ser de ≈ 3.7 Hz. Para sons de 1000 Hz temos ≈ 5 Hz !

Tal aspecto tem uma influencia considerável na construção de uma escala cromática, estabelecendo uma relação entre as “**notas musicais**”.

Como fica a escala cromática?

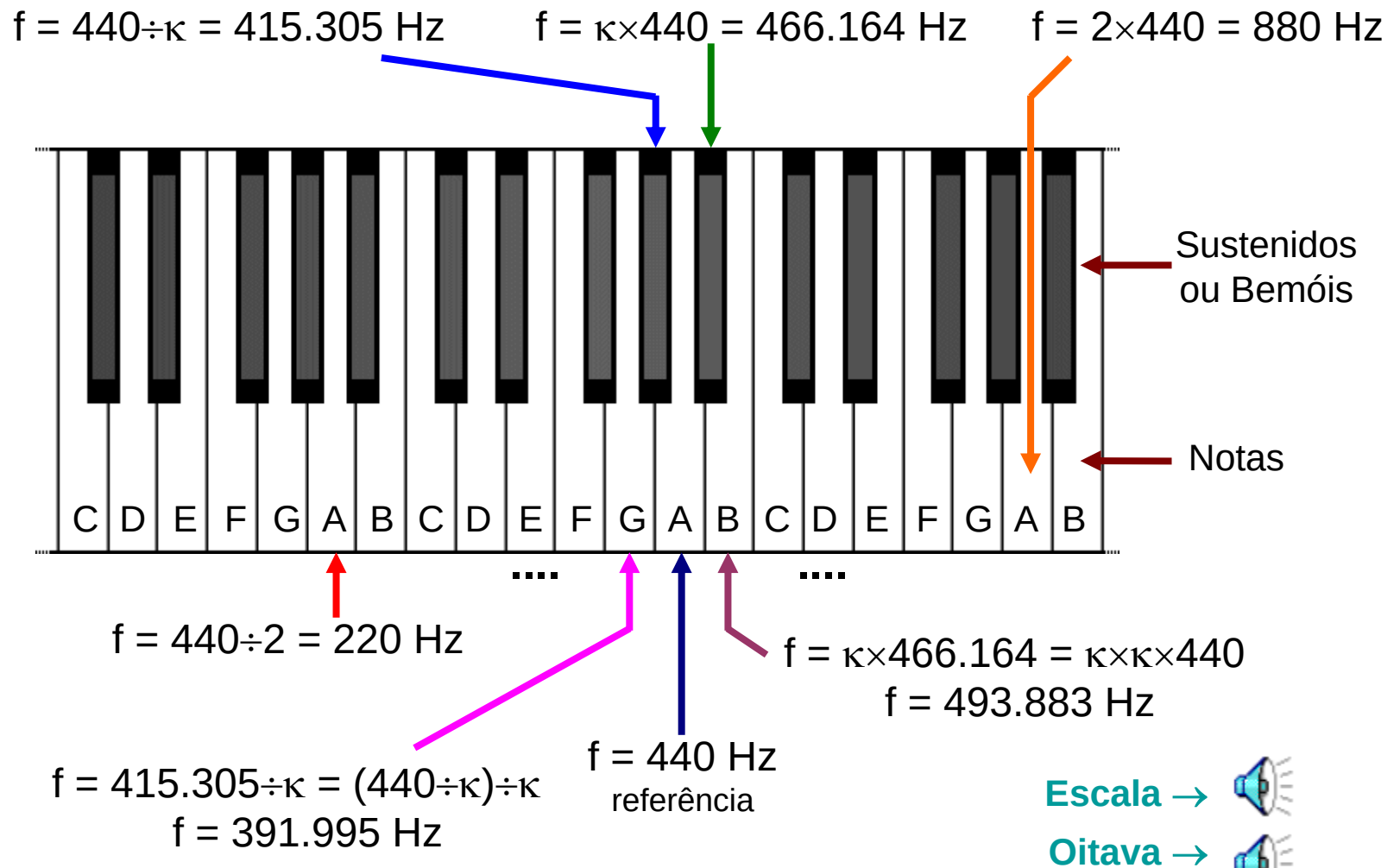
Atualmente, usa-se tipicamente a chamada escala “temperada” (ou de igual temperamento), sendo a frequência de referência adotada como A 440 Hz ou C 523.251 Hz, que corresponde a “nota musical” LÁ ou DÓ da oitava central de um piano. Este tipo de escala é construída com base em uma progressão geométrica, onde a frequência das notas acima ou abaixo da nota de referencia são obtidas por sucessivas multiplicações ou por sucessivas divisões por um fator constante κ , respectivamente.

$$\kappa = \sqrt[12]{2} = 2^{1/12} = 1.059463094$$



C = DÓ; D = RÉ; E = MI; F = FÁ; G = SOL; A = LÁ; B = SI

Exemplificando, temos:



Salienta-se que as notas não são igualmente espaçadas em frequência. Não é seguida uma progressão aritmética e sim geométrica!



Contudo as coisas nem sempre foram assim.

Historicamente, a frequência do **A**, tomada como referencia, variou ao longo dos tempos entre 373 e 466 Hz. Por exemplo:

1811 Opera de Paris: A 427 Hz

1820 Mosteiro de Westminster: A 422.5 Hz

1835 Pianos Wolfels: A 443 Hz

1834 Opera de Viena: A 436.5 Hz

1862 Opera de Dresden: A 440 Hz

1877 Órgão da catedral de St. Paul: A 446.6 Hz

1878 Opera de Viena: A 447 Hz

1880 Pianos Steinway: A 436 Hz (NY) ou 454.7 Hz (London)

1896 London Philharmonic: A 439 Hz

e finalmente no século 20

1925 A industria americana de instrumentos musicais adota em 11 de junho o padrão **A** 440 Hz sendo isto normalizado pela A.S.A. em 1936, recomendado internacionalmente em 1939, adotado pela Organização Internacional de Padronização em 1955 e sendo reafirmado em **1975**, constituindo assim a chamada **ISO-16**.

O valor absoluto de tal frequência não é o mais importante. O fundamental é que em uma orquestra todos estejam afinados segundo o mesmo padrão!





A relação entre frequências e o próprio numero de notas pode variar em diferentes culturas. Por exemplo, a escala musical Indiana é significativamente distinta da chamada escala Ocidental.

Mesmo falando em termos da escala musical Ocidental, observa-se uma mudança significativa no decorrer da historia. Outras escalas já foram adotadas, como por exemplo a escala elaborada por Pitágoras em 400 A.C. ou a de “tom médio”, 136 A.C., aperfeiçoada por Salinas em 1577, que de fato duraram por mais tempo que a escala atualmente em uso.

Apesar da escala “temperada” ter sido proposta a muito tempo, por Aristoxenus, um discípulo de Aristóteles, ela só começou a ser empregada efetivamente em torno de 1690 no norte da Alemanha.

Cabe ressaltar que mesmo essa chamada escala “temperada” sofreu varias alterações ao longo dos períodos históricos da arte, sendo adotada definitivamente pelos “autores românticos”. Mesmo assim ocorreu ainda diversas variações no chamado “temperamento” da escala. Por isso, se deve tomar um certo cuidado ao executar uma obra de Beethoven ou Bach, pois eventualmente “algo será perdido”, necessitando-se adaptações.

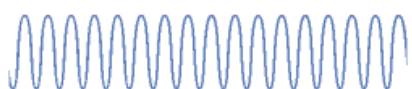
Em todas as etapas houve fatores de ordem tecnológica, via de regra conectados com fabricação dos instrumentos, que influenciaram fortemente tal evolução. Adota-se hoje a escala de “igual temperamento” e já se propõem “escalas microtonais”, dedicadas a musica por computadores.

E a sobreposição de sons?

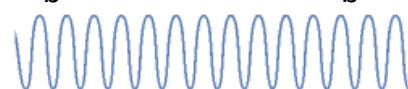
Entre os diversos fenômenos que ocorrem ao sobrepormos dois sons, ou seja, ao somarmos duas ondas sonoras, destacamos o surgimento de **batimentos** e **ressonâncias**. Tais fenômenos destacam-se pelo fato de influenciarem até mesmo a própria construção da escala cromática.

Os batimentos são variações de intensidade do som produzidas pela superposição de duas ondas sonoras que possuem frequências ligeiramente diferentes. Podemos ilustrar graficamente isso ao somarmos duas ondas senoidais (denominadas puras) como visto abaixo:

$$P_a = A \times \text{Sen}(2\pi \times f_a \times t)$$



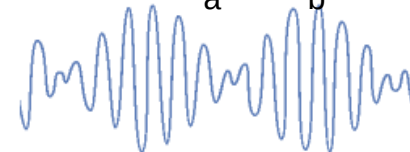
$$P_b = A \times \text{Sen}(2\pi \times f_b \times t)$$



tempo →

$$f_{\text{batimentos}} = f_a - f_b$$

$$P = P_a + P_b$$



Isso pode ser percebido como um “vibrato” ou “tremolo”:

Quando as frequências são iguais temos a chamada ressonância. Algo similar ocorre com múltiplos inteiros!



f_a	f_b
400	
400 + 401	
400 + 402	
400 + 404	flauta
400 + 408	
400 + 416	flauta + órgão
400 + 432	



O que caracteriza os instrumentos?

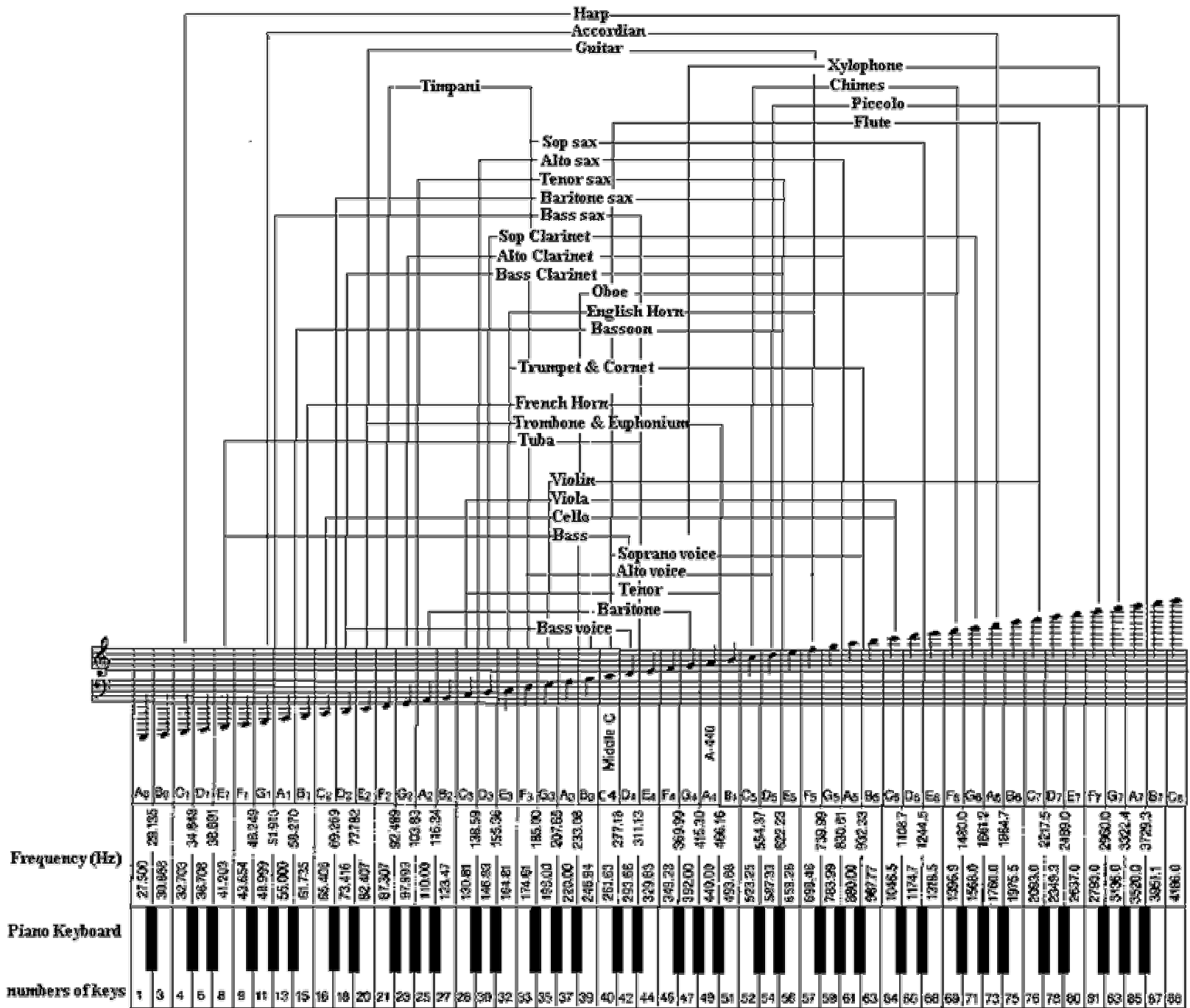
Em outras palavras: **O que caracteriza o som dos instrumentos?**

Aqui vamos nos limitar aos aspectos gerais e não aqueles conectados com as características construtivas em particular nem com a técnica usada para tocá-los, o que constitui fatores que podem influenciar em muito o som produzido por um instrumento durante a execução de uma obra.

Basicamente, em ordem crescente de importância, temos:

- Amplitude do som produzido;
- Faixa de frequências alcançada pelo instrumento (banda);
- **Timbre → Conteúdo harmônico estático e dinâmico.**

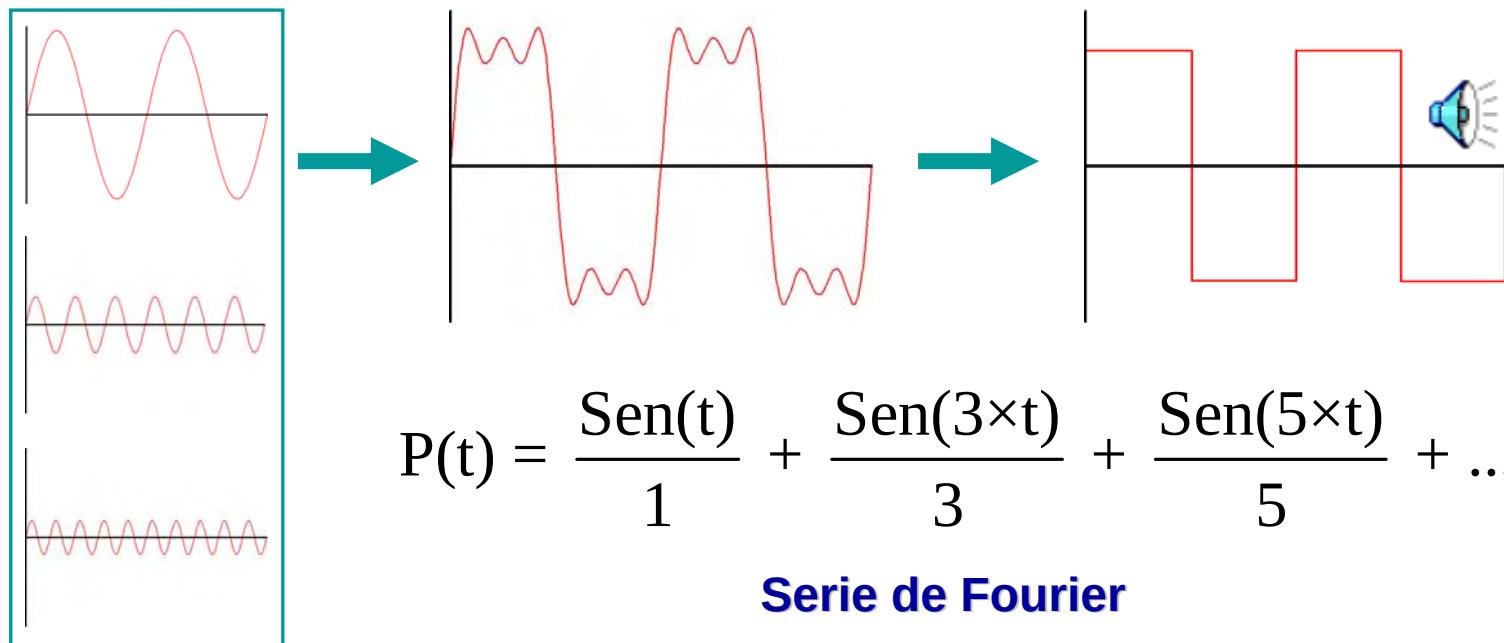
Antes de olharmos com mais atenção os fatores que caracterizam o timbre de um dado instrumento musical, temos a seguir um diagrama da banda tipicamente alcançada por alguns instrumentos musicais, tomando como referencia um piano.



Como caracterizar um timbre?

Resumidamente, com vimos, [a forma da onda sonora](#)!

A ferramenta principal para estudar isso foi desenvolvida por Joseph Fourier (1768-1830) que demonstrou que qualquer função periódica pode ser escrita matematicamente como uma soma de funções seno e cosseno, ou seja: Qualquer forma de onda pode ser descrita em termos matemáticos como uma superposição de funções trigonométricas básicas, muitas vezes chamadas de “sons puros”. Por exemplo:



$$P(t) = \frac{\text{Sen}(t)}{1} + \frac{\text{Sen}(3 \times t)}{3} + \frac{\text{Sen}(5 \times t)}{5} + \dots$$

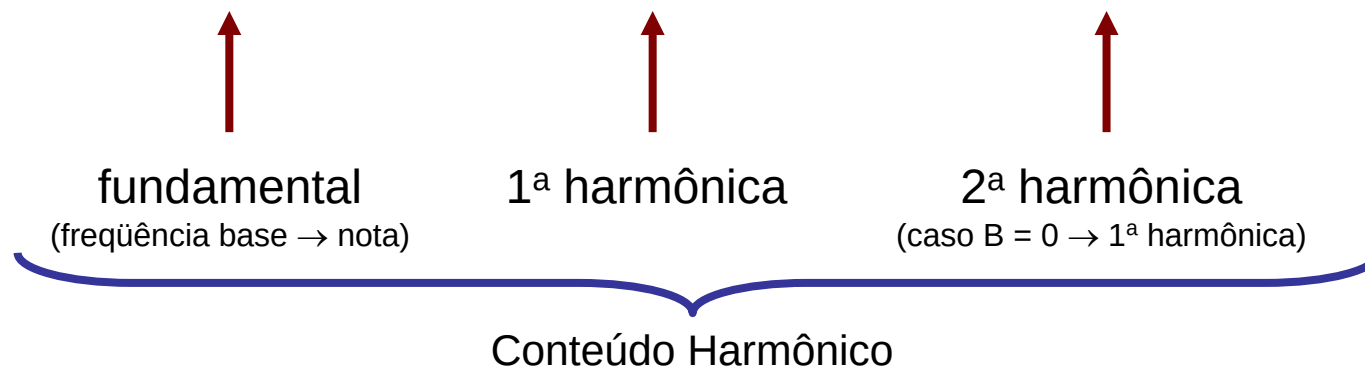
Serie de Fourier



Baseando-se nisso podemos então reproduzir matematicamente qualquer forma de onda nos seus mínimos detalhes, bastando que somemos um numero suficiente de sons puro, ou seja, de sinais senoidais, ou ainda de ondas com forma senoidal, para compor a forma da onda sonora desejada.

Em termos matemáticos teríamos:

$$P(t) = A \times \text{Sen}(\pi \times f \times t) + B \times \text{Sen}(2\pi \times f \times t) + C \times \text{Sen}(3\pi \times f \times t) + \dots$$



Em uma forma mais elegante e geral:

$$P(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \times \text{sen}(n \times \pi \times f \times t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \times \cos(n \times \pi \times f \times t)$$

onde os coeficientes A_n e B_n devem ser convenientemente especificados.

Existe algo além disso?

Sim! O conteúdo harmônico correspondente a onda sonora produzida por um instrumento é na realidade algo dinâmico, que muda durante o tempo em que o instrumento esta sendo acionado para produzir um som. Isto ocorre também com amplitude da onda sonora, podendo surgir modulações, tanto em amplitude como em frequência durante o soar do instrumento.

O que estamos falando é que a onda sonora possui “envoltórias” que conferem um caráter dinâmico tanto ao seu conteúdo harmônico como à sua amplitude. São os chamados “envelopes” de forma e amplitude.

No caso da amplitude, tal fato é facilmente constatado ao compararmos o som produzido por diferentes instrumentos, sendo também evidente pequenas nuances no timbre e/ou ainda modulações. Por exemplo:

Órgão: Soa imediato, constante e rápido.



Piano: Soa imediato, inconstante e lento com início mais complexo.



Trompete: Soa imediato, modulado e rápido com início distinto.



Guitarra: Algo similar ao piano. Depende muito da técnica ao tocar.



São os pequenos detalhes que fazem a diferença !!!!

Como podemos “ver” isso?

Para visualizar tal processo, utilizamos um osciloscópio, no caso de desejarmos analisar a amplitude, ou um analisador de espectro, para o caso de querermos visualizar o conteúdo harmônico de uma onda sonora.

Por exemplo, para um piano temos:

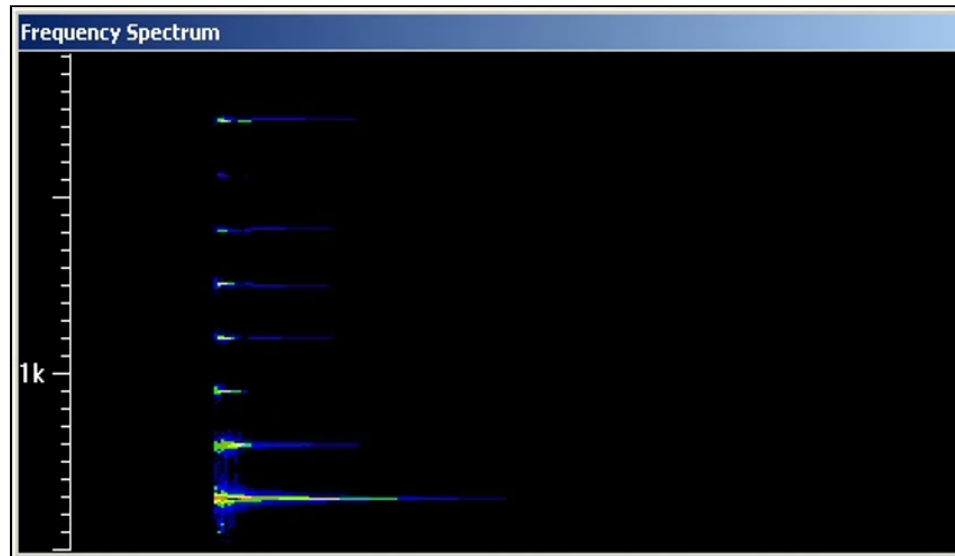


(Clique nas figura para ver as animações!)



Para visualizar o conteúdo harmônico de uma onda sonora como função do tempo de uma maneira mais clara, usamos um analisador de espectro que construa um diagrama de cor falsa.

Por exemplo, para o piano temos o diagrama abaixo:



(Clique na figura para ver a animação!)

Neste diagrama de cor falsa a coordenada horizontal corresponde ao tempo transcorrido, a vertical à frequência e a cor à intensidade das harmônicas que na ordem decrescente simbolizado por vermelho-amarelo-verde-azul.

Como é uma envoltória?

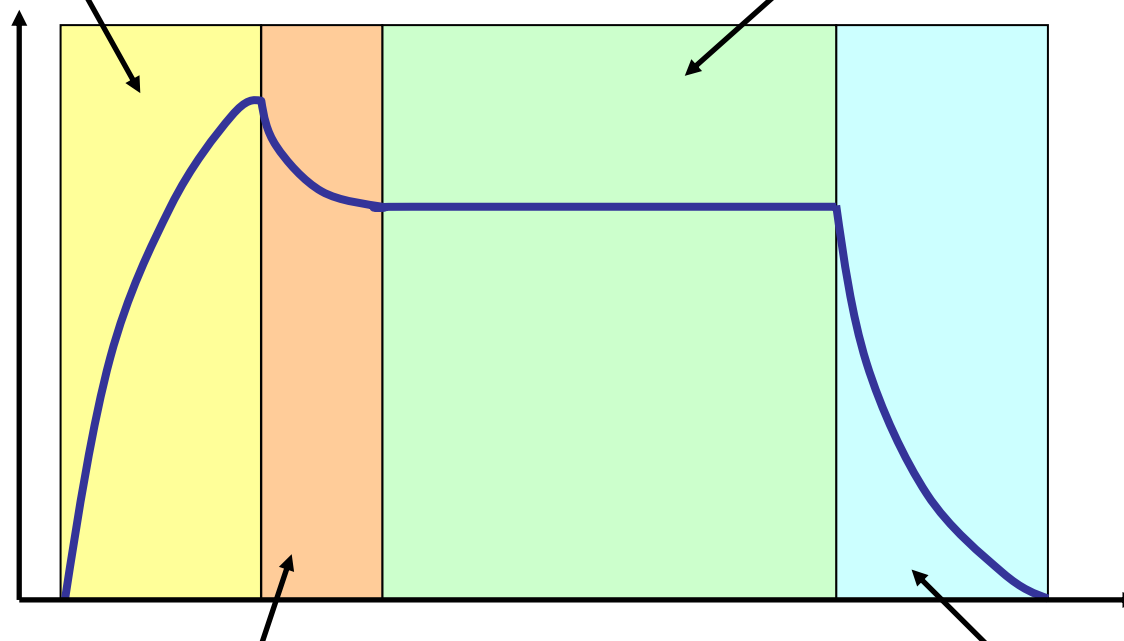
De uma maneira geral, a envoltória é composta basicamente por 4 tempos, ou seja, 4 períodos de tempo, que correspondem as 4 fases básicas do soar de um instrumento. São eles:

Ataque: período onde o instrumento é acionado dando inicio a emissão de som

Sustentação: período onde a emissão do som é mantida

Relaxação: período onde os mecanismos do instrumento relaxam do acionamento

Decaimento: período onde o instrumento para de emitir som



Piano



Trompete



Como falamos anteriormente, há duas envoltórias que atuam durante o soar de um instrumento. Um delas é a envoltória de amplitude, que é a de mais fácil percepção, e a envoltória de forma ou conteúdo harmônico. Ambas possuem as mesmas características gerais, mas significados diferentes.

- **Envoltória de Amplitude:** Caracteriza os aspectos gerais relativos a amplitude da onda sonora como função do tempo, desde o acionamento do instrumento até o termino de seu soar.
- **Envoltória de Forma:** Caracteriza as amplitudes de cada uma das harmônicas individualmente.

Em termos matemáticos poderíamos escrever:

$$P(t) = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Envoltória de Amplitude}}}{A(t)} \times \left[\text{Sen}(\pi \times f \times t) + \underset{\substack{\uparrow \quad \quad \quad \uparrow \\ \text{Envoltória de Forma}}}{B(t) \times \text{Sen}(2\pi \times f \times t) + C(t) \times \text{Sen}(3\pi \times f \times t) + \dots} \right]$$

... observe a dependência temporal dos coeficientes!

Contudo, tal concepção de envoltórias não é completa muito menos única, ou seja, certamente poderíamos expressar o dinamismo do soar de um instrumento de outras maneiras. A presente maneira foi utilizada entre 1970 e 1980 para compor o conceito dos sintetizadores de áudio da época. A situação real pode ser bastante mais complexa.



- Além desses detalhes, há também o surgimento de modulações. Em algumas situações tais modulações, tipicamente chamadas de “vibrato” ou “tremolo”, surgem como resultado de batimentos ou ressonâncias no instrumento durante seu uso.

Elas podem ocorrer tanto em amplitude como em frequência. Neste ultimo caso elas são usualmente causadas pela técnica utilizada para “tocar” (operar) o instrumento musical. Essas modulações são também típicas em instrumentos de sopro.

- Falando em instrumentos de sopro, é facilmente observado em alguns casos (por exemplo na “flauta transversal”) o surgimento de transientes, ou seja, sons de curta duração no inicio de seu soar (durante o ataque).

Tais transientes ou sons adicionais, muitas vezes são termos adicionais somados a serie de Fourier mencionada anteriormente, cabendo observar que eles podem obedecer às mesmas envoltórias ou não.

No caso da “flauta transversal” é típico a soma de um chiado (ex. ruído branco), como resultado do soprar, tanto durante o ataque como durante o período de sustentação.

- Tais fato são óbvios para os músicos, ou seja, a técnica ou maneira de tocar um dado instrumento tem reflexo direto nas características do som produzido pelo mesmo.

E tecnologicamente falando?

Uma aplicação direta das noções comentadas até o momento levaram ao desenvolvimento tanto de equipamentos de gravação/reprodução de áudio como a construção de instrumentos musicais eletrônicos, os chamados sintetizadores eletrônicos.

Um sintetizador é qualquer instrumento capaz de “imitar” o som de outro instrumento musical. Portanto, um piano eletrônico é um tipo de sintetizador. Contudo, ao longo dos tempos, os sintetizadores se tornaram instrumentos por si só.

Nas décadas de 1970-1980, da chamada tecnologia analógica, os sons eram produzidos por osciladores responsáveis pela geração de sinais elétricos audíveis com formas básicas, tais como senoidal, quadrada, triangular, rampa ou dente de serra. Utilizando a chamada técnica de síntese subtrativa, este sinal é então “moldado” dinamicamente. Havia ainda técnicas de síntese aditiva, contudo eram muito menos comuns.

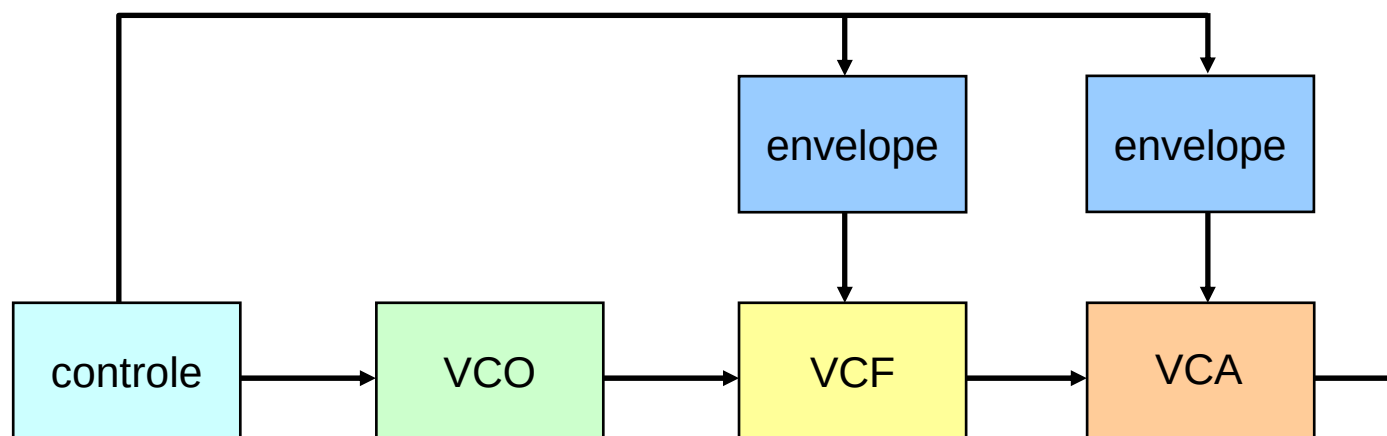




Síntese aditiva consiste na geração de quantos sinais senoidais forem necessários, somado-os, para obter a forma de onda desejada. Em outras palavras, gera-se cada termo da serie de Fourier, efetua-se a soma, para assim se obter o som desejado.

$$P(t) = A \times \text{Sen}(\pi \times f \times t) + B \times \text{Sen}(2\pi \times f \times t) + C \times \text{Sen}(3\pi \times f \times t) + \dots$$

Síntese subtrativa consiste em gerarmos formas de ondas básicas (senoide, quadrada, triangular, etc), combinarmos elas e através de amplificadores e filtros, agindo em conjunto com geradores de envoltória, controlarmos dinamicamente tanto a amplitude como o conteúdo harmônico do som gerado.



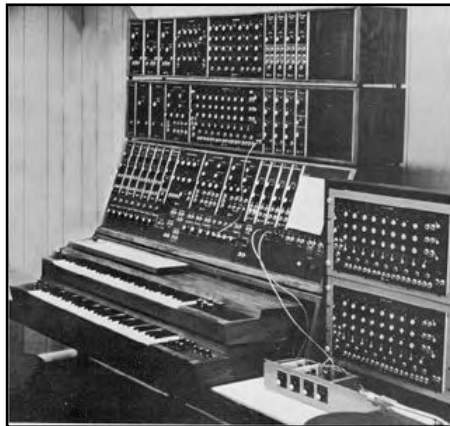
- VCO: Voltage Controlled Oscillator = Oscilador Controlado por Tensão
- VCF: Voltage Controlled Filter = Filtro Controlado por Tensão
- VCA: Voltage Controlled Amplifier = Amplificador Controlado por Tensão



O “coração” deste tipo de sintetizador são os filtros. Resumidamente, um filtro é um dispositivo (um circuito eletrônico) capaz de suprimir sinais elétricos de determinadas frequências, deixando passar somente aqueles sinais compatíveis com o particular modo de operação do filtro. Os tipos mais comuns são:

- **Filtro passa-baixas:** “Deixa passar” somente sinais de baixa frequência
- **Filtro passa-altas:** “Deixa passar” somente sinais de alta frequência
- **Filtro passa-banda:** “Deixa passar” só sinais de um faixa de frequências

Tal concepção, viável economicamente, permitiu o surgimento de diversas novas empresas que dedicam-se até hoje ao projeto e construção de instrumentos musicais eletrônicos e outros derivados dessa tecnologia.



Contudo, muitos deles não eram exatamente portáteis ou simples



- Um instrumento virtual (VSTi) que simula um MiniMoog

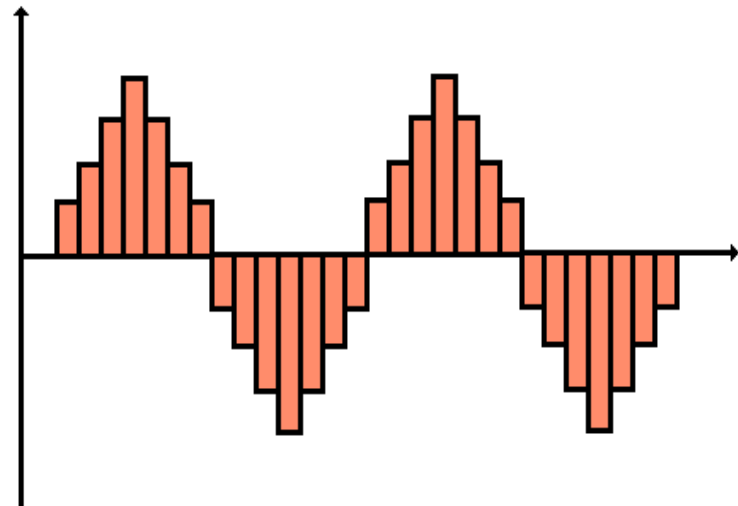


Nos dias de hoje, a tecnologia digital mudou completamente o enfoque, propiciando a construção de instrumento mais simples, portáteis e com custo financeiro menor.



A grande “mudança de enfoque” foi baseada na verdade em uma idéia bem antiga, e bem conhecida, chamada “gerador panorâmico de sinais”.

Contudo, tal concepção somente foi viabilizada com o desenvolvimento da tecnologia digital, via o desenvolvimento vertiginoso da micro-eletrônica, barateando os custo e oferecendo componentes mais eficientes e acessíveis.





Voltando, neste momento, a falar dos instrumentos musicais tradicionais, cabe finalmente salientar a importância da evolução tecnológica, ou melhor a evolução do conhecimento, em áreas aparentemente não relacionadas.

Por exemplo:

- A evolução em técnicas de metalurgia, materiais e fabricação mecânica permitiram a obtenção de cordas de aço, bronze e multicamadas que foram de fundamental importância para a construção de pianos mais eficientes e robustos, tal como o Steinway Grand Piano.
- Além disso, fala-se também na estabilidade, principalmente dos instrumentos de corda, quanto as variações de temperatura e umidade ambiente.
- Essas mesmas técnicas de fabricação mecânica permitiram também a confecção de “cravelhas” mais estáveis, possibilitando manter a afinação de um instrumento de cordas por um tempo maior.
- Um caso interessante esta relacionado com instrumentos de sopro, tais como o trompete, o trombone, etc. Foi somente depois que as técnicas de fabricação de válvulas de ar foram aperfeiçoadas que tais instrumentos se tornaram de fato viáveis.

Outras correlações, como essas, podem ser encontradas com relativa facilidade, sendo ressaltado ao final que nem tudo é eletrônica.



Finalizando

Poderíamos ficar aqui explorando diversos detalhes e assuntos extremamente interessantes. Contudo, isto esta bem alem do finalidade deste pequeno resumo, que esta longe de ser completo.

Um bom inicio para uma seqüência de leituras complementares pode ser vista na lista de referencia a seguir.

Por agora, esperamos ter ilustrado alguns aspectos básicos relacionados com a natureza dos sons e os conceitos fundamentais envolvidos, onde tentamos exemplificar a relação entre musica e tecnologia.

Cabe ainda explorar diversos pontos, que na realidade são bem mais subjetivos. Afinal de contas, a compreensão da musica, assim como de qualquer outra arte, depende não somente de quem a faz como de quem a aprecia!



Referências:

Entre as diversas fontes consultadas, podemos citar:

- [1] H.F. Olson, **Elements of Acoustical Engineering** (1947).
- [2] L.L. Beranek, **Acoustics** (1954).
- [3] **Musical Tuning** em <http://www.uk-piano.org> (Inglaterra).
- [4] **PhysClips** em <http://www.phys.unsw.edu.au/physclips/> (Austrália).
- [5] **Music Acoustics** em <http://www.phys.unsw.edu.au> (Austrália).
- [6] G.E. Shilov, **Gama Simple** (1978).
- [7] Coleção de artigos das revistas **Radio Electronics**, **Elektor**, **Popular Electronics** e **Nuts and Volts** (1983-1998).
- [8] Diversas paginas da internet incluindo material sobre VST e VSTi, em especial a pagina de Hermann Seib, em <http://www.hermannseib.com>, responsável pela criação do VST host chamado SaviHost, além do VSTi MiniMogueVA criado pelo VoltKitchen Group (2008).