



A Física da Música

Prof.Dr. Edmilson Manganote
mangano@ifi.unicamp.br

Sons e Música

- Dentre os diferentes tipos de sons produzidos pela natureza e audíveis ao ser humano, a música para alguns é sinônimo de criação divina ou, ainda, a expressão máxima de sensibilidade do ser humano.
- Porém, todos os sons que ouvimos, são produzidos por vibrações que excitam as moléculas de ar à sua volta, as quais transmitem esta excitação a outras, e assim sucessivamente, até que esta movimentação em forma de ondas chega ao nosso ouvido.
- Ao serem captadas pelo ouvido as ondas de vibração são levadas ao sistema nervoso central, onde são processadas e aí então as percebemos como sons

Sons e Música

- ◎ Quando algum objeto vibra de forma completamente desordenada, dizemos que o som produzido por esta vibração é um ruído, como por exemplo o barulho de uma explosão, um trovão.
- ◎ O ruído é o resultado da soma de um número muito grande de freqüências, tornando muito difícil exprimi-lo matematicamente.
- ◎ Quando o objeto vibra de forma ordenada e constante, produzindo uma onda mais pura, dizemos que este som é uma nota.
- ◎ As notas musicais possuem poucas freqüências, o que nos permite uma análise detalhada destes sons.

Instrumentos Musicais



O que é um instrumento musical?

Um **instrumento musical** é um objeto, construído com o propósito de produzir música. Os vários tipos de instrumentos podem ser classificados de diversas formas, sendo uma das mais comuns, a divisão de acordo com a forma pela qual o som é produzido. O estudo dos instrumentos musicais designa-se por organologia.

O que é musica?

Em geral considera-se um som como *musical* quando podemos controlar uma ou mais de suas características: **timbre**, **altura** (grave, médio e agudo), **duração** (do som e/ou do silêncio) e **intensidade**.

Instrumentos

Componentes

- Elemento produtor de Som
- Corpo
- Caixa de Ressonância
- Elemento de Estímulo e Controle
- Acessórios



Instrumentos

Tessitura e Registro

A **tessitura** de uma voz ou instrumento musical é a extensão de notas em que um instrumento pode tocar.

Chamam-se **registros** as três regiões em que a tessitura de um instrumento ou voz pode ser dividida. Divide-se em registro grave, médio e agudo.

Instrumentos

Classificação

Utiliza-se como critério principal nas diversas classificações, a forma como o som é produzido.

No século XIX, com a necessidade de catalogar e expor instrumentos musicais em uma coleção do museu de instrumentos musicais de Bruxelas, o organologista Victor Mahillon criou um sistema que dividia os instrumentos, de acordo com a forma de produção sonora, em **autofones**, **membranofones**, **cordofones** e **aerofones**. Seu sistema foi ampliado por Curt Sachs e Erich von Hornbostel, dando origem ao chamado sistema Hornbostel-Sachs de classificação. Além de mudar o nome da classe autofones para **idiofones**, eles alteraram a forma de subdivisão de suas classes e introduziram um código decimal semelhante ao código que Melvil Dewey criou para a classificação de livros em bibliotecas.

Instrumentos - Tipos

Instrumentos de Corda

Nos **cordofones** o som é provocado pela vibração de parte do instrumento: as **cordas**, quando friccionadas, pinçadas ou percutidas.



Instrumentos - Tipos

Instrumentos de Percussão

A família tradicionalmente chamada de instrumentos de percussão pode ser dividida, pelo critério da produção sonora, em idiofones percutidos e membranofones percutidos. Nos **idiofones percutidos**, é a vibração de todo o instrumento musical que produz o som. Nos **membranofones percutidos** o som é produzido por uma membrana esticada, tal como uma pele, tecido ou membrana de material sintético.



Instrumentos - Tipos

Instrumentos de Sopro

Nos **aerofones** é a circulação do ar que provoca a oscilação de componentes do instrumento musical, produzindo sons.



Instrumentos - Tipos

Instrumentos de teclas

Os instrumentos de teclas podem classificados como pertencendo a qualquer uma das diversas categorias anteriores, pelo modo como o som é produzido.



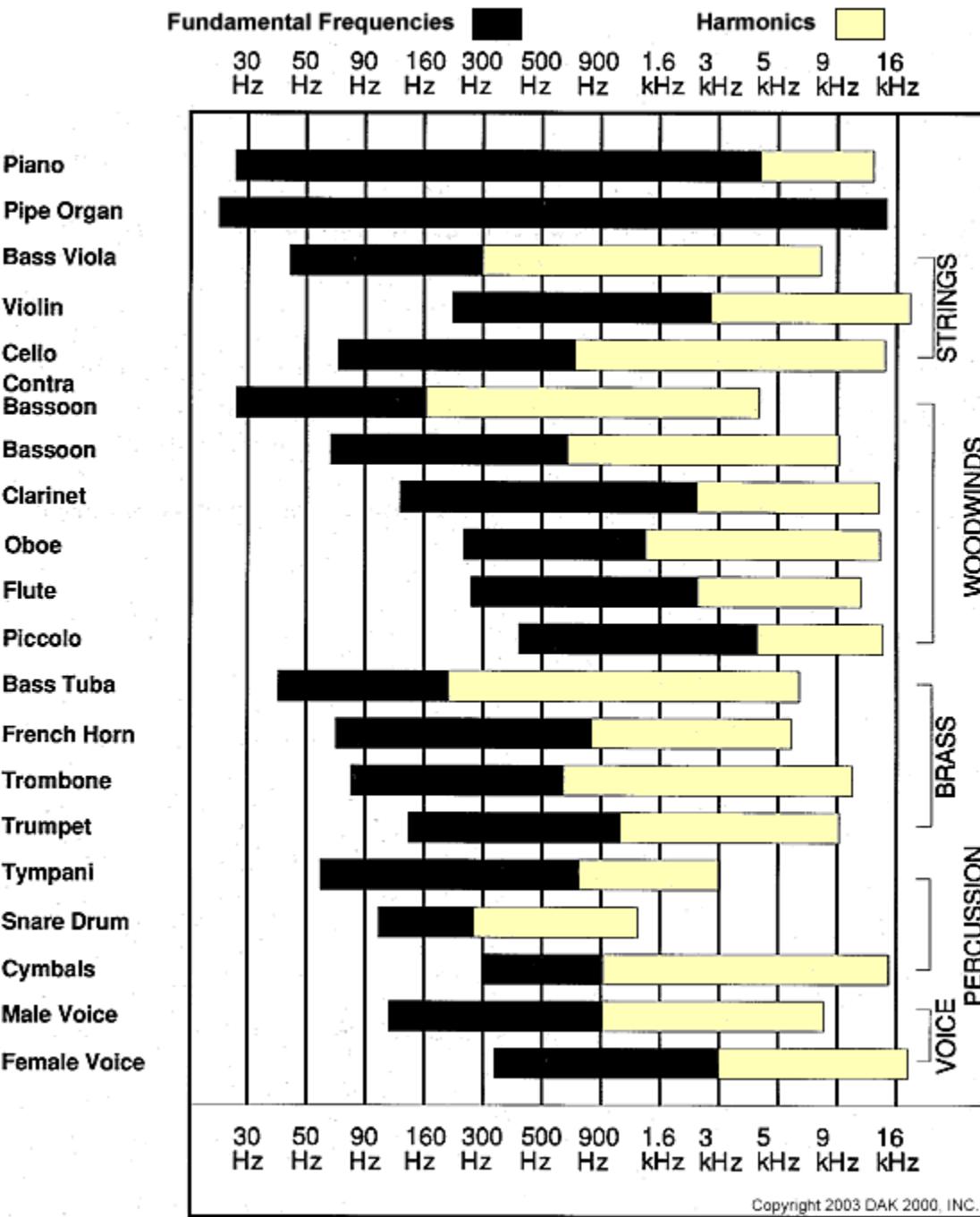
Instrumentos - Tipos

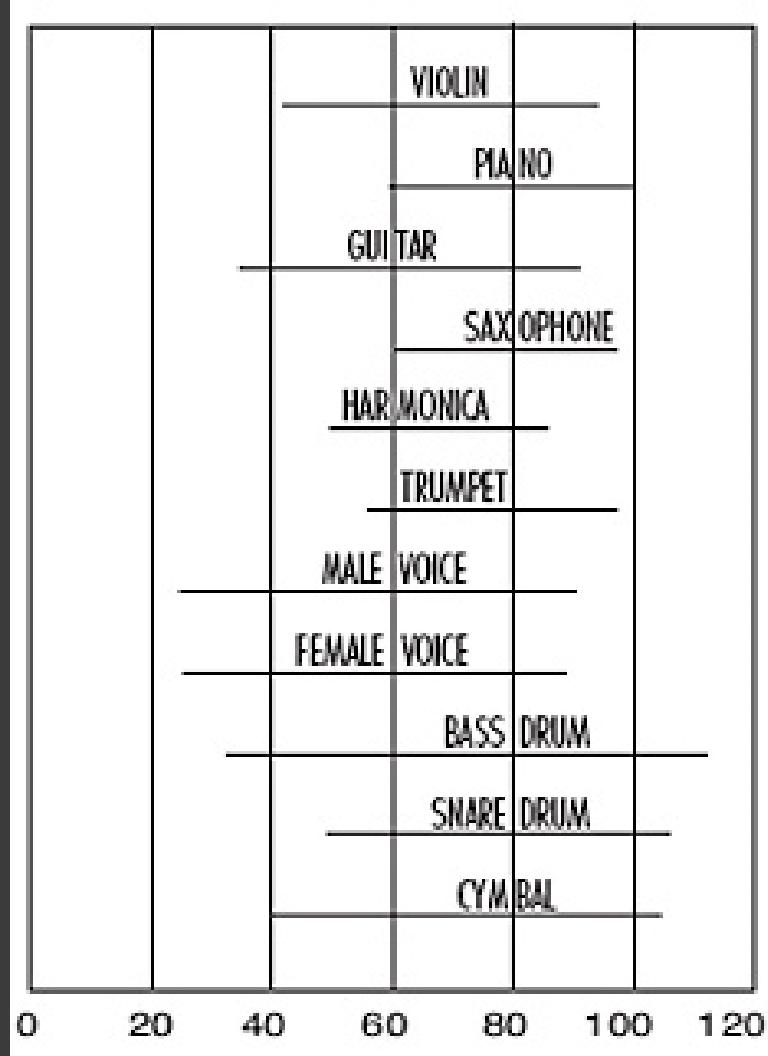
Instrumentos musicais elétricos/eletrônicos



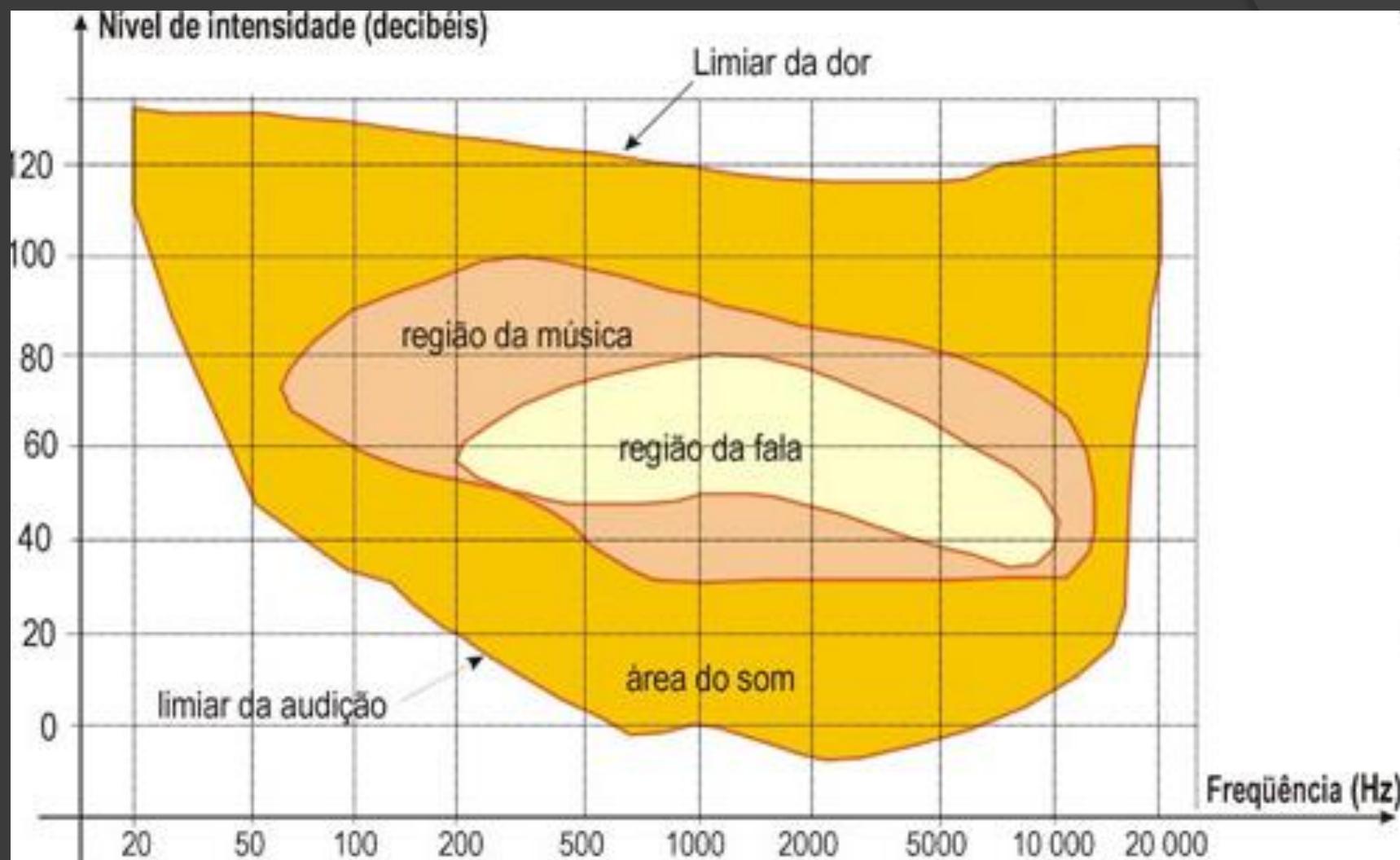
Um pouco de Física...

Approximate Frequency Ranges





Intensidade em dBs



Crescimento da Frequência

Diminui o comprimento de onda



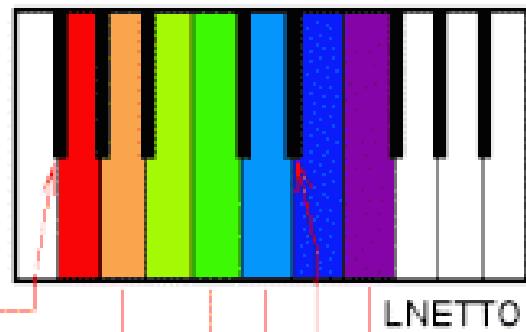
	400nm	500nm	600nm	700nm	
3	4	4	5	5	7
9	1	3	6	9	8
0	3	8	4	2	1
fa	Mi	re	do#	do	fa
	Mi	b	re	do	sol#
			si	la#	la
				sol#	sol
					fa#
					349,2 Hz
					370 Hz invisivel
					392,00 Hz
					415,30 Hz
					440 Hz
					466,20
					493,90
					523,30
					554,40
					587,3
					622,3
					659,3
					698,5

381,7 nm ————— Visivel ————— 763,4 nm

714,8 Hz

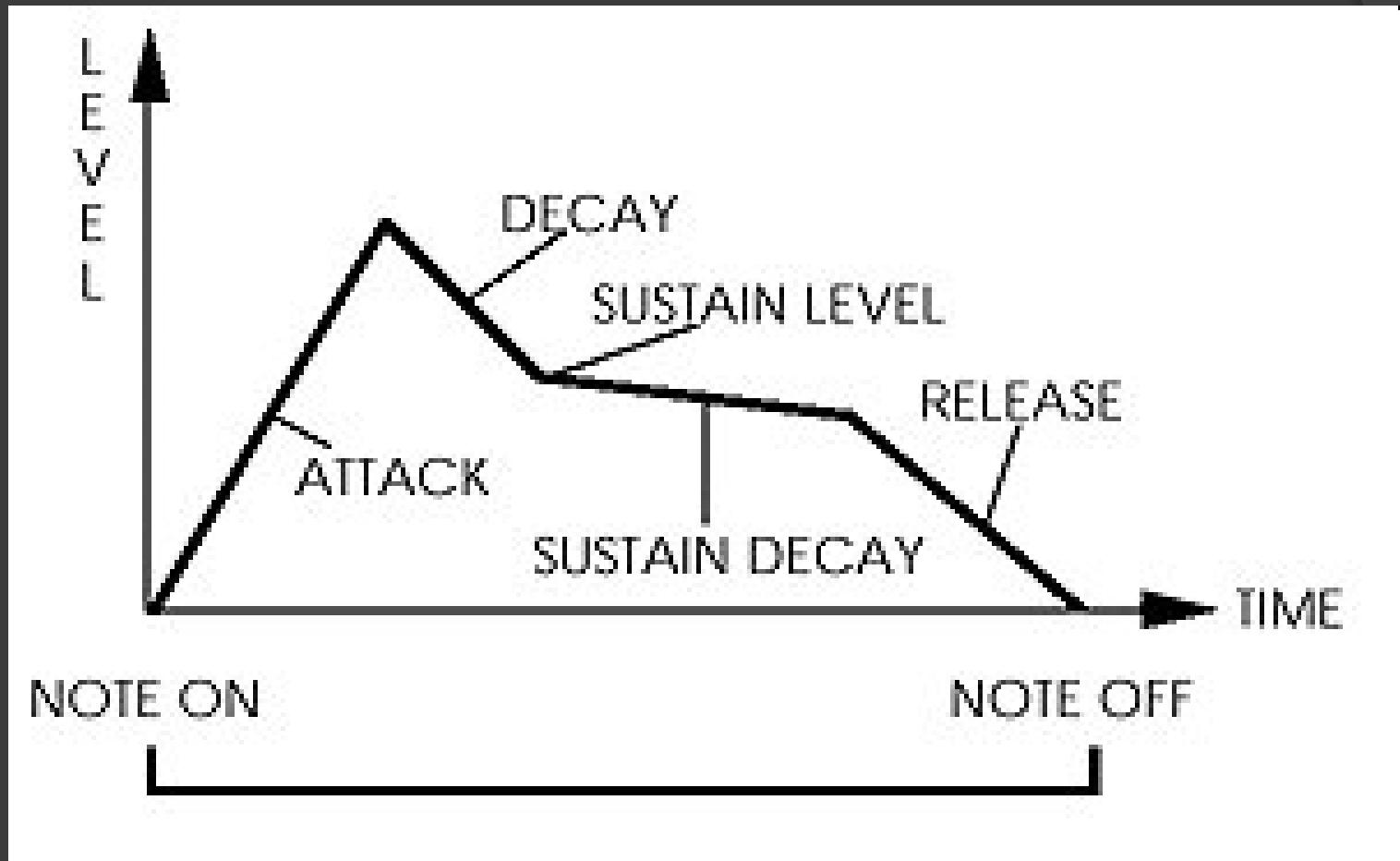
CORRESPONDÊNCIA ENTRE SONS E CORES

Crescimento das frequencias



LNETTO

Envoltória



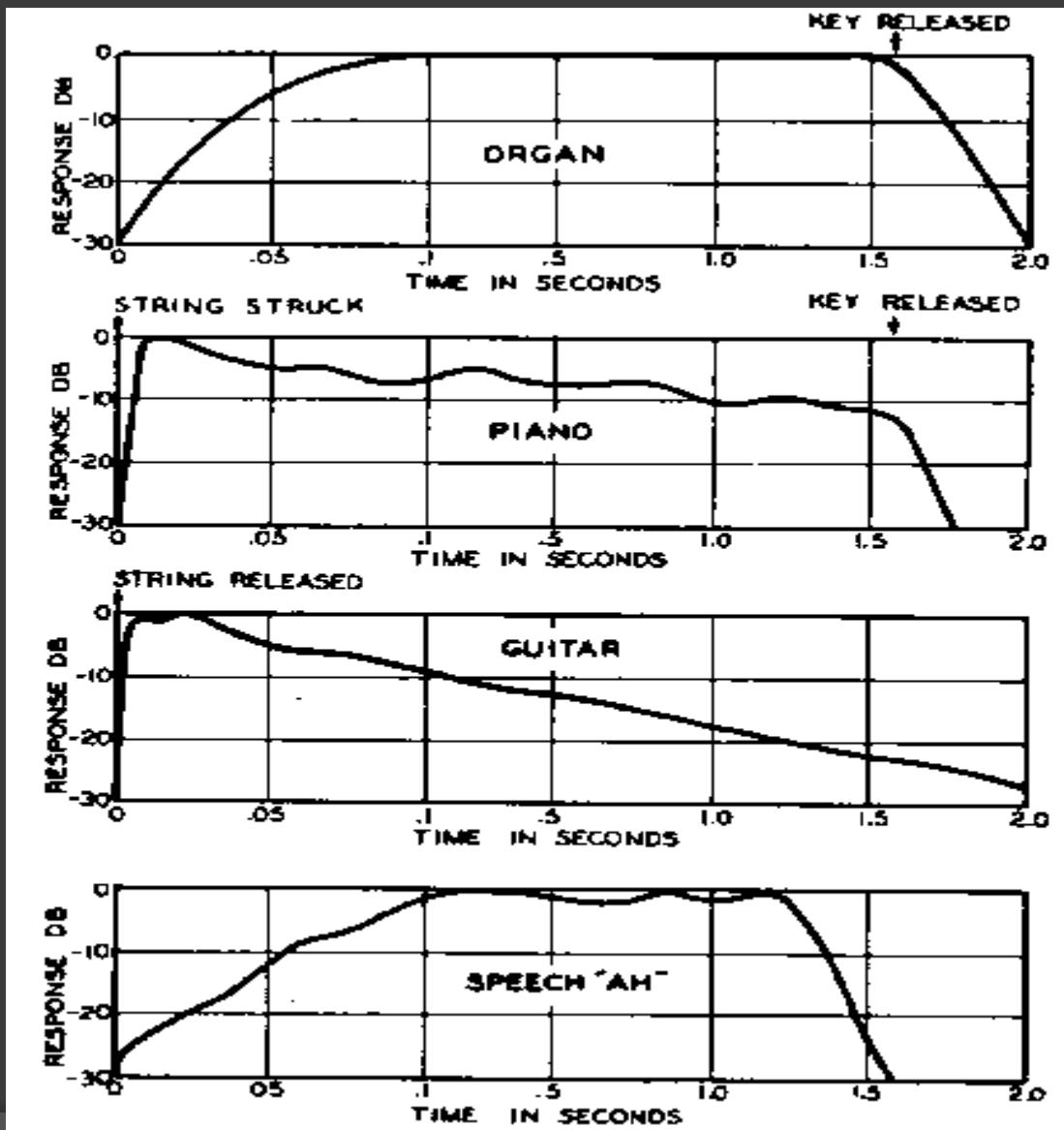
Ataque (attack): É o transiente inicial do som, isto é, o tempo que o som leva para sair do "zero" (disparado por "Note On") e atingir um ponto de máximo; é ele quem determina, por exemplo, se um som é percussivo ou não.

Decaimento (decay): É o tempo decorrido desde o fim do ataque (ponto de máximo) até o ponto em que o som se sustenta no próximo estágio.

Sustentação (sustain): Este terceiro estágio pode ser definido como um período de tempo ou não, pois se enquanto a nota estiver sendo executada a sustentação for permanente (como num som de órgão), o tempo poderá ser infinito; portanto o estágio de sustentação é definido mais como um nível do que como um período.

Relaxamento (release): É o tempo que o som leva para ir do ponto de sustentação até o repouso final (zero), e nos sons sustentados, como o órgão, é disparado quando se solta a tecla ("Note Off").

Exemplos de duração/envoltória



Um pouco de Música...

Música

Como relacionamos a Música com a Física?

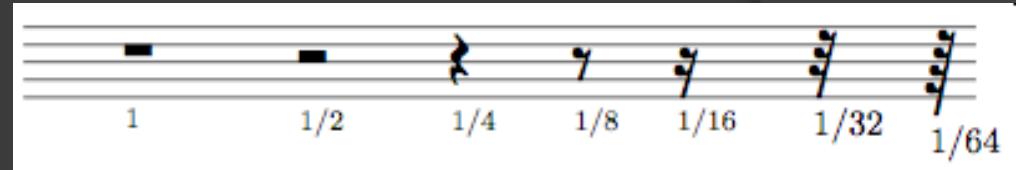
Altura (Dó, Ré, Mi, ...) → Freqüência (Hz)

Volume (ppp, pp, ..., fff) → Potência (dB)

Duração (semibreve, ...) → Duração (s)

Timbre (Violão, ...) → Espectro, Envoltória

Pausas



Tempo e Compasso

Notas

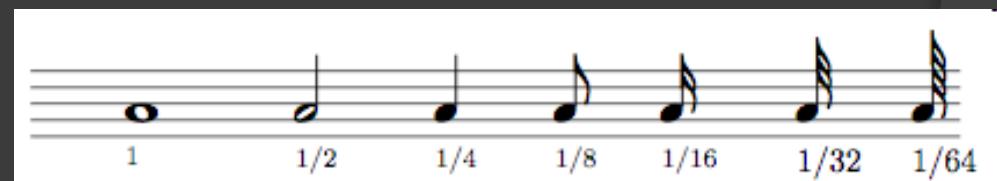
Longa Semibreve Semínima Semicolcheia Semifusa
Breve Minima Colcheia Fusa Quartifusa

A blue circle highlights the first note (Longa) on the staff. A blue arrow points from the word "Tempo e Compasso" to the staff.

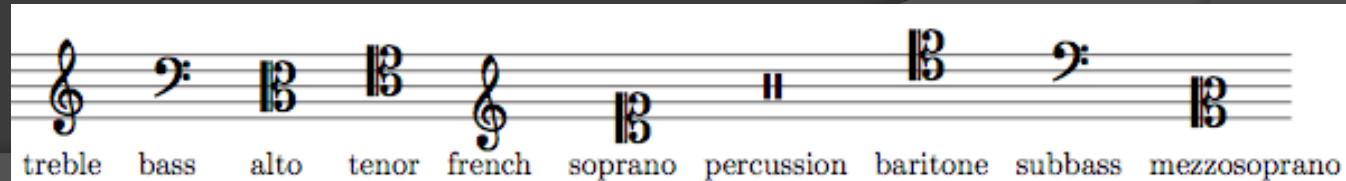
Tonalidade



Duração



Alturas



Clave de Sol

A musical staff in G clef (soprano) showing a sequence of eighth notes. Below the staff, the notes are labeled with their corresponding musical names: Do Re Mi Fá Sol Lá Si Do Ré Mi Fá Sol Sol(3).

Clave de Fá
(4ª linha)

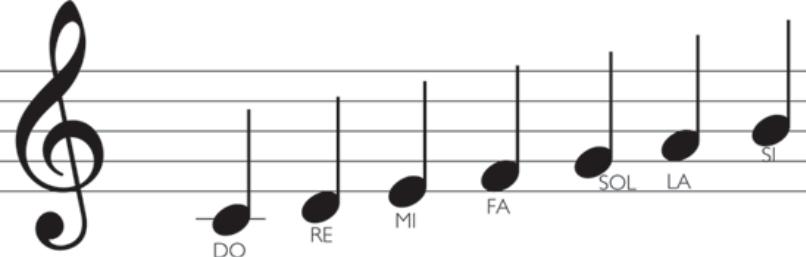
A musical staff in C clef (bass) showing a sequence of eighth notes. Below the staff, the notes are labeled with their corresponding musical names: Mi Fá Sol Lá Si Do Ré Mi Fá Sol Lá Si Fá(2).

Clave de Do
(4ª linha)

A musical staff in C clef (bass) showing a sequence of eighth notes. Below the staff, the notes are labeled with their corresponding musical names: Si Do Ré Mi Fá Sol Lá Si Do Ré Mi Fá Do(3).

Clave de Do
(3ª linha)

A musical staff in C clef (bass) showing a sequence of eighth notes. Below the staff, the notes are labeled with their corresponding musical names: Ré Mi Fá Sol Lá Si Do Ré Mi Fá Sol Lá Do(3).



Origem do nome das notas «dó ré mi fá sol lá si»

Guido d'Arezzo
(992 - 1050)

Giovanni Battista Doni

Do

*Ut queant laxis,
Resonare fibris,
Mira gestorum,
Famuli tuorum,
Solve polluti,
Labii reatum.*

Sante Iohannes

"Para que os teus servos
possam cantar as maravilhas
dos teus atos admiráveis,
absolve as faltas dos seus
lábios impuros"

Texto de Paolo Diacono



A Guido d'Arezzo é também atribuída a invenção da "Mão Guidoniana".

Cada articulação da MÃO DE GUIDO foi associada a um intervalo da escala de tal modo que os meninos do coro de Arezzo sabiam exatamente qual nota deviam cantar.

O Manosolfa ou Solfejo, como ficou conhecido esse sistema, foi rapidamente adotado pelos estudantes de canto para a memorização dos exercícios vocais.

Altura

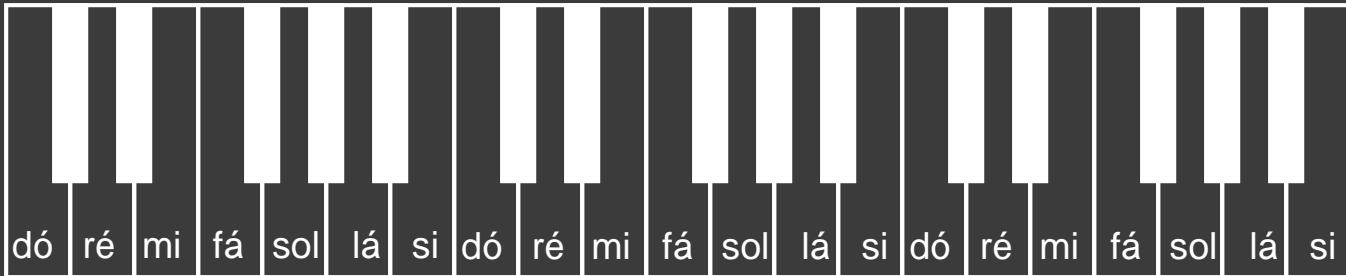
● Correspondência

- toda altura corresponde a uma freqüência
exemplo: Lá 4 = 440 Hz

● Em música: Altura

- nome (Dó, Ré, Mi, Fá, Sol, Lá, Si)
- acidente (sustenido, bemol, etc.)
- oitava (0,1,2,...,9)

Intervalo



- ◎ É a distância entre duas notas ou razão de freqüências
 - intervalo(dó, ré) = tom
 - intervalo(mi, fá) = semi-tom
 - intervalo(mi, fá#) = tom
 - intervalo (dó, mi) = 2 tons

Intervalo Acústico

- O denominado intervalo acústico entre duas notas, que pode ser definido como a razão entre duas freqüências f_1 e f_2 , sendo $f_1 > f_2$.
 - Em decorrência da própria definição, o intervalo acústico I será sempre maior ou igual a 1 (quando $I = 1$, $f_1 = f_2$).
- $I = f_1 / f_2$

Intervalo Acústico

- Temos duas maneiras distintas de alterar o tom de uma nota (acidente):
 - A primeira delas é aumentar a freqüência (sustenido) e a segunda é reduzir a freqüência (bemol).
- Sustenir uma nota consiste em aumentar a sua freqüência, multiplicando-a por $25/24$.
 - Para indicar que uma nota foi sostenida, usamos o sinal  à direita da nota.
- Bemolizar uma nota significa diminuir a sua freqüência, multiplicando-a por $24/25$.
 - Para indicar que uma nota foi bemolizada, usamos o sinal  à direita da nota.

Intervalo Acústico - Exemplos

- Exemplo: A nota lá tem a freqüência de 440 Hz. Calcular a freqüência do lá sostenido e do lá bemol:
 - Sendo lá = 440 Hz, temos:
 - a) lá \sharp = lá. $(25/24)$ = 458,33 Hz.
 - b) lá \flat = lá. $(24/25)$ = 422,4 Hz.

Intervalo Musical

- Duas notas, quando tocadas simultaneamente (ao mesmo tempo) podem soar de forma a combinarem entre si, ou de forma tensa e áspera.
 - Os intervalos que sentimos como estando em combinação são chamados de **Consoantes** e os ásperos ou tensos, são chamados de **Dissonantes**
 - Essa sensação, depende exclusivamente da razão entre as freqüências dos sons, embora varie de ouvinte para ouvinte a nível sensitivo.

Intervalo Musical

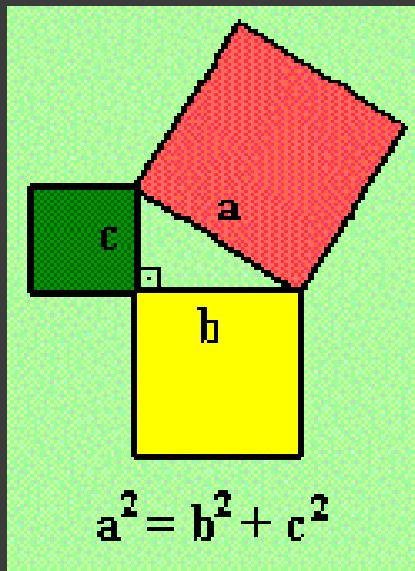
- Os intervalos consonantes são expressos por frações em que o numerador e o denominador são termos menores que 6: Intervalo de quarta (dó-fá): $4/3$. Intervalo de quinta (dó-sol): $3/2$.
- Os intervalos dissonantes são expressos por frações cujos termos aparecem inteiros maiores que o número 6: Intervalo de sétima maior (dó-si): $15/8$. Intervalo de segunda maior (dó-ré): $9/8$.

Intervalos

Razão	Intervalo
1	Fundamental
$\frac{9}{8}$	Segunda
$\frac{5}{4}$	Terça
$\frac{4}{3}$	Quarta
$\frac{3}{2}$	Quinta
$\frac{5}{3}$	Sexta
$\frac{15}{8}$	Sétima
2	Oitava

História da Física da Música

Pitágoras de Creta (ca. 580-500)



- Acreditava na "racionalidade" da Natureza
- Filosofia baseada em números inteiros
- Descobriu a lei das cordas

Pitágoras e o Monocórdio



1:1 - Uníssono

2:1 - Oitava

3:2 - “Quinta Justa”

5:4 - “Terça Maior”

Conclusão: Cordas com comprimentos que são razões inteiras dos outros soam consoantes

Quartas e Quintas

Os pitagóricos basearam sua escala em Quartas e Quintas, que eram consideradas harmonicamente “puras”:



- A quarta era subdividida em dois tons (intervalo inteiro) e um meio-tom (meio intervalo).
 - Esse arranjo de intervalos é chamado tetracórdio
 - Dois tetracórdios podem ser concatenados (separados por um intervalo inteiro) para criar uma escala diatônica.

Tetracórdios

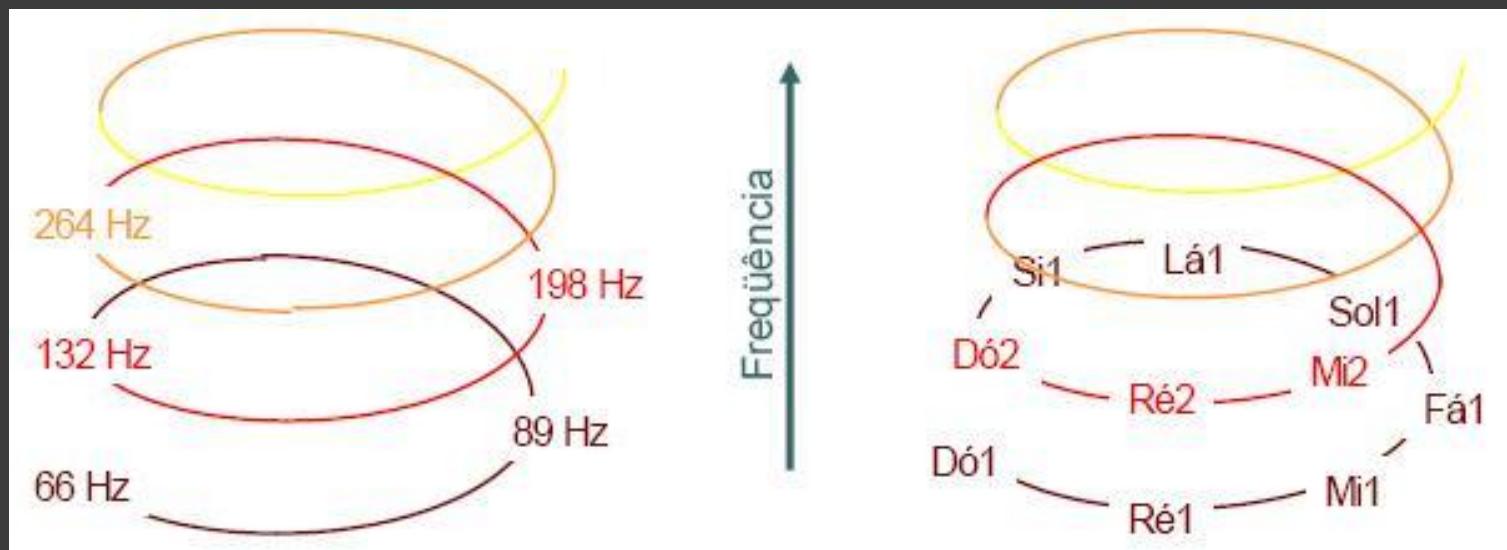
A musical staff in treble clef. The first four notes are labeled "1º Tetracorde" and the next three are labeled "2º Tetracorde". Below the staff, the notes are labeled with intervals: T, T, St, (T), T, T, St. The notes are connected by vertical stems pointing downwards.

1º Tetracorde 2º Tetracorde

T T St (T) T T St

Oitava

- Intervalo entre duas freqüências com razão 2:1
- Sensação auditiva de mesma nota em alturas diferentes

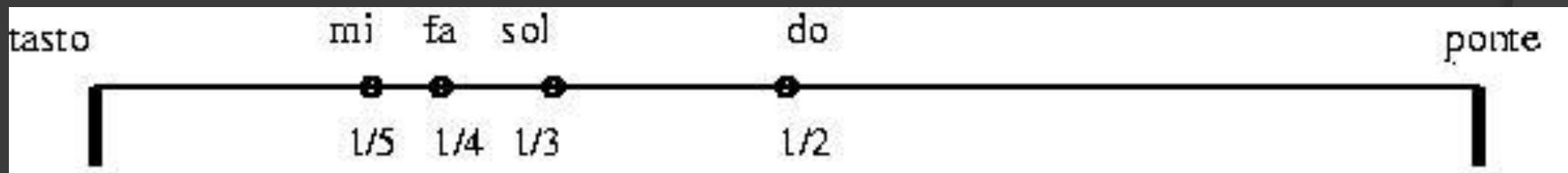


Escalas Musicais

- Teoria da Música é baseada em princípios físicos.
- Convenções Musicais são a base da história e da invenção.
- "Música Ocidental" é baseada (aproximadamente) na razão de números inteiros.

Escalas Musicais

Quando submetida a uma certa tensão, se a corda vibra em toda a sua extensão, ela produz um som de uma certa freqüência, que se convencionou chamar de dó. O instrumentista varia o comprimento da corda vibrante, pondo o dedo em certas posições na corda. O que Pitágoras fez foi dividir a corda segundo a seqüência de frações. Assim foram obtidas as notas que hoje nós chamamos dó, sol, fá, mi.



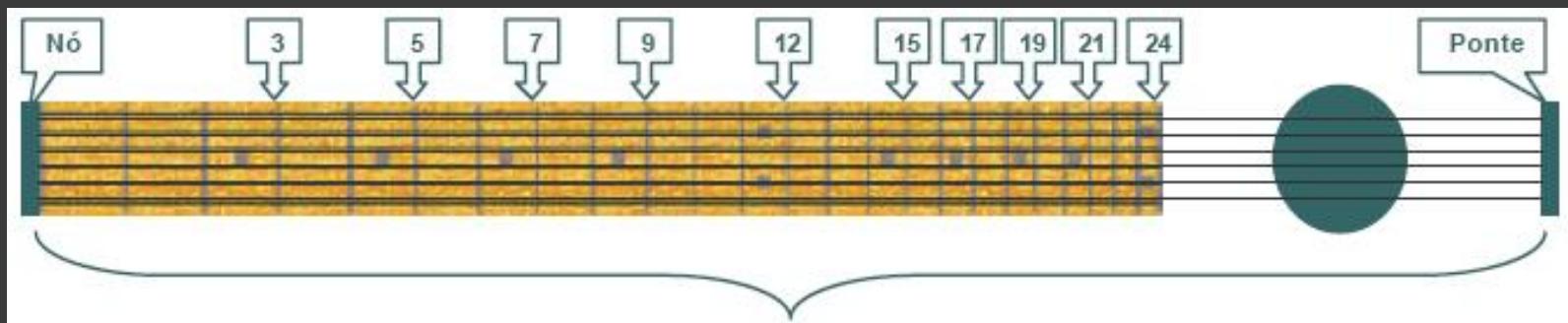
Série Harmônica

- Vibração de uma corda produz modos de vibração que são múltiplos inteiros da fundamental (harmônicos)
- Razões de Freqüência
 - 2:1, 3:2, 4:3, 5:3, 5:4, 6:5, 8:5, etc...
 - 2:1 = oitava
- Escala
 - Série de sons ordenados ascendentemente com intervalos de freqüência definidos a partir da série harmônica

Freqüênciia Fundamental

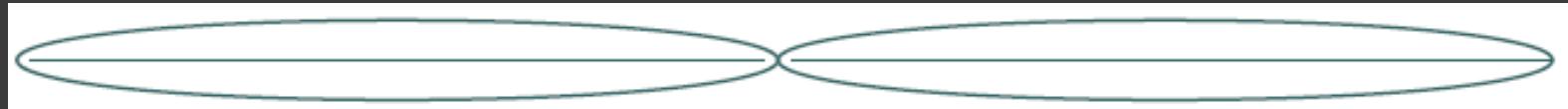


A corda vibra em toda a sua extensão,
produzindo um “tom puro”, f_1



A afinação é função do comprimento, material e tensão da corda.

Segundo Harmônico



A corda também vibra em movimentos simultâneos contrários, dividindo-se em duas

$$2f = 2 \times f_1 == \text{Fundamental} + 1 \text{ Oitava}$$

Terceiro Harmônico



A corda também vibra em movimentos simultâneos contrários, dividindo-se em três

$$3f = 3 \times 1f == \text{Fundamental} + 1 \text{ Oitava} + 1 \text{ Quinta}$$

Quarto Harmônico



A corda também vibra em movimentos simultâneos contrários, dividindo-se em quatro

$$4f = 4 \times 1f = \text{Fundamental} + 2 \text{ Oitavas}$$

Quinto Harmônico

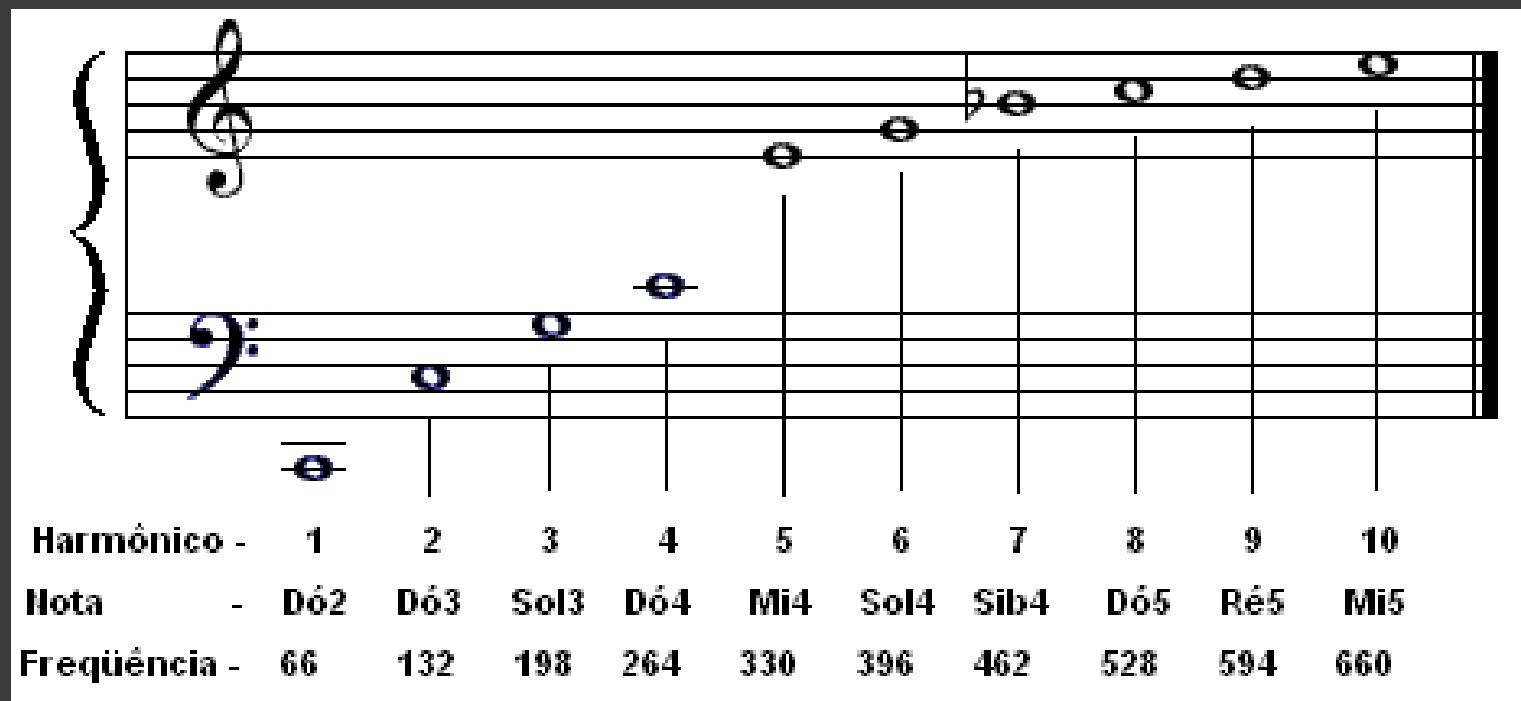


A corda também vibra em movimentos simultâneos contrários, dividindo-se em cinco

$$5f = 5 \times 1f == \text{Fundamental} + 2 \text{ Oitavas} + 1 \text{ Terço}$$

A Série Harmônica

- Série Harmônica (apenas os dez primeiros harmônicos)
 - *Fundamental, 2f, 3f, 4f, 5f, 6f, 7f, etc...*



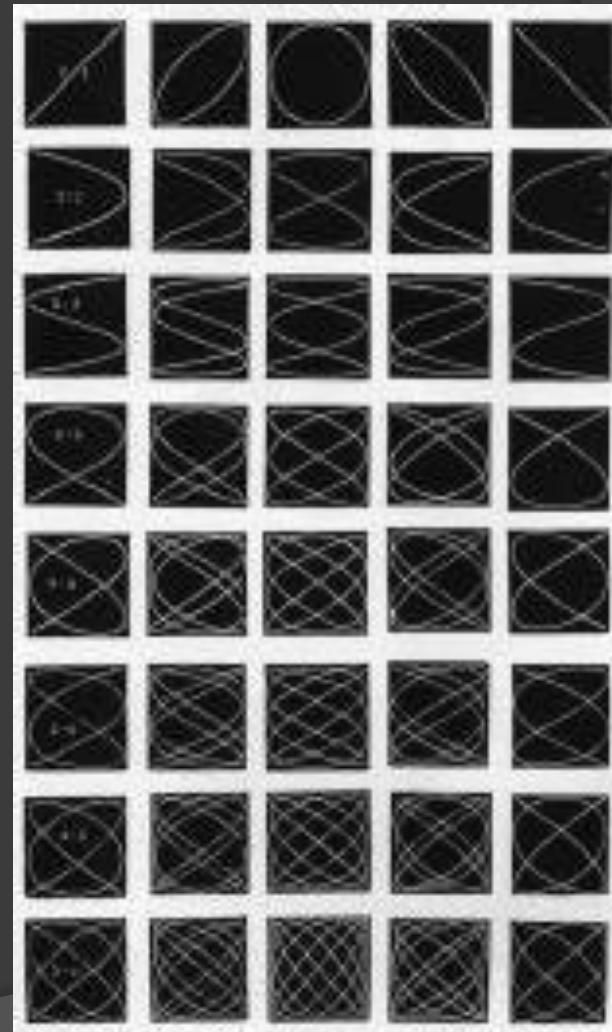
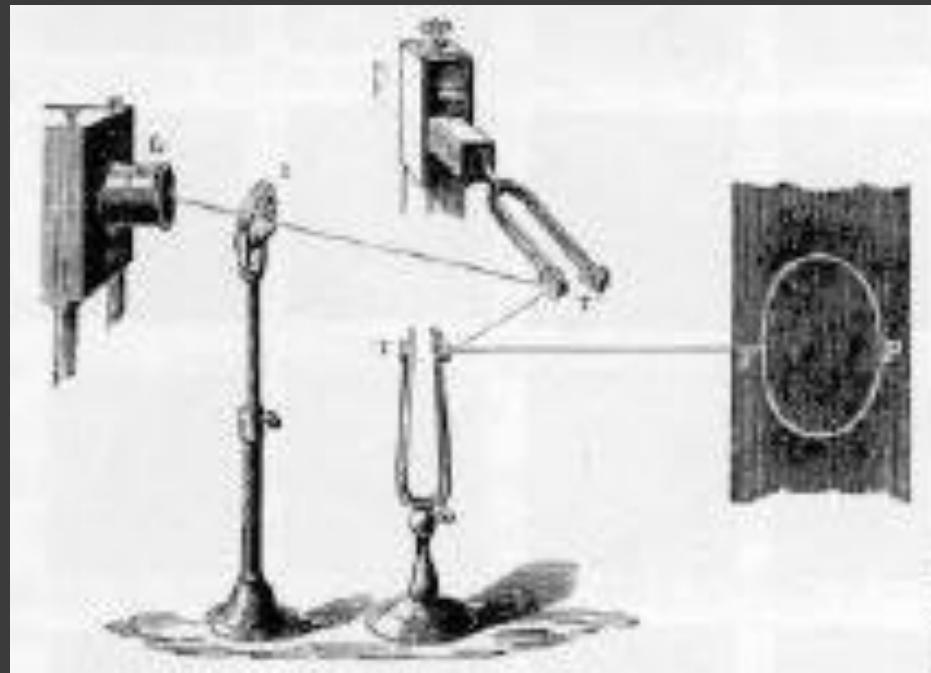
Afinação - Breve História

- Em 1619, o compositor Michael Praetorius sugeriu 425 Hz como um padrão de afinação (chamado "afinação de câmara")
 - Alturas maiores não eram recomendadas devido às técnicas de construção limitadas dos instrumentos de corda.
 - Em 1855, o Físico francês Jules Lissajous desenvolveu uma técnica para calibrar diapasões, sugerindo 435 Hz como a altura padrão.
 - O governo Francês (Napoleão) adotou 435 Hz em 1859
 - Adotado internacionalmente em 1885 em uma conferência em Viena

Afinação - Figuras de Lissajous

- O equipamento de Lissajous refletia um feixe luminoso a partir de espelhos posicionados nos diapasões.
 - Luz produzia figuras que podiam determinar as freqüências relativas dos diapasões, baseado em razões de intervalo padrão.

Afinação - Figuras de Lissajous



Afinação - Figuras de Lissajous

- A técnica básica é usada até hoje!!
- Porém hoje são utilizados modernos osciloscópios gráficos, que decompõe o som gerando gráficos, simulando o mesmo padrão.

Afinação - Breve História

- A era industrial (fim dos 1800s) levou a melhorias em metalurgia e técnicas de construção de instrumentos.
 - Esta melhoria permitiu um aumento no padrão de afinação, dando mais brilho à orquestra
- A afinação de 440 Hz foi adotado nos EUA a partir de 1939
 - Orquestras modernas (especialmente na Europa) usam 442 ou mesmo 445 como afinação de referência.

Afinação Acústica

- É feita comparando a afinação do instrumento com uma afinação de referência (diapasão, por exemplo)
- Usa-se o batimento entre os sons, se estes estão desafinados.
 - Exemplo: 442 vs 440 tem batimento a 2 Hz
 - Este batimento, por ser de baixa freqüência, é audível na forma de ritmo
 - No caso, duas batidas por segundo (2 Hz)

Afinando de verdade

- Afinação apropriada de uma nota em um dado instrumento é afetada por muitos fatores, dos quais alguns podemos controlar, e outros não:
 - Psicoacústica
 - Características físicas do instrumento (como ele é construído)
 - Temperamento geral do instrumento (como ele é afinado)