



# A Física da Música

Prof.Dr. Edmilson Manganote  
[mangano@ifi.unicamp.br](mailto: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 frequências, 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 frequências, 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 música?

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.



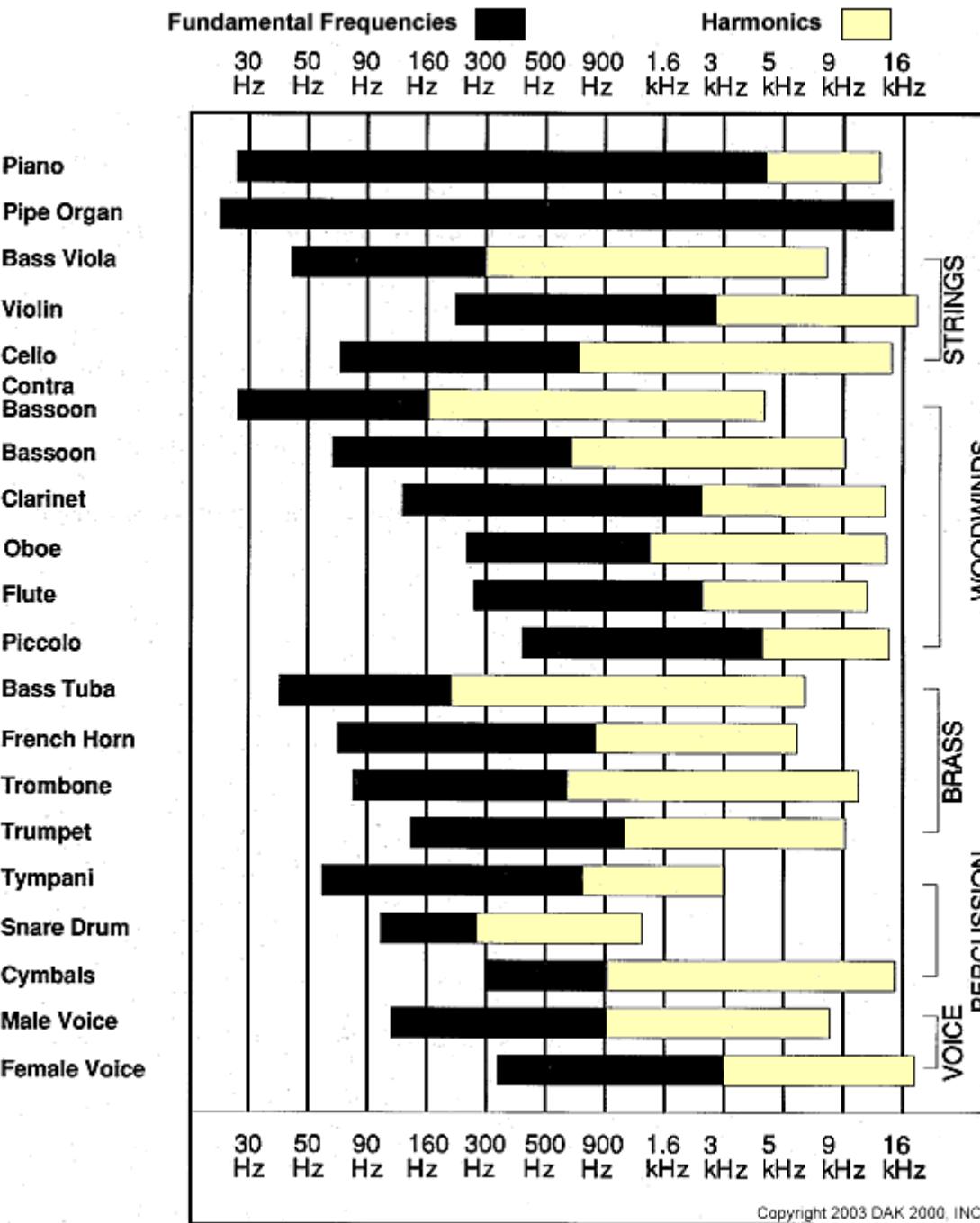
# Instrumentos - Tipos

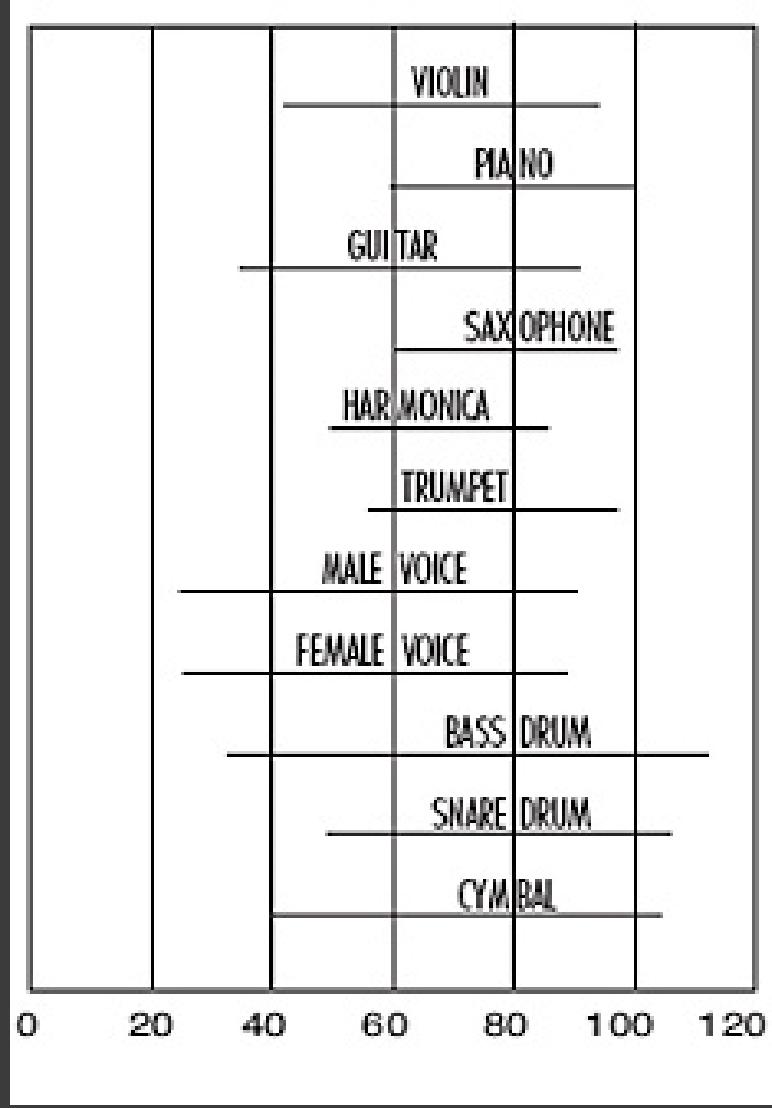
Instrumentos musicais elétricos/eletrônicos



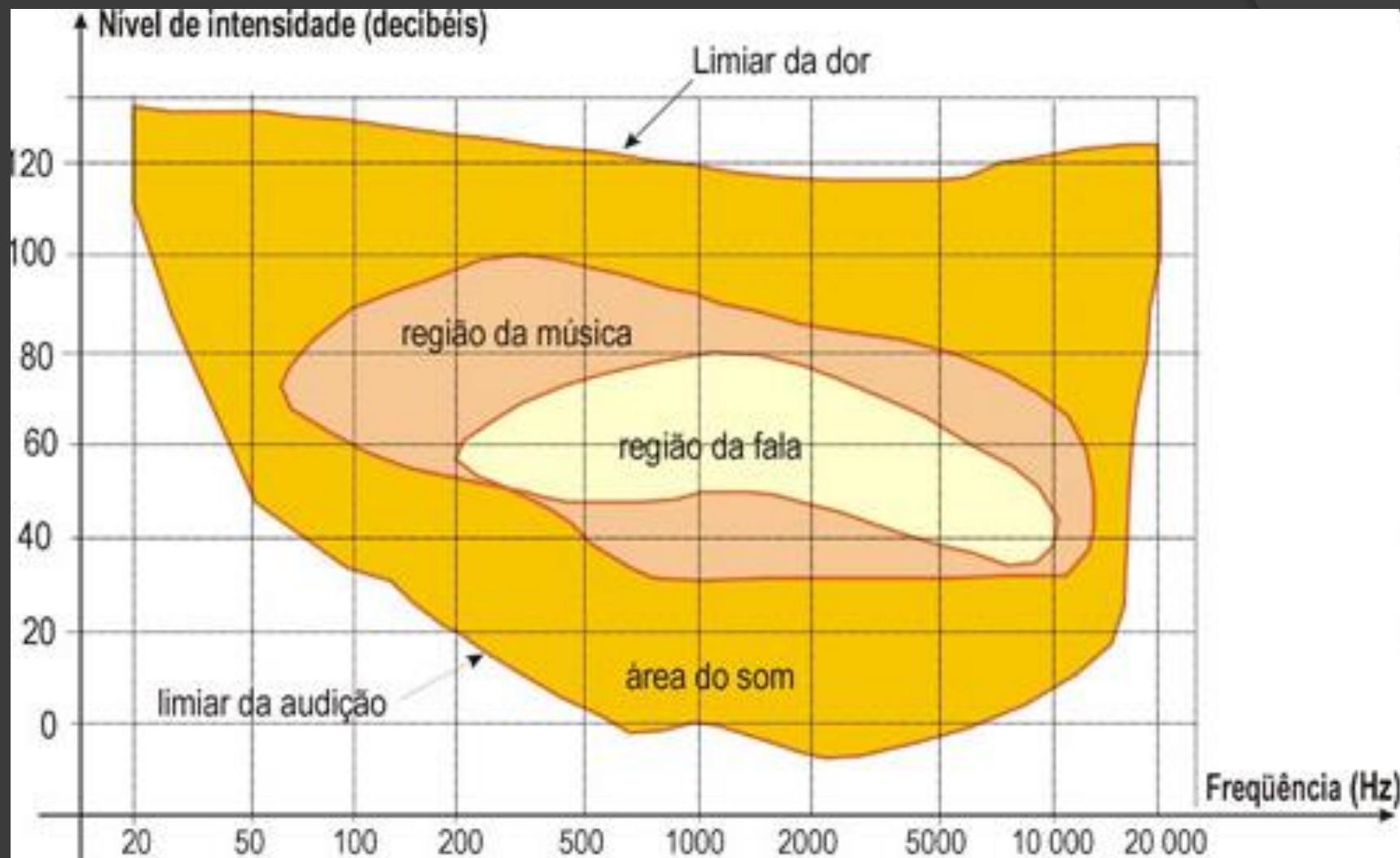
Um pouco de Física...

# Approximate Frequency Ranges



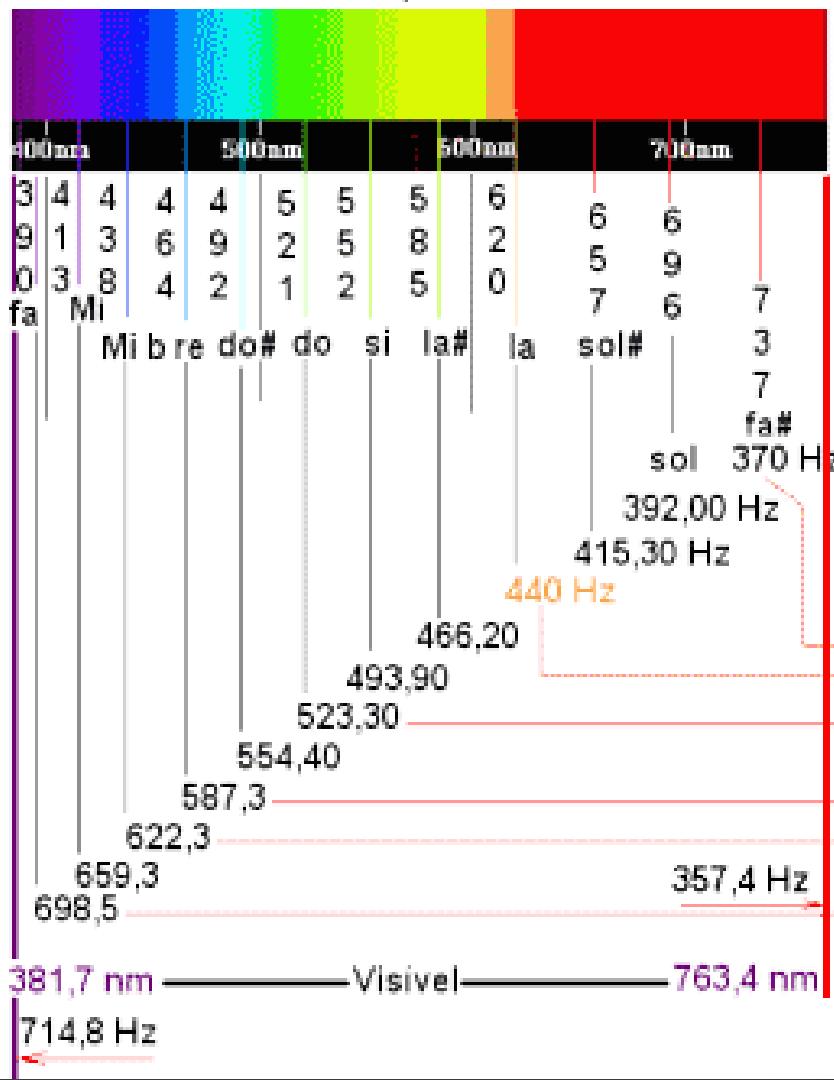


Intensidade em dBs



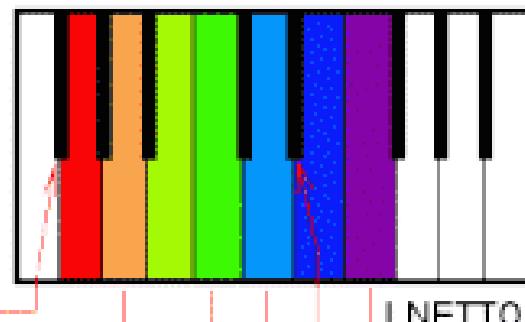
## Crescimento da Frequência

Diminui o comprimento de onda

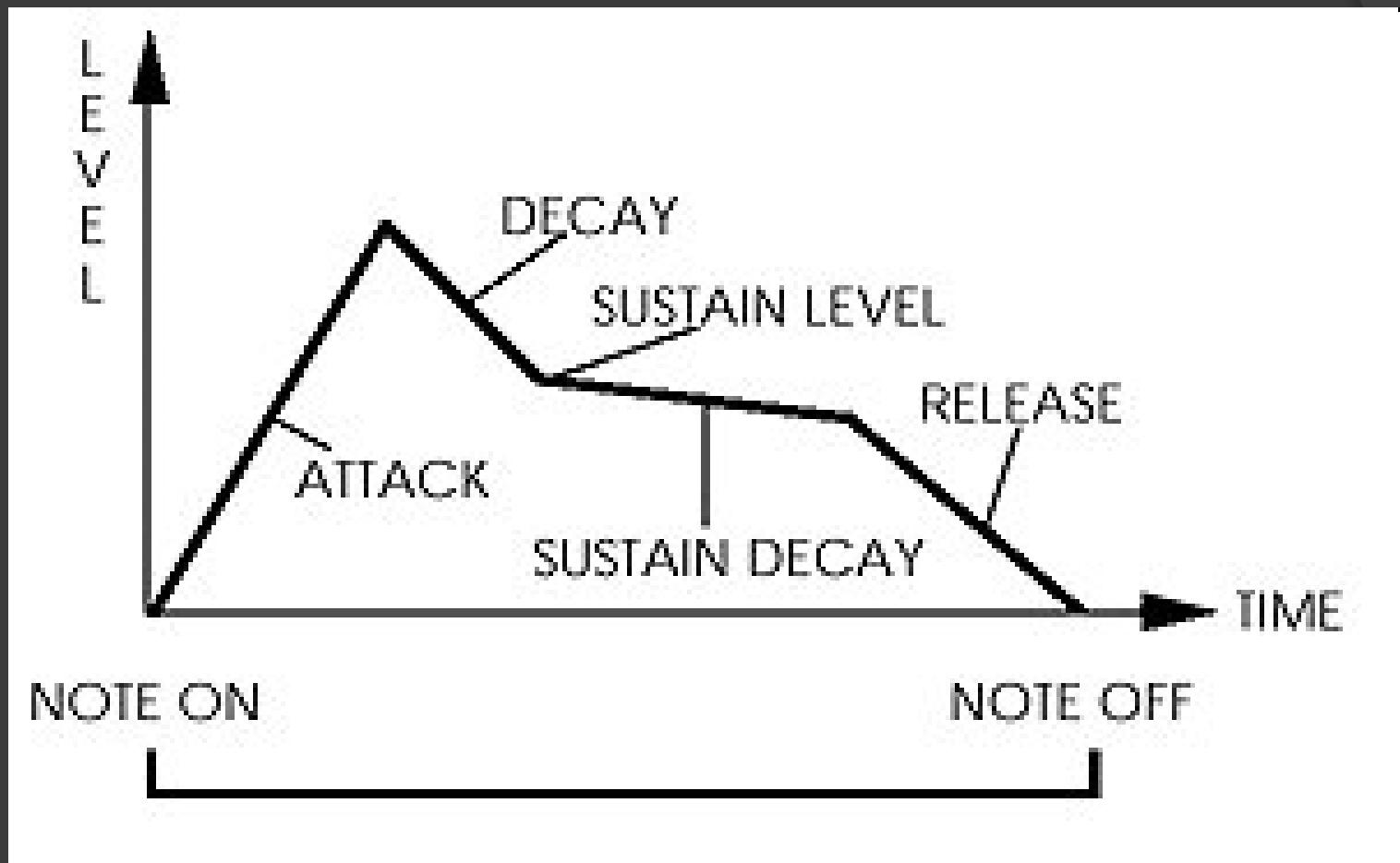


## CORRESPONDÊNCIA ENTRE SONS E CORES

Crescimento das frequências →



# Envoltória



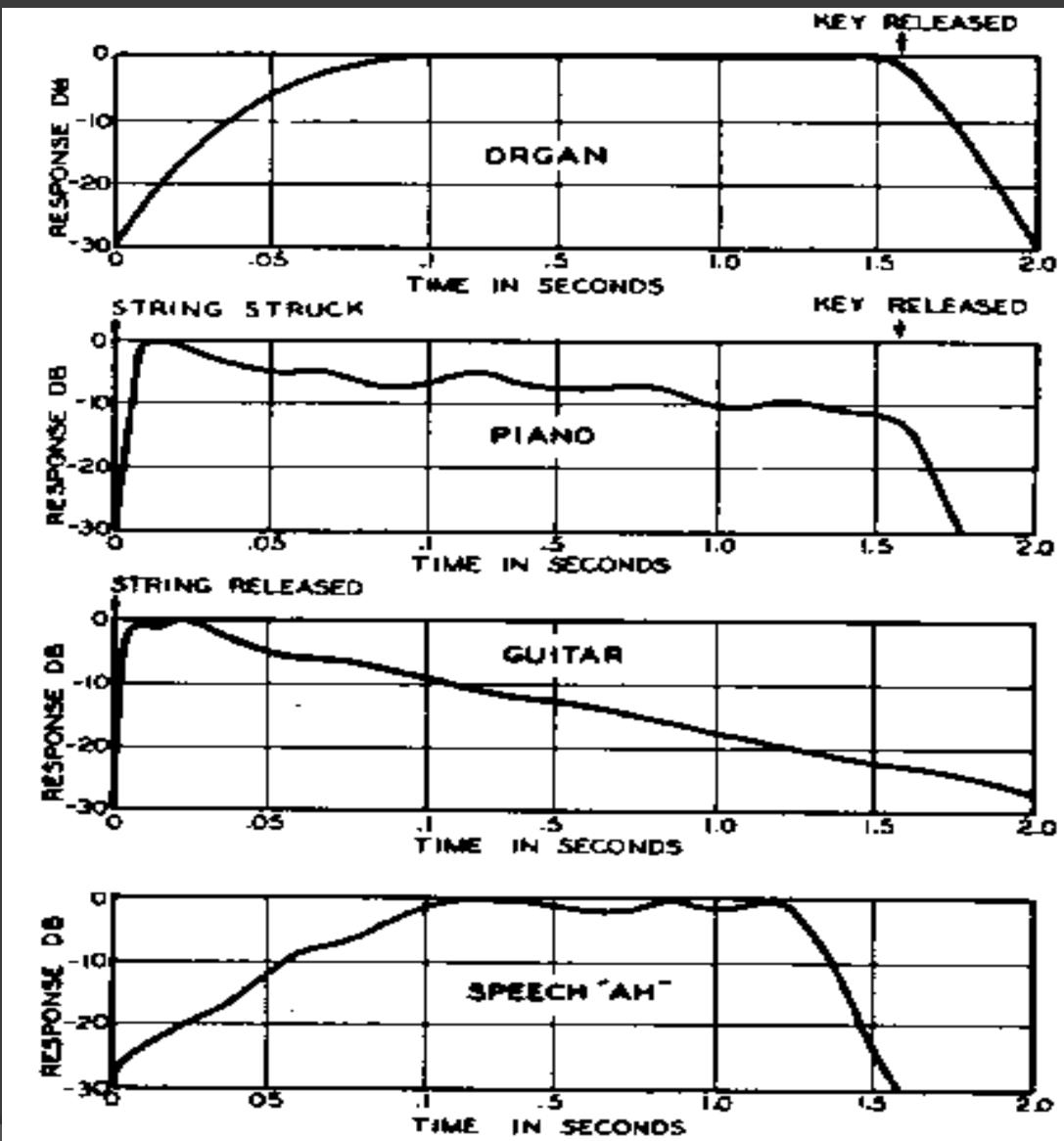
**Ataque (attack):** É o transiente inicial do som, isto é, o tempo que o som leva para sair do "zero" (disparado por "Note On") e atingir um ponto de máximo; é ele quem determina, por exemplo, se um som é percussivo ou não.

**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?

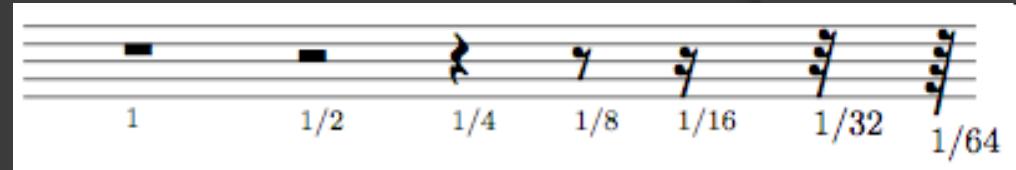
Altura (Dó, Ré, Mi, ...) → Frequência (Hz)

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

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

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

# Pausas



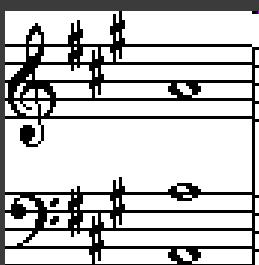
## Tempo e Compasso

Notas

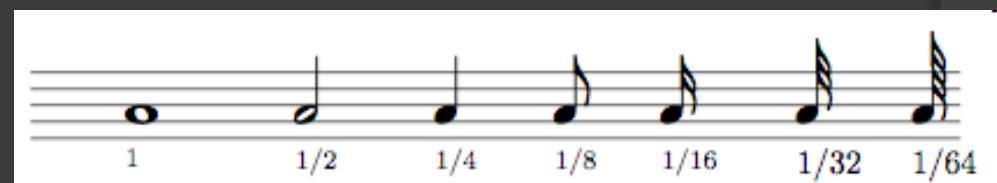
Longa      Semibreve      Semínima      Semicolcheia      Semifusa

Breve      Minima      Colcheia      Fusa      Quartifusa

## Tonalidade



## Duração



## Alturas



Clave de Sol

Musical staff for Clave de Sol. The staff begins with a treble clef, followed by a common time signature. The notes are: Do, Re, Mi, Fa, Sol, La, Si, Do, Ré, Mi, Fa, Sol, Sol(3). The notes are represented by vertical stems with small circles at the top.

Do Re Mi Fa Sol La Si Do Ré Mi Fa Sol Sol(3)

Clave de Fá  
(4ª linha)

Musical staff for Clave de Fá. The staff begins with a bass clef, followed by a common time signature. The notes are: Mi, Fá, Sol, La, Si, Do, Ré, Mi, Fá, Sol, La, Si, Fá(2). The notes are represented by vertical stems with small circles at the top.

Mi Fá Sol La Si Do Ré Mi Fá Sol La Si Fá(2)

Clave de Do  
(4ª linha)

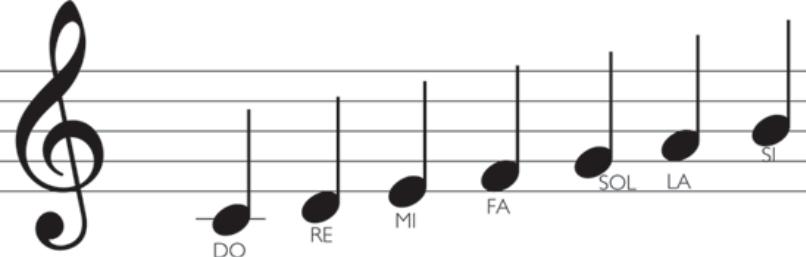
Musical staff for Clave de Do. The staff begins with a bass clef, followed by a common time signature. The notes are: Si, Do, Ré, Mi, Fá, Sol, La, Si, Do, Ré, Mi, Fá, Do(3). The notes are represented by vertical stems with small circles at the top.

Si Do Ré Mi Fá Sol La Si Do Ré Mi Fá Do(3)

Clave de Do  
(3ª linha)

Musical staff for Clave de Do. The staff begins with a bass clef, followed by a common time signature. The notes are: Ré, Mi, Fá, Sol, La, Si, Do, Ré, Mi, Fá, Sol, La, Do(3). The notes are represented by vertical stems with small circles at the top.

Ré Mi Fá Sol La Si Do Ré Mi Fá Sol La 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

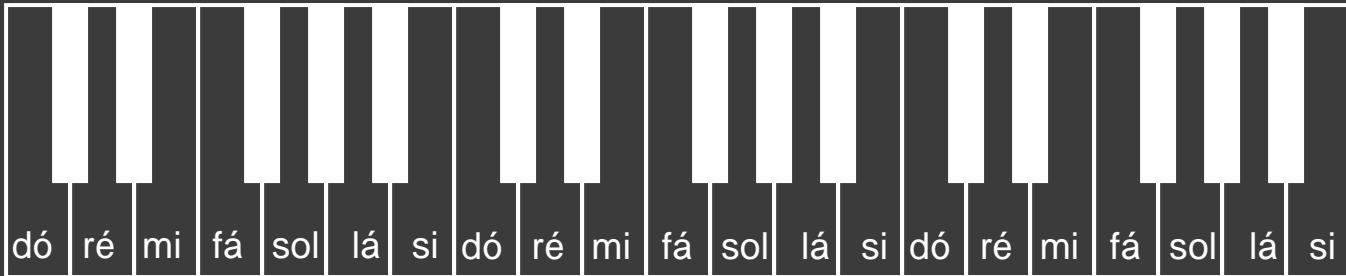
- Correspondência

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

- Em música: Altura

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

# Intervalo



- ◎ É a distância entre duas notas ou razão de frequências
  - 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 frequências  $f_1$  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 frequência (sustenido) e a segunda é reduzir a frequência (bemol).
- Sustenir uma nota consiste em aumentar a sua frequência, 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 frequência, 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 frequência de 440 Hz. Calcular a frequência do lá sostenido e do lá bemol:
  - Sendo lá = 440 Hz, temos:
    - a) lá  = lá. $(25/24)$  = 458,33 Hz.
    - b) lá  = lá. $(24/25)$  = 422,4 Hz.

# Intervalo Musical

- ➊ 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 frequências dos sons, embora varie de ouvinte para ouvinte a nível sensitivo.

# Intervalo Musical

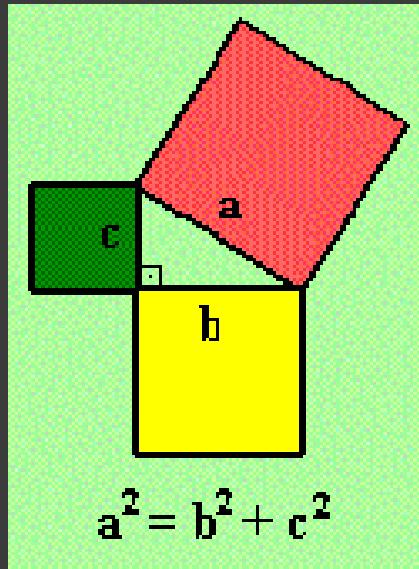
- Os intervalos consonantes são expressos por frações em que o numerador e o denominador são termos menores que 6: Intervalo de quarta (dó-fá):  $4/3$ . Intervalo de quinta (dó-sol):  $3/2$ .
- Os intervalos dissonantes são expressos por frações cujos termos aparecem inteiros maiores que o número 6: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

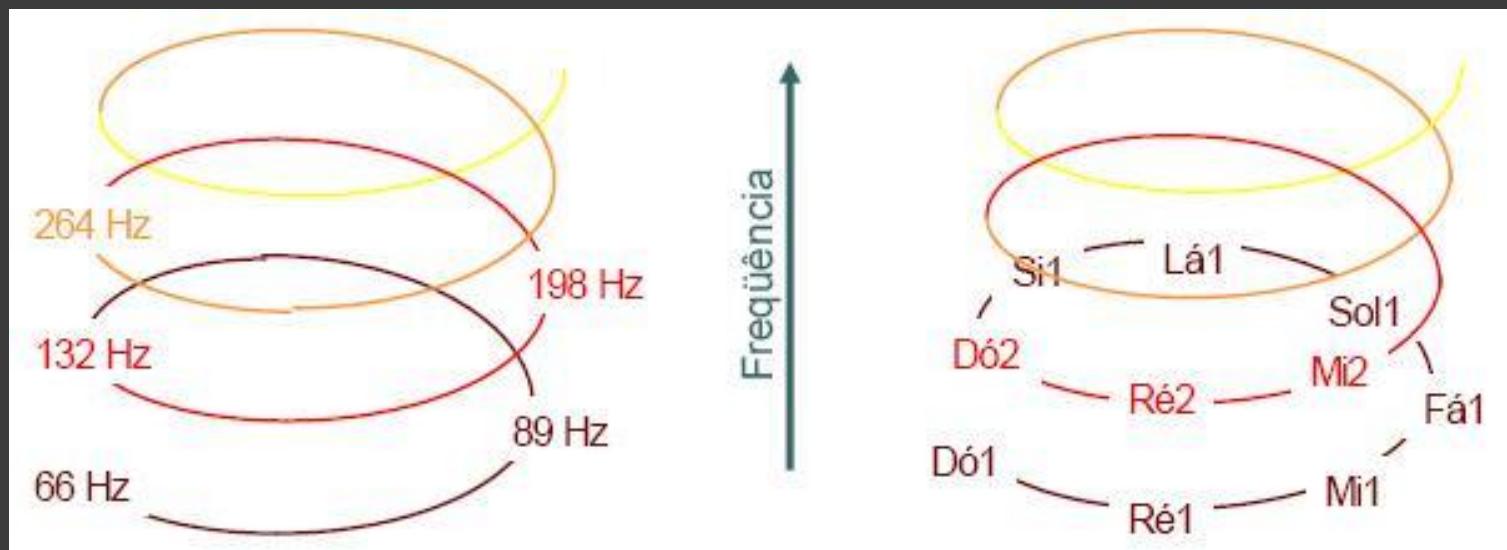
A musical staff in treble clef shows two tetracordos. The first tetracorde (1º Tetracorde) consists of four notes: G, B, D, and F. The second tetracorde (2º Tetracorde) consists of four notes: A, C, E, and G. Below the staff, the notes are labeled with vertical arrows indicating their position: T (Tonic), T (Tonic), St (Soprano), (T) (Tonic), T (Tonic), T (Tonic), and St (Soprano). The notes are represented by open circles with stems.

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

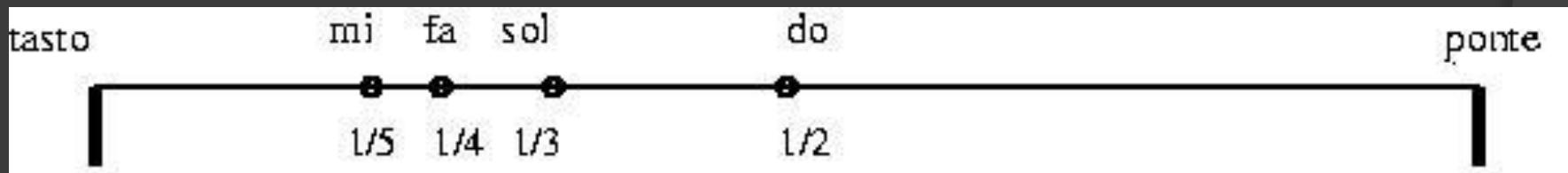


# Escalas Musicais

- 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.



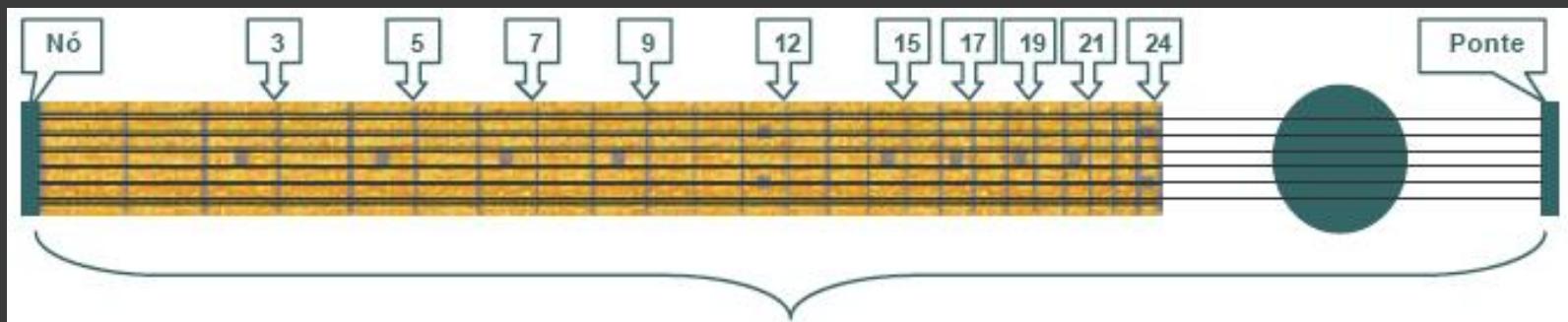
# Série Harmônica

- Vibração de uma corda produz modos de vibração que são múltiplos inteiros da fundamental (harmônicos)
- Razões de Frequência
  - 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 frequência definidos a partir da série harmônica

# Frequênciá Fundamental

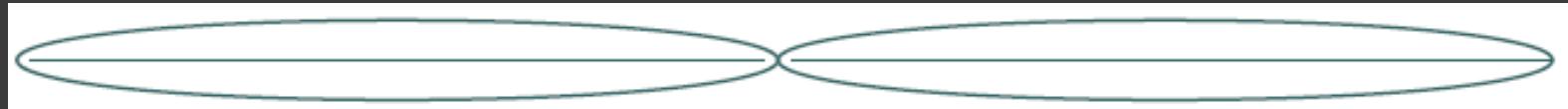


A corda vibra em toda a sua extensão, produzindo um “tom puro”,  $f_1$



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

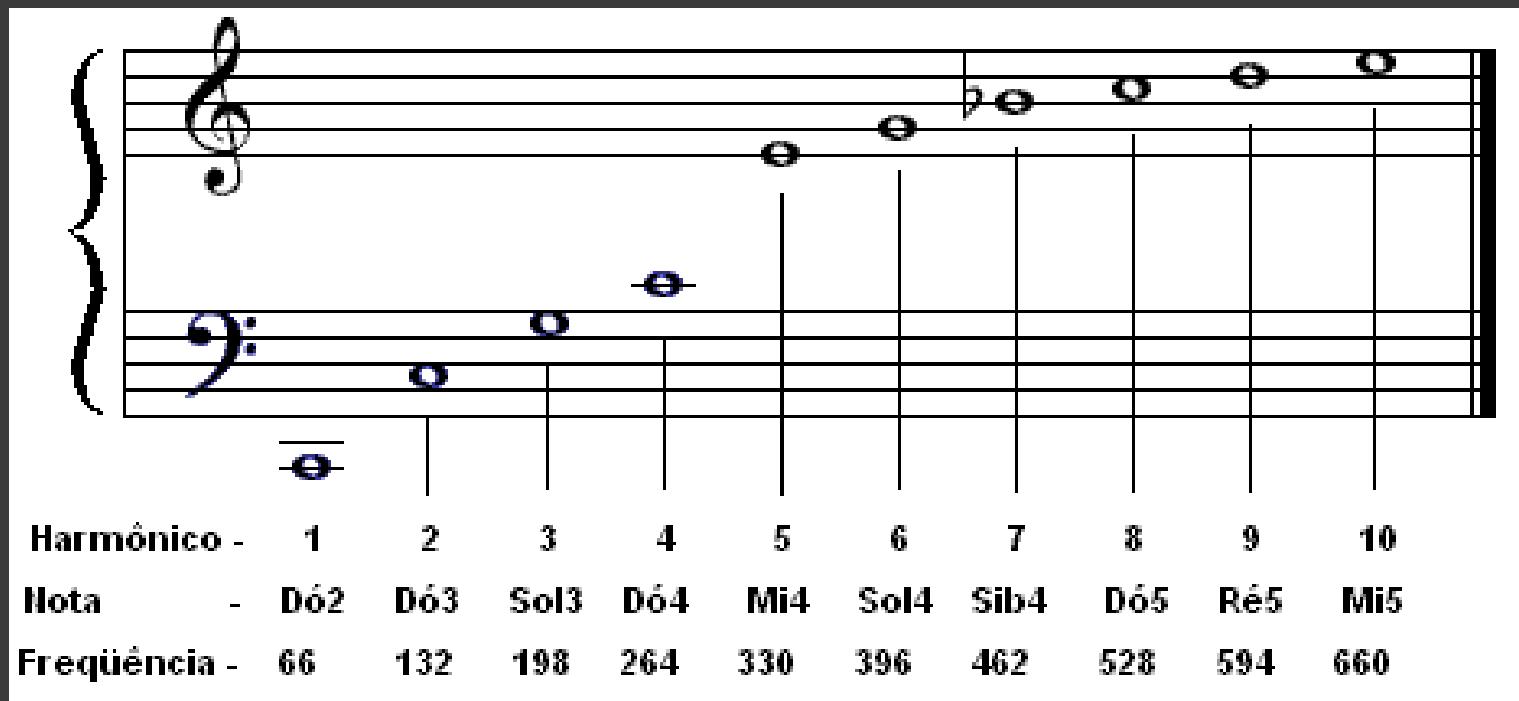


A corda também vibra em movimentos simultâneos contrários, dividindo-se em cinco

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

# A Série Harmônica

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



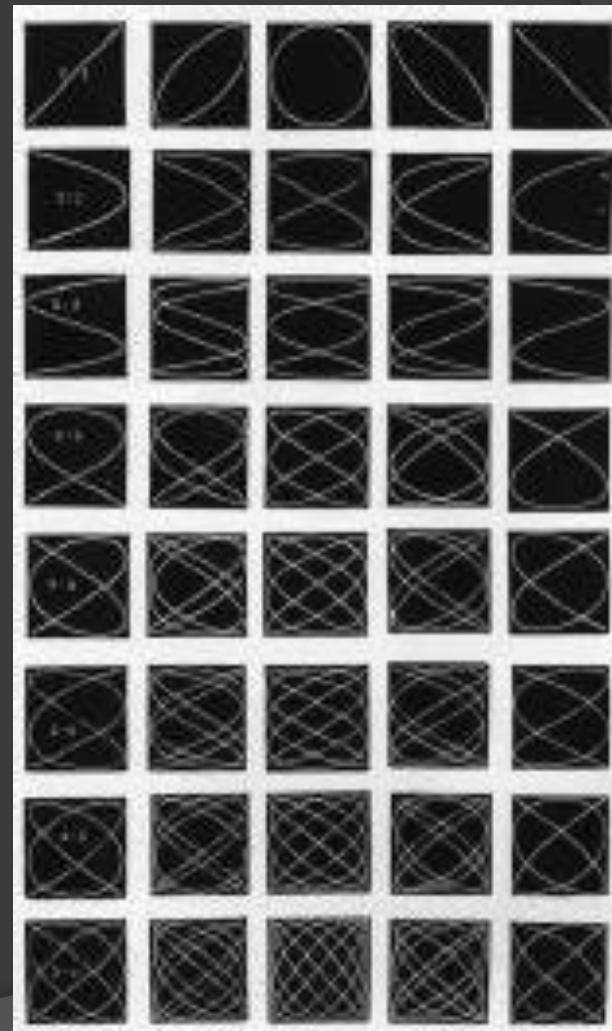
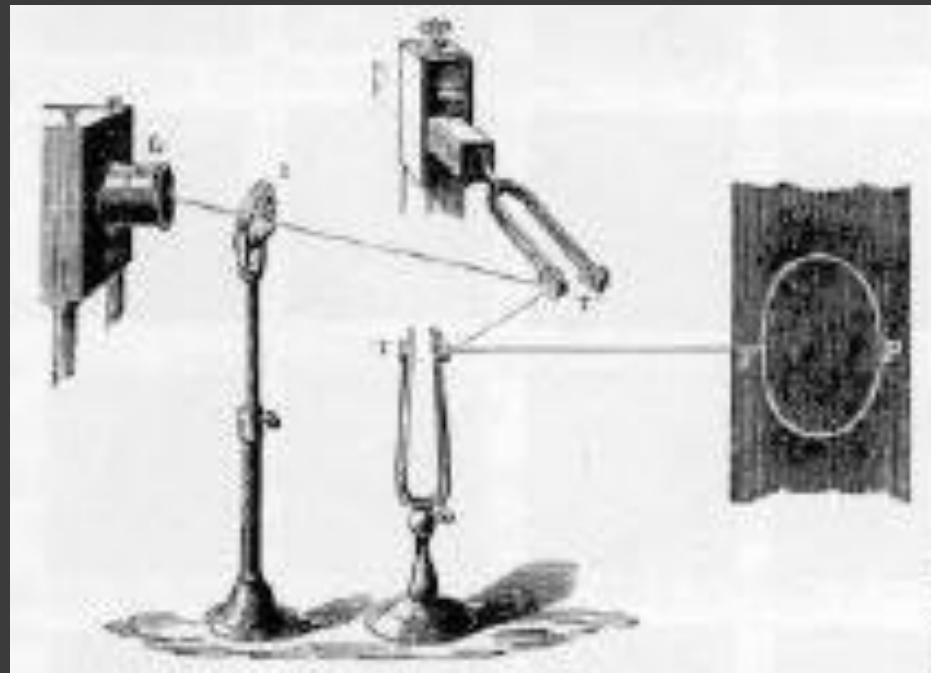
# Afinação - Breve História

- 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 frequências 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)