# Laboratório de Física
# Acústica

**Disciplina: MAF1180**

ANO 2016

# Aula 1: Metodologia e Normas de Laboratório

## 1.1 Introdução

As práticas de laboratório representam um elemento complementar fundamental para a disciplina de Física Acústica, devendo merecer especial atenção em sua multiplicidade de funções. Os experimentos foram estruturados de modo a abranger grande parte do programa teórico dessa disciplina.

## 1.2 Cronograma

| AULAS | |
|---|---|
| **01** | Metodologia: Relatórios e Normas de Laboratório |
| **02** | Medidas Físicas e Notação Científica |
| **03** | Algarismos Significativos e Arredondamentos |
| **04** | Erros Laboratoriais e Valores Médios |
| **05** | Aplicação da Teoria de Erros e Valores Médios |
| **06** | Pêndulo Simples |
| **07** | Oscilação Longitudinal |
| **08** | Ondas: Conceitos Gerais |
| **09** | Sistema Vibrante |
| **10** | Velocidade e Comprimento de Onda numa Corda Vibrante |
| **11** | Frequências Naturais de Vibração |
| **12** | Ondas Longitudinais em uma Mola |
| **13** | Ressonância: Parte I |
| **14** | Ressonância: Parte II |
| **15** | Membrana Vibrante |
| **16** | Batimento |
| **17** | Nível de Intensidade Sonora |

## 1.3 Relatório

Uma etapa importante no trabalho científico é a apresentação dos resultados obtidos. O relatório deve ser o mais objetivo possível e conter as informações essenciais sobre o que foi feito, como foi feito e os resultados obtidos. São apresentados a seguir os itens essenciais de um relatório correspondente a uma prática de laboratório.

a) CAPA DO RELATÓRIO
Deve conter: a) nome da instituição e departamento; b) título da experiência; c) nome do aluno; c) turma de laboratório; e) data da realização da experiência; f) nome do professor.

b) OBJETIVO (OU OBJETIVOS)
Descrição, de forma clara e sucinta, do(s) objetivo(s) a ser(em) alcançado(s) no experimento.

c) INTRODUÇÃO
É a parte inicial do texto, em que o aluno expõe o assunto de forma clara e sistemática, incluindo informações sobre a natureza e a importância do experimento.

d) MATERIAIS UTILIZADOS
Descrição completa do material utilizado, dando suas características principais e, se possível, um esboço gráfico das partes principais do equipamento. As figuras devem conter números e legendas que as identifiquem.

e) PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS
Descrição, de forma objetiva, das etapas na realização do experimento.

f) RESULTADOS
A apresentação dos resultados obtidos deve ser feita de forma objetiva, exata, clara e lógica. Podem ser incluidos desenhos, gráficos, tabelas, mapas, esquemas, modelos, fotografias, etc. Se possível, faça uma comparação entre os resultados experimentais e os resultados teóricos, e caso exista discrepância entre eles, faça comentários.

g) CONCLUSÕES
É a parte final do relatório, em que se apresenta a conclusão dos resultados obtidos, tendo em vista o objetivo do experimento.

h) REFERÊNCIAS
As referências constituem um conjunto de livros e/ou textos utilizados na elaboração do relatório. As referências devem ser numeradas e conter os seguintes elementos: autor, título, número de edição, editor e data, endereço eletrônico (se for o caso).
Exemplos:

**Artigos:**

Pires, M. G. S.; Rodrigues, P. H.; Sampaio, C. C. C.; Rodrigues, C. G. *Measure of the Sound Pressure Level in an Urban Center*, Jornal Brasileiro de Fonoaudiologia, vol. 03, pp. 263-266, 2002.

**Livros:**

Borges, A. N.; Rodrigues, C. G. *Introdução à Física Acústica*, Editora Vieira, Goiânia, 2006.

**Sites:** Coloque o nome do autor e o título do texto que foi retirado do site, o nome do site, e a data em que o site foi acessado para a pesquisa.

Rodrigues, Clóves Gonçalves. *Poluição Sonora*. In: http://www. sbfisica.org.br/rbef/ojs/index.php/rbef, acessado em 15 de fevereiro de 2013.

## 1.4 Formas de Avaliação

Na composição das médias $N_1$ e $N_2$ da disciplina, a nota das atividades experimentais terá o valor máximo de dois pontos (2,0). Todas as aulas de laboratório são avaliativas. A participação do aluno na realização do experimento, a entrega do relatório, as atividades correspondentes aos experimentos e o porte do material necessário (apostila de laboratório, calculadora, lápis, borracha, etc.) serão considerados na avaliação. Não haverá reposição de práticas de laboratório. Os alunos que faltarem à determinada prática de laboratório terão automaticamente nota zero naquele experimento. No processo de avaliação será considerado para a nota, o número total de aulas menos uma, ou seja, a nota mais baixa será desprezada. No entanto, não há abono de faltas.

Antes de entregar as notas para o professor de teoria, o professor de laboratório deverá apresentar e discutir essas notas com os alunos.

## 1.5 Normas de Laboratório

O laboratório é um lugar onde observações são feitas sob condições controladas, de forma que os resultados podem ser reproduzidos. Portanto, na execução das experiências, os alunos devem seguir certas normas. São elas:

- Não é permitido o uso de apostilas dos semestres anteriores;
- Chegar pontualmente à aula prática de laboratório (tolerância máxima de 15 minutos);
- Não iniciar o manuseio dos equipamentos de laboratório sem a autorização do professor;
- Ler atentamente as instruções relativas à sua experiência;
- Examinar os aparelhos que serão utilizados nas experiências, de modo a se familiarizar com o seu funcionamento e leitura de suas escalas;
- Nunca tocar com lápis ou caneta em escalas, instrumentos de medida, lentes etc.;
- Nunca apertar de forma demasiada os parafusos que servem para imobilizar temporariamente certas peças, e não forçar uma peça que não se mova com facilidade. Deslocar suavemente as peças móveis;
- Procurar executar cada medição com a maior precisão possível, pois disso depende o correto resultado do experimento;
- Anotar todas as explicações dadas pelo professor, pois essas notas serão úteis na resolução das questões;
- Elaborar o relatório com clareza, e sempre que necessário, ilustrá-lo com gráficos e esquemas;
- Levar para o laboratório o material didático necessário: apostila de laboratório, calculadora, lápis ou lapiseira, caneta e régua. A apostila de laboratório está disponível no site: http://labfisicapucgoias.blogspot.com.br/. Click em “Cadernos de Laboratório” => MAF1180-Física Acústica;
- Começar o experimento somente após a autorização do professor;
- Em hipótese alguma brincar com materiais e equipamentos destinados aos experimentos;
- No final de cada aula, antes da saída dos alunos, o professor verificará o funcionamento dos equipamentos utilizados. Em caso de dano de algum material ou equipamento decorrente de mau uso por parte do(s) aluno(s), o professor deverá comunicar ao coordenador responsável pelo laboratório para que sejam tomadas as devidas providências.

# Aula 2: Medidas Físicas e Notação Científica

## 2.1 O Sistema Internacional de Unidades

Existem sete grandezas que foram convenientemente escolhidas como unidades fundamentais. Estas unidades fundamentais formam a base do Sistema Internacional de Unidades (SI) que também é conhecido como "sistema métrico". Na mecânica existem dois sistemas fundamentais de medida muito utilizados: o sistema internacional MKS (que é a abreviatura de *metro*, *quilograma* e *segundo*) e o CGS (que é a abreviatura de *centímetro*, *grama* e *segundo*). Toda a mecânica é fundamentada nestas três unidades básicas de medida. Portanto, no sistema MKS, a unidade de comprimento é o metro (m), a unidade de massa é o quilograma (kg) e a unidade de tempo é o segundo (s).

As quatro unidades fundamentais apresentadas na Tabela 1.1 associadas a outras que veremos em capítulos posteriores serão as de maior importância no estudo da Física Acústica.

**Tabela 1.1- Algumas unidades fundamentais do SI**

| Grandeza | Nome da Unidade | Símbolo |
|---|---|---|
| comprimento | *metro* | m |
| massa | *quilograma* | kg |
| tempo | *segundo* | s |
| temperatura | *kelvin* | K |

As outras três unidades fundamentais do SI são apresentadas na Tabela 1.2. Estas unidades serão de pouco interesse para o curso de Física Acústica.

**Tabela 1.2- Demais unidades fundamentais do SI**

| Grandeza | Nome da Unidade | Símbolo |
|---|---|---|
| corrente elétrica | *ampère* | A |
| quantidade de substância | *mol* | mol |
| intensidade luminosa | *candela* | cd |

## 2.2 Grandezas Físicas Derivadas

Muitas unidades derivadas do SI são definidas em termos das unidades fundamentais apresentadas nas Tabelas 1.1 e 1.2. Dentre as inúmeras unidades derivadas do SI a Tabela 1.3 apresenta as principais.

**Tabela 1.3- Algumas unidades derivadas do SI**

| Grandeza | Nome da Unidade | Símbolo |
|---|---|---|
| velocidade | *metro por segundo* | m/s |
| aceleração | *metro por segundo por segundo* | $m/s^2$ |
| força | *newton* | N (= $kg.m/s^2$) |
| trabalho e energia | *joule* | J (= $kg.m^2/s^2$) |
| potência | *watt* | W (= J/s) |
| pressão | *pascal* | Pa (= $N/m^2$) |

## 2.3 Notação Científica

Na física frequentemente encontramos números muito grandes ou muito pequenos os quais são muito incômodos para serem escritos e difíceis de trabalhar sem cometer erros em computação aritmética. Para evitarmos escrever uma grande quantidade de zeros e facilitar os cálculos com grandes ou pequenos números fazemos uso da *notação científica* (também conhecida como *notação exponencial*). A notação científica consiste em escrever certa quantidade como o produto de um número, entre 1 e 10, multiplicado por 10 elevado a alguma potência. Por exemplo:

$$3.560.000.000 \; = \; 3,56 \times 10^{9}$$

e

$$0,000000492 = 4,92 \times 10^{-7}\,.$$

Para determinarmos o expoente de 10 na notação científica devemos contar o número de ordens decimais que devem ser movidas para produzir o número que precede ao 10. Vejamos como fazer isto:

$$7\underbrace{02000}_{5\,ordens} = 7,02 \times 10^{5} \quad \text{e} \quad 3\underbrace{5010000}_{7\,ordens} = 3,501 \times 10^{7}$$

$$0,\underbrace{0000021}_{6\,ordens} = 2,1 \times 10^{-6} \quad \text{e} \quad 0,\underbrace{000000097}_{8\,ordens} = 9,7 \times 10^{-8}$$

Observe que o expoente de 10 é positivo quando o decimal é movido para a esquerda e é negativo quando o decimal é movido para a direita.

Outra conveniência, quando utilizamos pequenos ou grandes números, é o uso dos prefixos relacionados na Tabela 1.4. Alguns empregos destes prefixos, como em milímetros, centímetros, quilogramas e megabytes, já são de seu conhecimento. Assim, podemos expressar um determinado intervalo de tempo $2,35 \times 10^{-9}\,\text{segundos}$ como $2,35\,\text{nanossegundos}$ ou $2,35\,\text{ns}$.

**Tabela 1.4**

| Fator | Prefixo | Símbolo | Fator | Prefixo | Símbolo |
|---|---|---|---|---|---|
| $10^{1}$ | deca | da | $10^{-1}$ | deci | d |
| $10^{2}$ | hecto | h | $10^{-2}$ | centi | c |
| $10^{3}$ | quilo | k | $10^{-3}$ | milli | m |
| $10^{6}$ | mega | M | $10^{-6}$ | micro | μ |
| $10^{9}$ | giga | G | $10^{-9}$ | nano | n |
| $10^{12}$ | tera | T | $10^{-12}$ | pico | p |
| $10^{15}$ | peta | P | $10^{-15}$ | femto | f |
| $10^{18}$ | exa | E | $10^{-18}$ | atto | a |

# EXERCÍCIOS

EXERCÍCIO 1 – Escreva em notação científica os seguintes números:

a) 12300000000
b) 0,00005
c) 0,0721
d) 0,00000000000104
e) 13000000000
f) 12

EXERCÍCIO 2 – Expresse, em notação científica:

a) 30 kg em gramas;
b) 5 km em metros e em centímetros;
c) 130 mg em quilogramas;
d) 2 m em quilômetro;
e) 77,8 g em quilogramas;
f) f) 270 cm em metros;

EXERCÍCIO 3 – A velocidade de uma partícula é de 340 m/s. Expresse esta velocidade em:

a) cm/s
b) km/s

# Aula 3: Algarismos Significativos e Arredondamentos

**Objetivos:** Familiarizar o aluno com os algarismos significativos e com as regras de arredondamento.

### 3.1 Algarismos Corretos e Avaliados

Imagine que se esteja realizando uma medida qualquer, como por exemplo, a medida do comprimento de uma barra de madeira com uma régua milimetrada (Figura 3.1). Observe que a menor divisão da régua utilizada é de 1 mm (um milímetro). Ao se tentar expressar o resultado dessa medida, percebe-se que ela está compreendida entre 152 e 153 mm. A fração de milímetros que deverá ser acrescentada a 152 mm terá de ser avaliada, pois a régua não apresenta divisões inferiores a 1 mm. Para se fazer esta avaliação, deve-se imaginar um intervalo entre 152 e 153 mm subdividido em 10 partes iguais, e acrescentar a fração de milímetro que for avaliada.

Na Figura 3.1, pode-se avaliar esta fração como sendo de 3 décimos de milímetros e o resultado da medida poderá ser expresso como 152,3 mm. Observe que existe segurança em relação aos algarismos 1, 5 e 2, pois eles foram lidos através de divisões inteiras da régua, ou seja, eles são *algarismos corretos*. Entretanto o algarismo 3 foi avaliado, isto é, não se tem certeza sobre o seu valor e outra pessoa poderia avaliá-lo como sendo 2 ou 4. Por isso, este algarismo avaliado é denominado *algarismo duvidoso* ou *algarismo incerto*.

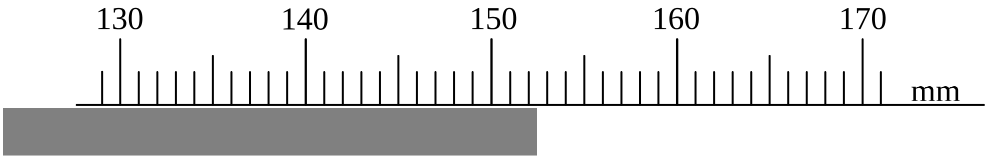



FIGURA 3.1. Régua milimetrada usada para medir o comprimento de uma barra de madeira.

O resultado de uma medida deve conter somente o(s) algarismo(s) correto(s) e o primeiro algarismo avaliado. Essa maneira de proceder é adotada convencionalmente por todas as pessoas que realizam medidas (físicos, químicos, engenheiros etc.). Esses algarismos (os corretos mais o primeiro avaliado) são denominados *algarismos significativos*.

Assim, quando uma pessoa informar que mediu a temperatura de um objeto e encontrou $27{,}84^{0}$C, deve-se entender que a medida foi feita de tal modo que os algarismos 2, 7 e 8 são corretos e o último algarismo, neste caso o 4, é duvidoso (ou avaliado).

**<u>EXERCÍCIO</u>:** Seja o número 3457.

a) Quantos algarismos significativos este número possui?
b) Quais são os algarismos corretos?
c) Qual o algarismo avaliado?

## 3.2 Arredondamento de Números

Frequentemente ocorre que números devem ser arredondados. O arredondamento deve ser empregado na eliminação dos algarismos *não significativos* de um número. Suponha que uma determinada medida de temperatura foi apresentada na forma

28,6348 $^{0}$C; 28,3500ºC; 28,6500 ºC; 28,276ºC; 28,85007ºC

e queremos apresentá-la somente com três algarismos significativos. Para os propósitos das práticas de laboratório desenvolvidas neste curso, serão adotadas as seguintes regras:

a) Se o primeiro algarismo excedente for menor do que cinco, o algarismo anterior permanece inalterado (arredondamento para baixo);
b) Se o primeiro algarismo excedente for maior do que cinco, o algarismo anterior é aumentado de uma unidade (arredondamento para cima);
c) Se o primeiro algarismo excedente for o cinco seguido de pelo menos um número diferente de zero, o algarismo anterior é aumentado de uma unidade (arredondamento para cima);
d) Se o primeiro algarismo excedente for o cinco seguido apenas de zeros, o algarismo anterior permanece inalterado.

Portanto, usando somente três algarismos significativos, as medidas anteriores podem ser expressas como:

28,6ºC; 28,3ºC; 28,6ºC; 28,3ºC; 28,9ºC

E se quisermos apresentar este conjunto de medidas somente com dois algarismos significativos teríamos:

29ºC; 28ºC; 29ºC; 28ºC; 29ºC

Observamos que para números encontrados em fórmulas e que não são resultados de medidas, não faz sentido falar em número de algarismos significativos. Ou seja, na fórmula que fornece a área $A$ de um triângulo de base $B$ e altura $H$: $A = B\text{x}H/2$. O número 2 não foi obtido através de medida e, assim, não deverá ser levado em consideração para a contagem do número de algarismos significativos do resultado.

**EXERCÍCIO:** Usando as regras de arredondamento:

a) Represente o número 403,8763 com apenas cinco algarismos significativos.
b) Represente o número 8,441 com apenas dois algarismos significativos.
c) Represente o número 78,5000 com apenas três algarismos significativos.
d) Represente o número 78,5001 com apenas três algarismos significativos.

## 3.3 Mudanças de Unidades

Ao se realizar uma mudança de unidades, deve-se tomar cuidado para não serem escritos zeros que não sejam significativos. Suponha, por exemplo, que queiramos expressar, em metros, uma medida de 8,4 km. Observe que esta medida possui dois algarismos significativos, sendo duvidoso o algarismo 4. Escrevendo: **8,4 km = 8400 m**, o número 4 estaria sendo considerado como um algarismo correto e o último zero acrescentado seria o algarismo duvidoso, o que não estaria certo. Para não cometer esse engano de interpretação, utiliza-se da notação de potência de 10 e escreve-se: **$8{,}4\times10^{3}$ m.** Assim, realizou-se a mudança de unidades e o algarismo 4 continua sendo indicado como o duvidoso.

**EXERCÍCIO:** Ao medir o comprimento de onda de uma onda em uma corda no laboratório, um estudante encontrou 25 cm.

a) Qual o algarismo duvidoso desta medida?
b) É aceitável escrever esta medida como 250 mm? Por quê?
c) Qual é a maneira certa de se expressar esta medida em milímetros, sem deixar dúvidas quanto aos algarismos significativos?

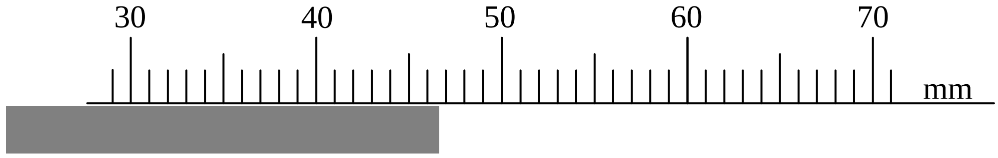
## 3.4 Incerteza Instrumental da Medida

A incerteza de uma medida é uma fração avaliada da menor divisão da escala utilizada, ou seja, é no algarismo duvidoso que reside a incerteza da medida. A incerteza de uma medida é o intervalo de incerteza fixado pelo operador com o sinal mais ou menos ($\pm$). Ela depende da perícia do observador, de sua segurança, de sua facilidade de leitura da escala, além do próprio aparelho ou instrumento utilizado na medição.

Uma forma de apresentar a incerteza de uma medida é utilizar a metade da menor escala. Por exemplo, na Figura 3.1, a menor divisão da régua é 1 mm e a incerteza poderá ser, então, 0,5 mm. Assim, o resultado desta medida poderá ser escrito como: 152,3 mm $\pm$ 0,5 mm, ou (152,3 $\pm$ 0,5) mm.

## EXERCÍCIOS

EXERCÍCIO 1 – Considere a figura abaixo:




a) Como deve ser expresso o comprimento da barra?
b) Quais são os algarismos corretos e o avaliado desta medida?
c) Expresse sua medida também em função da incerteza da medida.

EXERCÍCIO 2 – Uma pessoa sabe que o resultado de uma medida deve ser expresso apenas com algarismos significativos. Se esta pessoa lhe disser que a velocidade de um carro era de 153 km/h,

a) Quais são os algarismos que ela leu no velocímetro analógico?
b) Qual foi o algarismo duvidoso avaliado pela pessoa?

EXERCÍCIO 3 – A temperatura de uma criança foi medida usando-se dois termômetros diferentes, encontrando-se 36,8ºC e 36,80ºC.

a) Qual é o algarismo duvidoso da primeira medida?
b) Na segunda medida o algarismo 8 é o duvidoso ou correto? Justifique.

EXERCÍCIO 4 – Considerando as regras de arredondamento, escreva as medidas seguintes com apenas três algarismos significativos:

a) 272,92 cm
b) 6,545 g
c) 12,67 s
d) 78,90 N

EXERCÍCIO 5 – Um estudante precisa realizar a seguinte soma, de tal forma que o resultado contenha apenas algarismos significativos: 77,12 cm + 2,6 cm. Qual é o resultado desta adição com apenas três algarismos significativos?

EXERCÍCIO 6 – Considere a multiplicação: 345,7×2,34. Escreva o resultado apenas com três algarismos significativos

EXERCÍCIO 7 – Ao medir o comprimento de uma estrada, um agrimensor encontrou 75 km.

a) Qual o algarismo duvidoso desta medida?
b) É aceitável escrever esta medida como 75000 m? Por quê?
c) Qual é a maneira certa de se expressar esta medida em metros, sem deixar dúvidas quanto aos algarismos significativos?

# Aula 4: Erros Laboratoriais e Valores Médios

**Objetivos:** Familiarizar o aluno com erros laboratoriais, valores médios e as incertezas inerentes às medidas.

## 4.1 Introdução

Nos laboratórios de física, as grandezas determinadas experimentalmente têm uma incerteza intrínseca que vem das diferentes fontes de erro. As fontes de erro fazem com que toda medida realizada, por mais cuidadosa que seja, seja afetada por um erro experimental. Esses erros podem ser classificados em dois grupos: *os erros sistemáticos* e os *erros estatísticos.*

### *4.1.1 Erros Sistemáticos*

Os erros sistemáticos são aqueles causados por diferentes fatores e são classificados em:

a) **Instrumentais**: Erros que resultam da calibração do instrumento de medida.

b) **Ambientais**: Provenientes de fatores ambientais como temperatura, pressão, umidade, aceleração da gravidade, campo magnético terrestre, luz e ruídos.

c) **Observacionais**: Aqueles devidos a pequenas falhas de procedimento ou às limitações do próprio observador. Um erro deste tipo é o de *paralaxe*, que ocorre devido a uma posição inadequada na leitura das escalas de instrumentos.

d) **Acidentais**: Que ocorrem inevitavelmente. Por exemplo, erros de julgamento na estimativa da fração da menor divisão de uma escala.

e) **Grosseiros**: Devidos à falta de atenção ou de prática do operador. Por exemplo, enganos na leitura de instrumentos, ao escrever 7248 ou 7428 quando o número é 7482.

f) **Teóricos**: São erros que resultam do uso de fórmulas teóricas aproximadas para obtenção dos resultados.

Uma das principais tarefas do experimentador é identificar e eliminar o maior número possível de erros sistemáticos.

### *4.1.2 Erros Estatísticos*

Os erros estatísticos, por sua vez, são aqueles causados por flutuações nas medidas das grandezas. A estatística indica que uma estimativa do desvio das medidas em relação ao valor médio de uma medida é dada pelo cálculo do desvio padrão.

## 4.2 Valor Médio de uma Grandeza

O valor médio de uma grandeza *x*, por exemplo, é representado pelo símbolo $\overline{x}$ ou por $\langle x \rangle$. O valor médio é dado por um único valor e é calculado dividindo a soma de todos os valores medidos de uma grandeza pelo número de medidas que deu origem à soma, isto é, a média aritmética de uma série de medidas. Tomemos, por exemplo, quatro medidas: $x_1$, $x_2$, $x_3$ e $x_4$. O valor médio destas medidas será:

$$\overline{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4}$$

Se tivessem sido realizadas sete medidas: $x_1$, $x_2$, $x_3$, $x_4$, $x_5$, $x_6$ e $x_7$, o valor médio destas medidas seria:

$$\overline{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7}{7}$$

E de forma genérica, para calcularmos o valor médio de *N* medidas, devemos fazer então:

$$\overline{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_N}{N}$$

onde $x_N$ é o valor da última medida feita e *N* é o número de medidas realizadas.

Note ainda que todo instrumento de medida possui uma *incerteza na medida*. Por exemplo, numa régua milimetrada o menor valor de leitura é 1 milímetro (mm), e uma grandeza cujo comprimento estiver compreendido entre uma e outra marca na escala dessa régua necessariamente terá uma *incerteza na medida* associada a ela. Essa incerteza geralmente é tomada como sendo a metade da menor escala do instrumento, ou seja, $\pm 0,5$ mm neste exemplo da régua. Assim, associada à média, há a incerteza inerente ao instrumento de medida.

É importante observar que uma grandeza medida é caracterizada pelo seu valor médio, e que esse valor médio deve sempre ser escrito com a *incerteza na medida*, que representa um intervalo onde o valor verdadeiro pode se situar. Assim, levando-se em conta a incerteza na medida, o valor de uma medida *x* será dada por:

$$x = \overline{x} \pm incerteza\ na\ medida$$

ou seja, o *verdadeiro* valor da grandeza *x* provavelmente estará contido no intervalo $[\overline{x} - incerteza\ na\ medida, \overline{x} + incerteza\ na\ medida]$ ou, resumidamente, $\overline{x} \pm incerteza\ na\ medida$.

## 4.3 Erro Relativo Percentual

Uma forma de avaliar o resultado da medida de uma grandeza é feita pela comparação deste resultado com um valor preestabelecido da mesma. Como valor de referência pode-se escolher o valor tabelado ou a média de um conjunto de medidas da grandeza. Esta comparação permite determinar o erro relativo percentual, que é dado por

$$E(\%) = \frac{|\, x - \overline{x}\, | \times 100}{\overline{x}}$$

onde *x* é o valor medido e $\overline{x}$ é o valor de referência.

## EXERCÍCIOS

EXERCÍCIO 1 – São feitas seis medidas com uma régua milimetrada obtendo-se os seguintes resultados: 20; 26; 28; 22; 29 e 21. Determine: a) o valor médio e b) o valor médio com sua incerteza na medida.

EXERCÍCIO 2 – São feitas quatro medidas de temperatura com um termômetro que pode medir com precisão até 0,1°C, obtendo-se os seguintes resultados: 25,2°C; 25,5°C; 25,8°C e 25,6°C. Determine: a) o valor médio e b) o valor médio com a incerteza na medida.

EXERCÍCIO 3 – Calcule a diferença percentual entre os seguintes valores:

a) $x = 10$ e $\overline{x} = 8$
b) $x = 100$ e $\overline{x} = 20$
c) $x = 120$ e $\overline{x} = 150$
d) $x = 40$ e $\overline{x} = 80$

# Aula 5: Aplicação da Teoria de Erros e Valores Médios

**Objetivos:** Realizar uma série de experimentos aplicando a teoria de medidas, de erros e de algarismos significativos.

## 5.1 Introdução

A física está fundamentada em medidas. Dentre as várias grandezas físicas estão as fundamentais: comprimento, tempo, massa e temperatura, as quais serão medidas neste experimento.

## 5.2 Material Utilizado

a) Balança de travessão;
b) Régua milimetrada;
c) Trena;
d) Uma barra de metro padrão;
e) Pêndulo;
f) Cronômetro digital;
g) Termômetro;
h) Quatro caixas de gelatina.
i) Barbante.

## 5.3 Medidas de Massa

a) Com a balança que se encontra sobre a bancada, meça a massa de cada uma das quatro caixas de gelatina. Meça apenas a massa do pacote que se encontra dentro da caixa (massa do conteúdo). Anote os valores obtidos na tabela abaixo;
b) Em seguida, compare os valores medidos com o valor escrito em cada embalagem calculando a diferença percentual;
c) Calcule o valor médio ( $\overline{M}$ ) da massa do conteúdo e anote na tabela abaixo;
d) Anote a *incerteza na medida* referente ao equipamento utilizado;
e) Escreva o resultado final com a incerteza da medida $M = \overline{M} \pm incerteza\ da\ medida$.

| | Caixa 1: $M_1$ | Caixa 2: $M_2$ | Caixa 3: $M_3$ | Caixa 4: $M_4$ |
|---|---|---|---|---|
| Massa do conteúdo (g) | | | | |
| E(%) | | | | |
| Massa média $\overline{M}$ (g) | | | | |
| *Incerteza na medida* | | | | |
| $M = \overline{M} \pm incerteza$ | | | | |

### 5.4 Medidas de Comprimento

a) Com os instrumentos de medida que estão sobre a bancada, meça o comprimento $L$ do barbante sobre a mesa. Anote os valores na tabela abaixo;
b) Anote na tabela a *incerteza da medida* referente a cada equipamento utilizado;
c) Calcule o valor médio do comprimento do barbante;
d) Escreva o resultado final com a incerteza da medida $L = \overline{L} \pm incerteza\ da\ medida$.

| | Instrumento 1: $L_1$ | Instrumento 2: $L_2$ | Instrumento 3: $L_3$ |
|---|---|---|---|
| Comprimento (cm) | | | |
| *Incerteza na medida* (cm) | | | |
| Valor Médio (cm) | | | |
| $L = \overline{L} \pm incerteza$ (cm) | | | |

### 5.5 Medidas de Tempo

Considere o pêndulo montado sobre a bancada.

a) Com o cronômetro digital, faça cinco medidas do período de oscilação do pêndulo (tempo necessário para a massa ir e voltar). Anote as medidas na tabela abaixo;
b) Calcule o valor médio e anote na tabela abaixo;
e) Anote na tabela a *incerteza na medida* referente ao equipamento utilizado;
c) Escreva o resultado final com a incerteza da medida $T = \overline{T} \pm incerteza\ da\ medida$.

| | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ | $T_5$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $T$ (s) | | | | | |
| $\overline{T}$ (s) | | | | | |
| *Incerteza da medida* | | | | | |
| $T = \overline{T} \pm incerteza$ | | | | | |

### 5.6 Medidas de Temperatura

a) Com um termômetro faça medidas da temperatura ambiente em diferentes pontos da sala. Anote os resultados na tabela abaixo;
b) Calcule o valor médio e anote na tabela abaixo;
f) Anote na tabela a *incerteza na medida* referente ao equipamento utilizado;
c) Escreva o resultado final com a incerteza na medida: $\theta = \overline{\theta} \pm incerteza\ da\ medida$.

| | $\theta_1$ | $\theta_2$ | $\theta_3$ |
|---|---|---|---|
| Temperatura $\theta$ (°C) | | | |
| Valor médio $\overline{\theta}$ (°C) | | | |
| *Incerteza da medida* (°C) | | | |
| $\theta = \overline{\theta} \pm incerteza\ da\ medida$ (°C) | | | |

# Aula 6: Pêndulo Simples

## 6.1 Objetivo

Elucidar os conceitos de período e frequência através das oscilações de um pêndulo.

## 6.2 Material Utilizado

- Objeto metálico (corpo que será suspenso);
- Fio inextensível;
- Um suporte para o fio;
- Um cronômetro;
- Balança de precisão;
- Uma trena milimetrada ou régua.

## 6.3 Conceitos Teóricos

Um movimento é periódico quando, para um mesmo referencial, se repete identicamente em intervalos de tempos sucessivos e iguais. O termo periódico quer dizer que, depois de um certo lapso de tempo, o sistema recupera sua posição original e em seguida o movimento começa a se repetir.

Quando um corpo executa um movimento, indo e voltando sobre uma mesma trajetória, dizemos que ele está vibrando ou oscilando entre dois pontos.

Se o corpo vai de uma posição extrema à outra e retorna à posição inicial, dizemos que ele efetuou uma vibração completa ou um ciclo.

O tempo que um corpo, em movimento periódico, gasta para efetuar uma vibração completa é denominado *período* $T$ do movimento.

A frequência é o número de vibrações completas $N$ que o corpo efetua dividido pelo tempo $\Delta t$ que o corpo gastou para realizar estas vibrações, ou seja,

$$f = \frac{N}{\Delta t} \quad , \tag{6.1}$$

e o período $T$ pode ser escrito como:

$$T = \frac{\Delta t}{N} \quad . \tag{6.2}$$

Se tivermos uma única vibração teremos então $N = 1$ e $\Delta t = T$ , e as equações (6.1) e (6.2) ficam respectivamente

$$f = \frac{1}{T} \quad , \quad T = \frac{1}{f} \tag{6.3}$$

## 6.4 O Pêndulo Simples

O pêndulo simples, veja Figura 6.1, consiste de uma massa $m$ suspensa por um fio leve e inextensível de comprimento $\ell$. O movimento de um pêndulo simples é um exemplo de movimento periódico. Quando afastado de sua posição de equilíbrio e largado, o pêndulo oscilará em um plano vertical, sob a ação da gravidade, realizando uma oscilação transversal. O movimento é periódico e oscilatório.

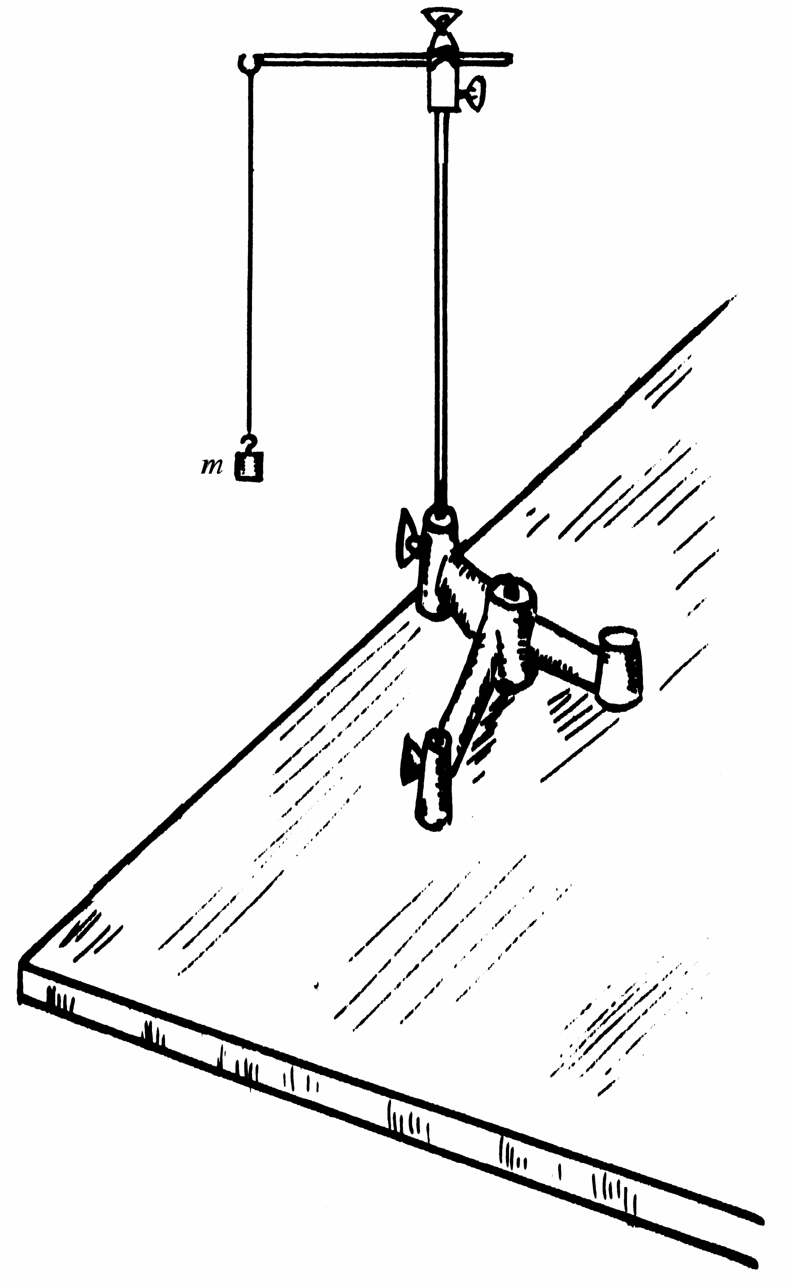



Fig. 6.1

Para pequenas amplitudes de vibração ($\theta \leq 15^{\circ}$) pode ser demonstrado que o período de oscilação será

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}\,, \tag{6.4}$$

onde “ $\ell$ ” é o comprimento do fio, $g$ é a aceleração da gravidade local ( $g \simeq 9{,}8$ m/s$^2$) e $\pi \simeq 3{,}14$ .

## 6.5 Procedimento Experimental

**a)** Monte o experimento como ilustra a Figura 6.1. Ajuste o comprimento do pêndulo de modo que o fio tenha aproximadamente 100 cm, desde o ponto de suspensão até o centro de massa do corpo metálico;

**b)** Desloque um pouco o objeto metálico de sua posição de equilíbrio e determine o tempo, $\Delta t$, necessário para o pêndulo executar 10 oscilações completas. Anote na Tabela 6.1. Observe, então que com o número de oscilações *N* e o tempo $\Delta t$ para realizar estas dez oscilações, podemos encontrar a frequência *f* e o período *T* do movimento (reveja as equações 6.1 e 6.2).

**c)** Em seguida, varie o comprimento $\ell$ mais ou menos de 10 em 10 cm repetindo o procedimento do segundo item e anote os resultados na Tabela 6.l.

TABELA 6.1

| $\ell$ (cm) | $\Delta t$ (s) | $f$ (Hz) | $T$ (s) |
|---|---|---|---|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

**d)** Agora para o fio totalmente esticado, use três massas diferentes e meça o tempo $\Delta t$, a frequência *f* e o período *T*, também para dez oscilações. Anote na Tabela 6.2.

TABELA 6.2 ( $\ell$ =                    )

| massa do pêndulo (g) | $\Delta t$ (s) | $f$ (Hz) | $T$ (s) |
|---|---|---|---|
| $m_1$ = | | | |
| $m_2$ = | | | |
| $m_3$ = | | | |

## 6.6 Questões

Pelos resultados que você obteve no item 6.5, responda às questões abaixo:

a) O período do pêndulo depende do comprimento do fio? E a frequência? Explique.

b) O período do pêndulo depende da massa do corpo? Explique.

**c)** Agora preencha a Tabela 6.3 da seguinte maneira: na primeira coluna coloque os mesmos valores do comprimento do fio (em metros) que você utilizou na Tabela 6.1; na segunda coluna coloque o período *T* que você mediu experimentalmente (lembre que você já obteve este resultado da Tabela 6.1, basta copiá-los). Agora na terceira coluna obtenha o valor do período do pêndulo calculando teoricamente utilizando a Eq. (6.4). Na última coluna calcule a diferença percentual entre o resultado teórico e o experimental, através da equação

$$E(\%) = \frac{|T_C - T|}{T_C} 100 \ , \tag{6.5}$$

onde $T_C$ é o valor do período calculado pela Eq. (6.4) e *T* é o valor que você mediu experimentalmente.

TABELA 6.3

| $\ell$ (m) | *T* (medido) | $T_C$ (calculado) | *E* (%) |
|---|---|---|---|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

**d)** Que fatores você acha que podem ter contribuído para a diferença entre os resultados teóricos e os experimentais?

# Aula 7- Oscilação Longitudinal

### 7.1 Objetivo

Estudar os conceitos de frequência e período através de um movimento harmônico simples. Relembramos novamente que a frequência e o período são definidos como

$$f = \frac{N}{\Delta t} \quad \text{e} \quad T = \frac{\Delta t}{N} = \frac{1}{f},$$

onde $N$ é o número de ciclos (ou número de oscilações) e $\Delta t$ é o tempo gasto para realizar as $N$ oscilações.

### 7.2 Material Necessário

- Duas molas helicoidais;
- Dois batentes;
- cronômetro.
- Trilho;
- Massa (carrinho);

### 7.3 Procedimento Experimental

Monte o equipamento conforme a Fig. 7.1. Instale um batente em cada extremidade do trilho para evitar que o carrinho sofra uma queda. Os pés do trilho devem estar separados por uma distância de 120 cm em uma superfície horizontal. As molas devem ser conectadas no carrinho e no batente.

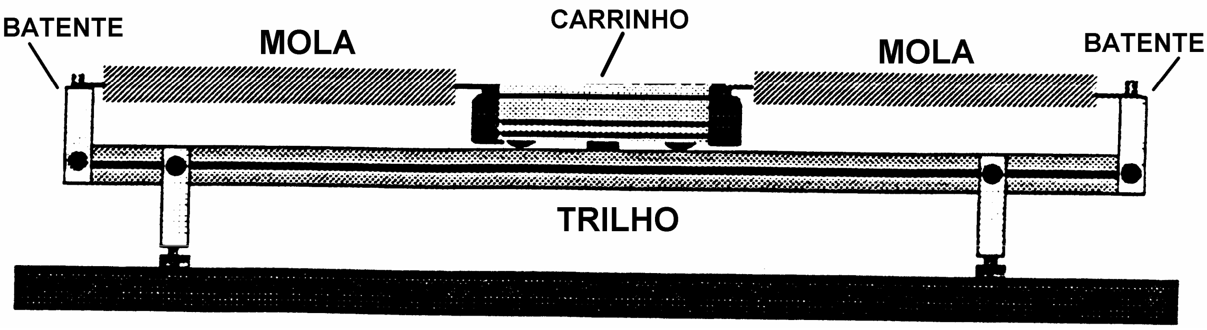



Figura 7.1

Desloque o carrinho cerca de 20 cm de sua posição de equilíbrio e marque com um cronômetro o tempo $\Delta t$ que o carrinho leva para executar quatro oscilações. Faça pelo menos cinco medidas e depois calcule o valor médio, $\overline{\Delta t}$, anotando os resultados logo abaixo. Torna-se importante tomar um valor médio porque ocorre uma pequena variação no tempo de cada medida devida ao erro experimental.

$\Delta t_1 =$ $\Delta t_2 =$ $\Delta t_3 =$ $\Delta t_4 =$ $\Delta t_5 =$

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5}{5} =$$

**QUESTÕES**

Usando o valor médio do tempo obtido acima para quatro oscilações determine:

a) A frequência do movimento

b) O período do movimento

## 7.4 Teoria

O período do movimento acima estudado pode também ser obtido teoricamente. Para um objeto preso em uma mola, o período é dado por

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}} \ , \tag{7.1}$$

onde $T$ é o período, ou seja, o tempo necessário para que o objeto realize um ciclo completo, $M$ é a massa do objeto que está oscilando (no caso o carrinho) e $K$ é a constante elástica da mola. Como neste caso foi usada uma mola em cada extremidade do trilho (duas molas em série) a constante $K$ será a soma da constante elástica de cada mola, ou seja, $K = k_1 + k_2$ e a Eq. (7.1) se torna

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{k_1 + k_2}} \ . \tag{7.2}$$

Podemos, então, determinar o período do movimento através desta última equação. O valor das constantes elásticas das molas utilizadas neste experimento devem ser encontradas experimentalmente. Devemos também com uma balança medir a massa $M$ do carrinho. Anote os valores logo abaixo.

$k_1 = k_2 =$ $\qquad\qquad$ $M =$

**QUESTÕES**

a) Com os dados que você possui acima calcule o período do movimento usando a fórmula 7.2.

b) Calcule a diferença percentual entre o valor teórico e o experimental.

### 7.5 Variando a Massa

Varie agora a massa $M$ do carrinho adicionando massas diferentes a ele. Prossiga de maneira semelhante ao item 3: desloque o carrinho de cerca de 20 cm de sua posição de equilíbrio e marque o tempo $\Delta t$ que o carrinho leva para executar quatro oscilações. Calcule $\Delta t$ para duas massas diferentes e obtenha o período e a frequencia para cada massa utilizada.

a) $M_1 =$

b) $M_2 =$

**QUESTÃO:** Compare o período que você obteve utilizando as massas $M$, $M_1$ e $M_2$. O período depende da massa? E a frequência?

# Aula 08 - Ondas: Conceitos Gerais

## 8.1 Objetivo

Elucidar o conceito de onda mecânica, onda transversal e longitudinal, propagação de uma onda em diferentes meios, velocidade da onda, interferência de ondas, reflexão de ondas.

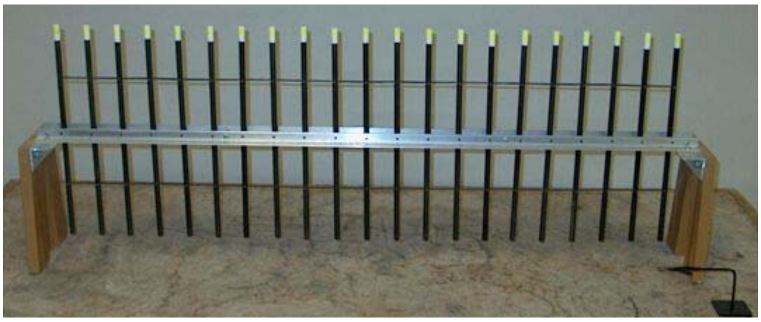
## 8.2 MATERIAL NECESSÁRIO

- Um cronômetro;
- Aparelho demonstrador de ondas (SE9600);
- Aparelho demonstrador de ondas;
- Uma trena.

Utilizaremos dois aparelhos para demonstrar ondas em propagação:

- Tipo A: composto por varetas metálicas e um arame central, possuindo três partes separadas que podem ser conectadas (veja figura abaixo);

- Tipo B: composto por varetas metálicas conectadas por molas.



**<u>ATENÇÃO</u>:** NÃO PROVOQUE GRANDES DESLOCAMENTOS NOS DEMONSTRADORES DE ONDAS PORQUE VOCÊ PODE DANIFICÁ-LOS!

## 8.3 Conceitos Teóricos

**a)** O que é uma onda mecânica?

**b)** O que é uma onda eletromagnética?

## 8.4 Procedimento Experimental

Crie a partir de uma das extremidades de cada um dos aparelhos uma onda.

**c)** Quanto à natureza de propagação, que tipo de onda é a que se propaga no aparelho A e no aparelho B? Explique.

**d)** A onda no aparelho A e no Aparelho B é um exemplo de onda unidimensional, bidimensional ou tridimensional? Explique.

**e)** Analisando a relação entre a direção de perturbação e a de propagação da onda que tipo de onda é:

**e1)** a do aparelho A. Explique.

**e2)** a do Aparelho B. Explique.

**f)** Meça a velocidade da onda para cada parte do demonstrador de ondas do Tipo A.

**g)** Una as três partes do demonstrador de ondas e crie a partir de uma das extremidades uma onda. O que acontece quando a onda passa de um meio para outro no demonstrador de ondas? Que propriedade da onda não se altera quando ela é transmitida de um meio para outro?

**h)** Retire a parte intermediária do demonstrador de ondas e ligue a conexão do menor com o maior. Crie uma onda a partir da extremidade maior. O que acontece agora? Que relação existe entre este fenômeno e o aparelho auditivo humano?

**i)** Demonstre o princípio de superposição de ondas criando duas ondas ao mesmo tempo nas duas extremidades do propagador de ondas: a) primeiro crie as duas ondas fazendo uma perturbação no mesmo sentido; b) depois com os sentidos de perturbação contrários. Então responda:

**i1)** O que acontece no momento em que as duas ondas se encontram para os casos a) e b)?

**i2)** Depois que as duas ondas se interferem o que acontece com cada uma das ondas?

**j)** Verifique a diferença que ocorre quanto à reflexão de uma onda quando se tem:

**j1)** Uma extremidade livre.

**j2)** Uma extremidade fixa.

# Aula 9 - Sistema Vibrante

## 9.1 Objetivo

Estudar conceitos de ondas mecânicas numa corda vibrante: comprimento de onda, amplitude e período.

## 9.2 Material Necessário

- Gerador de função;
- Vibrador (SF9324);
- Roldana;
- Corda elástica;
- Massas.

## 9.3 Conceitos Teóricos

Seja uma onda mecânica do tipo da corda vibrante como mostrado na Figura 9.1.

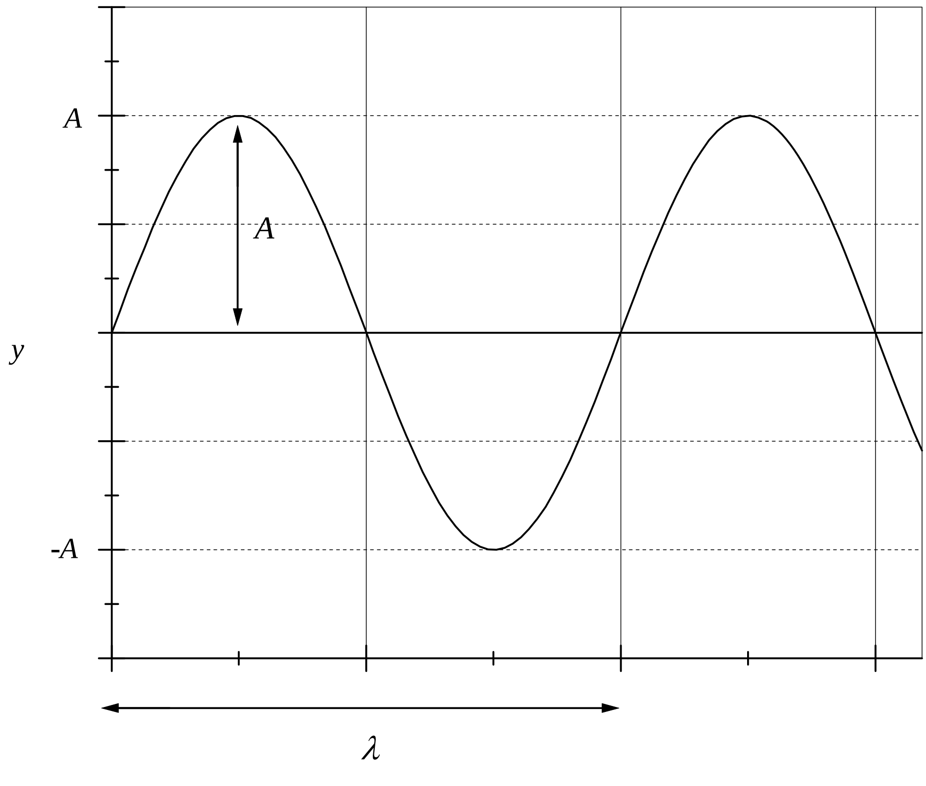



Figura 9.1

A amplitude da onda "*A*" é o deslocamento máximo $y_m$, no eixo *Y*. O comprimento de onda $\lambda$ é a distância entre dois pontos consecutivos da onda que possuem a mesma fase. O Período *T* de uma onda corresponde ao tempo necessário para que a onda percorra uma distância igual a um comprimento de onda $\lambda$, e pode ser definido como

$$T = \frac{1}{f}\ , \tag{9.1}$$

onde $f$ é a frequência da onda que corresponde ao número de comprimentos de onda que passam num ponto por unidade de tempo. A velocidade da onda pode ser calculada através da relação $v = \lambda f$ , que com o uso da equação (9.1) pode ser escrita na forma:

$$v = \frac{\lambda}{T}\ . \tag{9.2}$$

## 9.4 Procedimento Experimental

Ligue os cabos do vibrador ao gerador de função. Amarre uma extremidade da corda elástica ao vibrador e a outra extremidade passe pela roldana, sendo que é necessário colocar uma massa na outra extremidade para que corda tenha duas extremidades fixas. O equipamento deve ficar montado como mostra a Figura 9.2.

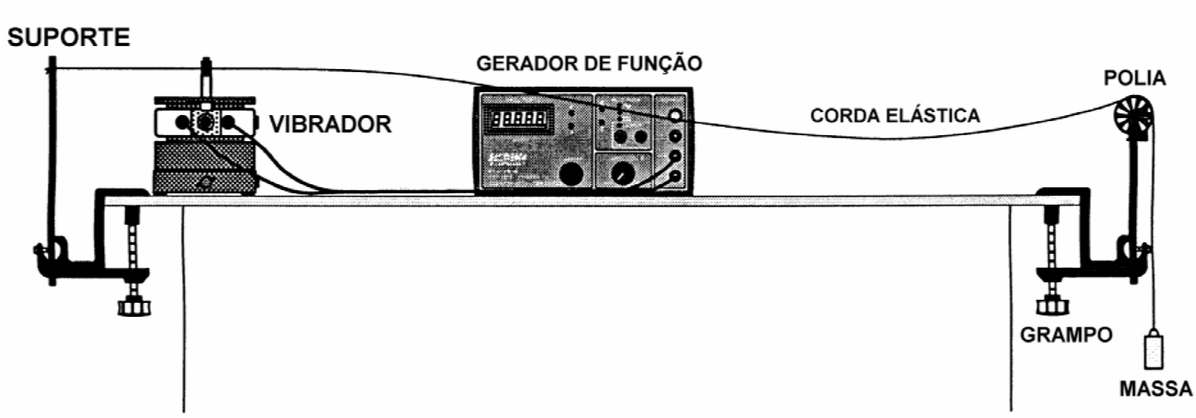



Figura 9.2

É bom lembrar que devem ser evitadas forças laterais sobre o vibrador a fim de não danificá-lo. Como a corda está sob tensão, pois, um peso foi colocado em uma de suas extremidades, a outra extremidade da corda deve ficar atada a um suporte rígido como mostra a Figura 9.2 e mais especificamente a Figura 9.3. Nunca atar a corda diretamente ao vibrador.

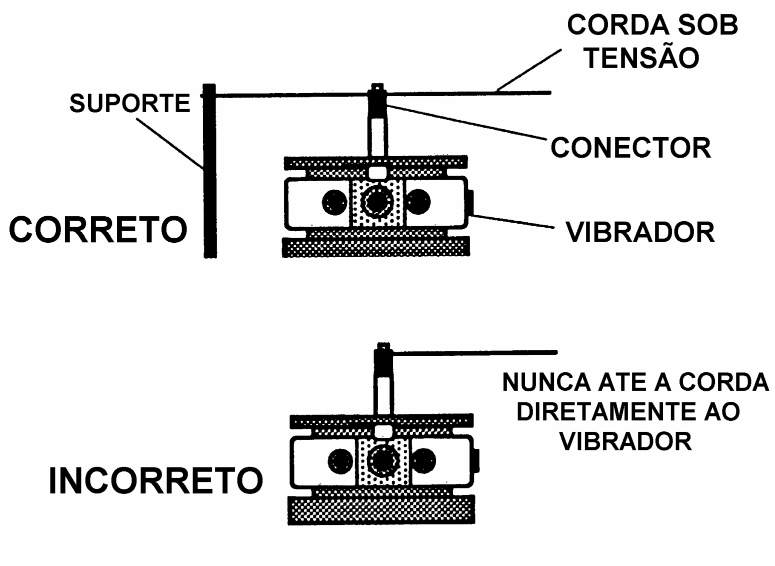



*Figura 9.3*

## 9.5 Questões

***Questão 1:***

**a)** Para uma frequência de 40 Hz calcule o período *T*, usando a equação (9.1).

**b)** Agora ligue o gerador de função. Forneça uma frequência de 40 Hz e com uma régua ou trena meça o comprimento de onda $\lambda$ e a amplitude *A* da onda.

**c)** Com o comprimento de onda $\lambda$ e o período *T* dos itens a) e b) calcule a velocidade da onda na corda (use a equação (9.2)).

***Questão 2:***

**a)** Para uma frequência de 60 Hz calcule o período $T$, usando a equação (5.1).

**b)** Através do gerador de função forneça uma frequência de 60 Hz e com uma régua ou trena meça o comprimento de onda $\lambda$ e a amplitude *A* da onda.

**c)** Com o comprimento de onda $\lambda$ e o período $T$, do itens a) e b) calcule a velocidade da onda na corda (use a equação (9.2)).

***Questão 3:***

Sabemos que a velocidade de onda na corda é dada pela expressão $\mathrm{v} = \sqrt{\tau / \mu}$, onde $\tau$ é a tensão na corda e $\mu$ é a densidade linear da corda. Na *questão 1* e na *questão 2* mudamos apenas a frequência de 40 Hz para 60 Hz, e não alteramos nem a tensão e nem a densidade linear da corda. **a)** O que deve acontecer então com a velocidade da onda ao mudarmos a frequência? **b)** E o que acontece com o comprimento de onda da onda ao mudarmos a frequência? **c)** Se ocorreu alguma mudança na velocidade ao se alterar a frequência explique por que isto aconteceu.

# Aula 10 - Velocidade e Comprimento de Onda numa Corda Vibrante

## 10.1 Objetivo

Calcular o comprimento de onda e a velocidade de propagação de uma onda mecânica numa corda vibrante.

## 10.2 Material Necessário

- Gerador de função;
- Vibrador (SF9324);
- Massas.
- Corda elástica;
- Roldana;
- Balança de precisão.

## 10.3 CONCEITOS TEÓRICOS

Cordas quando tocadas vibram produzindo ondas transversais estacionárias que funcionam como fonte de ondas sonoras. As cordas, ao oscilarem, fazem vibrar o ar ao redor, gerando uma onda sonora de igual frequência. Seja uma dessas cordas com ambas as extremidades fixas, como mostra a Figura 10.1.

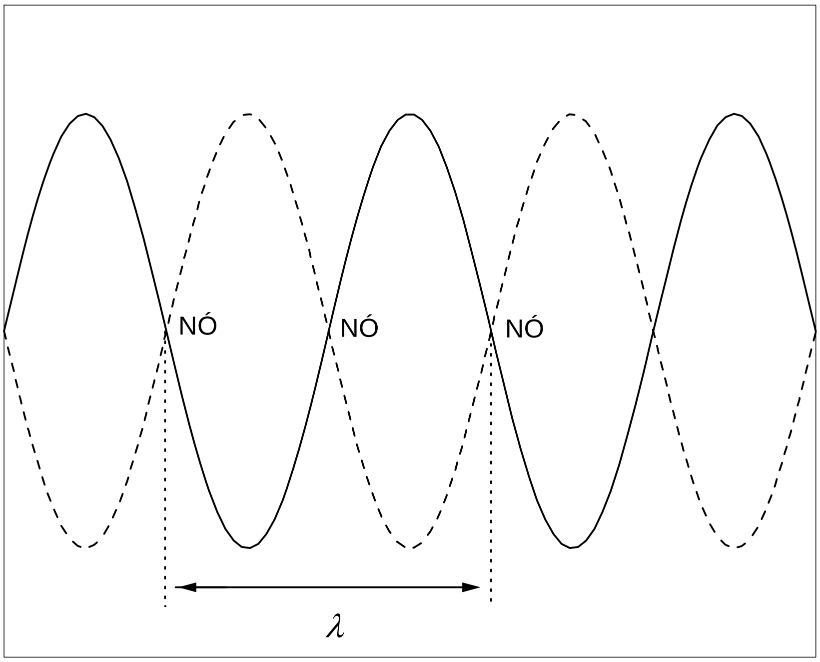



Figura 10.1

A velocidade de propagação da onda na corda é

$$\mathrm{v} = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} \ , \tag{10.1}$$

onde $\tau$ é a tensão na corda e $\mu$ é a densidade linear da corda, ou seja,

$$\mu = \frac{m_C}{L} \quad , \tag{10.2}$$

onde $m_C$ é massa da corda correspondente a um comprimento $L$. Sabemos ainda que a relação entre a velocidade e o comprimento de onda é $v = \lambda f$ , portanto, podemos escrever que

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad , \tag{10.3}$$

onde $f$ é a frequência da onda.

A tensão $\tau$ na corda, neste caso, será o peso da massa $M$ colocada na extremidade da corda, ou seja

$$\tau = Mg \quad , \tag{10.4}$$

onde "$g \simeq$ 9,8 m/s$^2$" é a aceleração da gravidade.

## 10.4 Questões

Primeiro meça a massa $m_C$ da corda e a massa $M$ será colocada na extremidade da corda elástica. Depois com uma régua ou trena meça o comprimento total $L$ da corda. Anote os valores logo abaixo:

$m_C =$ $M =$ $L =$

Para uma determinada massa $M$ colocada na extremidade da corda obtenha:

**a)** A densidade linear da corda, $\mu$ (use a equação 6.2).

**b)** A tensão $\tau$ na corda (use a equação 10.4). Observe que a tensão na corda é provocada pela massa $M$ colocada na extremidade da corda e não pela massa $m_C$ da corda.

**c)** A velocidade $v$ de propagação da onda na corda (use a equação 10.1);

**d)** Para uma frequência de 60 Hz qual é o comprimento de onda (use a equação 6.3)?

**e)** Agora o ligue o gerador de função e forneça uma frequência igual a do item anterior e meça com uma régua ou uma trena o comprimento de onda da onda formada na corda elástica.

**f)** Qual a diferença percentual entre o comprimento de onda experimental obtido no item **e)** e o valor teórico obtido no iten **d)**?

**g)** Altere a massa suspensa na extremidade da corda elástica. Ligue o gerador de função e forneça uma frequência de 60 Hz meça com uma régua ou uma trena o comprimento de onda da onda formada na corda elástica e calcule então a nova velocidade da onda na corda. O que acontece com a velocidade se aumentamos a massa suspensa? E se diminuímos a massa suspensa?

**h)** O que aconteceria com a velocidade de onda na corda se trocássemos a corda por uma corda com densidade maior? E se trocássemos a corda por uma corda com densidade menor? Responda com base na equação (10.1).

# Aula 11 - Frequências Naturais de Vibração

## 11.1 Objetivo

Determinar a frequência fundamental de uma corda vibrante e seus modos naturais de vibração.

## 11.2 Material Necessário

- Corda elástica;
- Massas;
- Roldana;
- Vibrador (SF9324);
- Balança de precisão
- Gerador de função;
- Régua ou trena;

## 11.3 Conceitos Teóricos

Uma corda de comprimento total *L*, com ambas as extremidades fixas (de tal maneira que de uma extremidade fixa até a outra tenha um comprimento $\ell$), tem como nós naturais as suas extremidades, como consequência, só alguns comprimentos de onda estacionária são possíveis (veja a Fig. 11.1 abaixo).

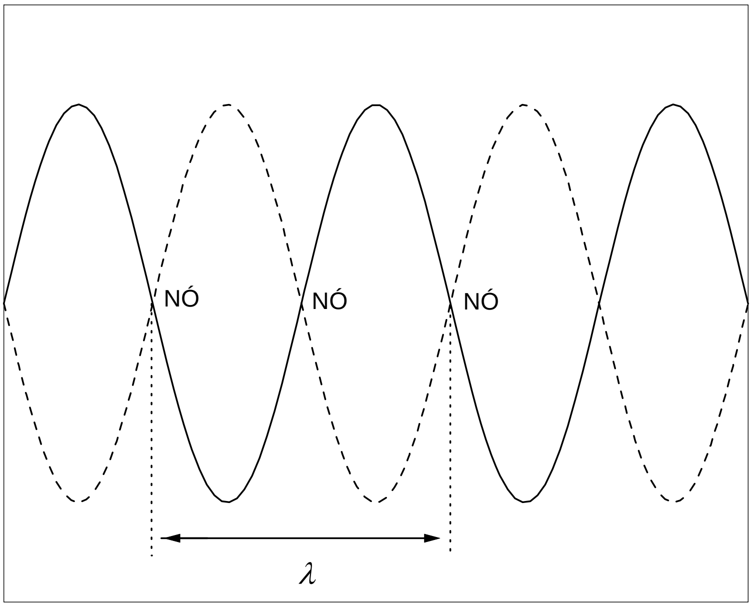



Figura 11.1

O maior comprimento de onda possível na corda é de $\lambda_1 = 2\ell$. Os possíveis comprimentos de onda em ordem decrescente são: $\lambda_2 = \dfrac{2\ell}{2}$, $\lambda_3 = \dfrac{2\ell}{3}$, $\lambda_4 = \dfrac{2\ell}{4}$, e de forma geral teremos

$$\lambda_n = \frac{2\ell}{n} \, , \qquad (11.1)$$

com $n = 1, 2, 3, \ldots$.

Sendo $v = \lambda f$, conclui-se que

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{2\ell / n} = n\frac{v}{2\ell}$$

e para $n = 1$ temos

$$f_1 = \frac{v}{2\ell} \quad , \tag{11.2}$$

portanto

$$f_n = nf_1 \quad . \tag{11.3}$$

As possíveis frequências de vibração numa corda esticada, presa nas duas extremidades, formam uma sequência harmônica, sendo a primeira a fundamental. Essas frequências também são chamadas frequências naturais.

***ATENÇÃO***: não confunda $L$ com $\ell$. $L$ é o comprimento total da corda e $\ell$ é o comprimento de uma extremidade fixa no vibrador até a roldana.

## 11.3 Questões

**a)** Calcule a velocidade da onda na corda. Você deverá usar uma balança para medir a massa da corda e uma régua para medir o seu comprimento *L*. Para facilitar transforme os valores de massa para *kg* e de comprimento para metros. Anote os valores obtidos. Lembre que $\mathrm{v} = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}}$, sendo $\tau$ a tensão na corda e $\mu$ a densidade linear da corda. A tensão na corda será o peso da massa suspensa em uma das extremidades: $\tau = Mg$ (onde *M* é a massa suspensa) e a densidade linear é $\mu = \frac{m_c}{L}$, sendo, $m_c$ a massa da corda e *L* o comprimento total da corda.

$m_c =$ $M =$ $L =$

**b)** Para um comprimento $\ell = 1$ m, calcule a frequência fundamental $f_1$. (use a equação 11.2 e o valor de $v$ obtido no item **a)**).

**c)** Agora preencha a tabela abaixo. Na segunda coluna coloque os valores dos cinco primeiros modos normais de vibração. Para isto use o valor da frequência fundamental $f_1$ obtida no item **b** e os valores de *n* da coluna 1. Agora ligue o amplificador e para cada frequência meça com uma régua o valor do comprimento de onda da onda na corda, anotando os valores na terceira coluna. Na última coluna o valor do comprimento de onda calculado teoricamente pela equação $\lambda = \boldsymbol{v} / f_n$. Lembre que você já obteve o valor de $\boldsymbol{v}$ no item **a**.

| valor de *n* | $f_n = nf_1$ (Hz) | $\lambda$ (medido) | Nº de nós | Nº de antinós | $\lambda_C = \boldsymbol{v} / f_n$ (calculado) |
|---|---|---|---|---|---|
| $n = 1$ | | | | | |
| $n = 2$ | | | | | |
| $n = 3$ | | | | | |
| $n = 4$ | | | | | |
| $n = 5$ | | | | | |

**d)** Calcule a diferença percentual entre o comprimento de onda medido e o calculado para pelo menos um valor da Tabela acima.

# Aula 12 - Ondas Longitudinais em uma Mola

## 12.1 Objetivo

Elucidar o conceito de propagação de uma onda longitudinal e seu comprimento de onda, compressão e rarefação.

## 12.2 Equipamento Necessário

- Mola helicoidal (WA9401);
- Gerador de função;
- Suporte;
- Vibrador (SF9324);
- Régua.

## 12.3 Conceitos Teóricos

Se uma movimentar para frente e para trás a extremidade de uma mola esticada, dando a esta extremidade um movimento oscilatório na direção da própria mola, verificaremos que uma perturbação, construída por uma série de *compressões* e *rarefações*, propaga-se ao longo da mola (veja Fig. 12.1). Uma perturbação como esta, propagando-se na mola, é denominada onda longitudinal.

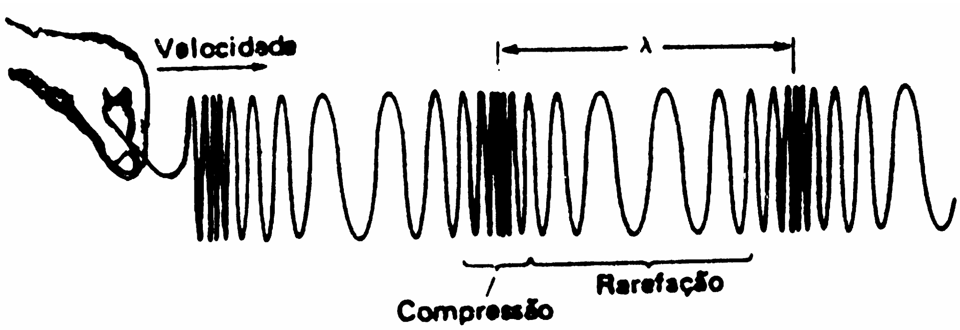



Figura 12.1

A distância entre os centros de duas compressões sucessivas é o comprimento de onda da onda. A propagação do som é análoga à propagação dessa onda na mola.

## 12.4 Procedimento Experimental

Monte o vibrador e a mola conforme mostra a Figura 12.2 abaixo. A mola deve ficar esticada de modo que fique numa faixa de 30 a 60 cm. Depois ligue o amplificador ao vibrador.

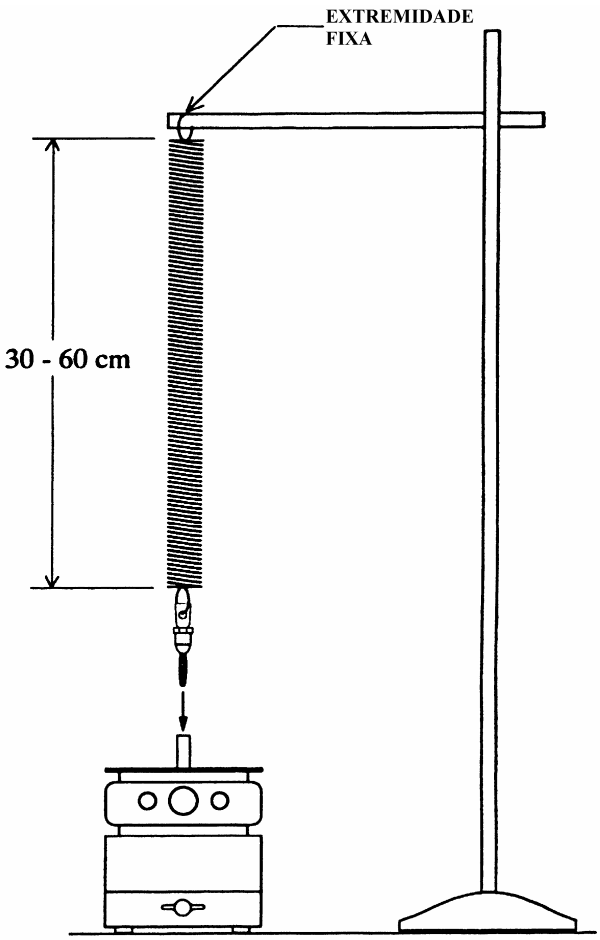



Figura 12.2

## 12.5 QUESTÕES

a) Para a mola com um comprimento fixo de 60 cm varie lentamente a frequência e construa uma tabela onde a primeira coluna seja a frequência, a segunda o número de compressões e a terceira o comprimento de onda da onda na mola. Com os dados da primeira e terceira colunas calcule a velocidade da onda na mola para cada valor da frequência e comprimento de onda e anote na quarta coluna da Tabela. Lembre que $v = \lambda f$ .

| **Frequência (Hz)** | Número de Compressões | Comprimento de onda (m) | Velocidade (m/s) |
|---|---|---|---|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

b) Com os resultados da quarta coluna da tabela anterior, calcule o valor médio da velocidade.

c) Para uma frequência fixa, varie o comprimento da mola de 60 cm até 30 cm de 10 em 10 cm e preencha a tabela abaixo.

| Comprimento da Mola | Número de Compressões | Comprimento de onda (m) | Velocidade (m/s) |
|---|---|---|---|
| 60 cm | | | |
| 50 cm | | | |
| 40 cm | | | |
| 30 cm | | | |

d) Com relação ao item c) o número de compressões varia com o comprimento da mola para uma mesma frequência? E o comprimento de onda? Note que quando variamos o comprimento da mola estamos variando a tensão na mola.

# Aula 13 – Ressonância: Parte I

## Experimento A - Ressonância Entre Molas Planas

### 13.1 Objetivo

Verificar os fenômenos de ressonância.

### 13.2 Material Necessário

- Grampo de mesa; - Cinco molas planas; - Grampo de placa.

### 13.3 Procedimento

Intercalamos molas compridas com molas menores como mostra a figura ao lado. Colocamos massas de mesmo valor na extremidade de cada uma delas, exceto na mola do meio.

Verificamos então que: a) Pondo em movimento uma das molas grandes com peso a outra mola grande com um peso também entra em movimento. b) Pondo em movimento uma das molas pequenas a outra mola pequena entra em movimento, mas não as molas grandes. Este constitui um exemplo de ressonância.

### 13.4 Questões

Com base neste experimento, responda então:

a) Se colocarmos em movimento a mola de número 1, qual mola entrará em movimento (ressonância) com ela? Explique sua resposta.

b) Se colocarmos em movimento a mola de número 2, qual mola entrará em ressonância com ela? Explique sua resposta.

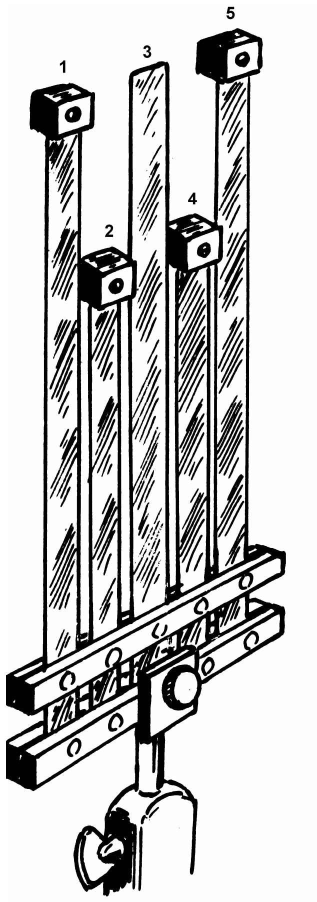



Figura 13.1

c) Se colocarmos em movimento a mola de número 3, qual mola entrará em ressonância com ela? Explique sua resposta.

# Experimento B - Ressonância com Caixa Acústica e Diapasão

### 13.5 Objetivo

Verificar os fenômenos de ressonância.

### 13.6 Material Necessário

- Dois Diapasões;
- Duas caixas ressonantes;
- Martelo com ponta de borracha.

### 13.7 Procedimento

**A)** Dois diapasões exatamente iguais (que estão sobre caixas ressonantes) devem ser colocados próximos com suas aberturas voltadas de frente um para o outro, como mostra a Figura 13.2, logo abaixo.

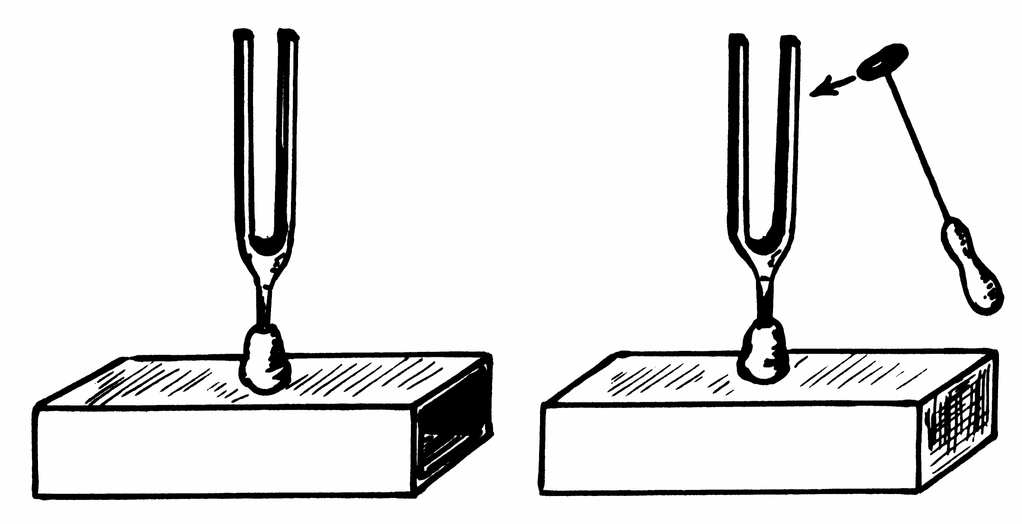


*Fig. 13.2*

**Questão 1-** Ao se bater em um dos diapasões o que acontece com o outro diapasão? Para melhor evidenciar o que acontece, segure com a mão para abafar o som no primeiro diapasão no qual você bateu.

**Questão 2-** Como se faz a transmissão de energia de um diapasão para o outro?

**CONCLUSÃO:** Observamos, então, que batendo fortemente em um dos diapasões o outro começa também a emitir o mesmo som e com bastante força. Para melhor evidenciar, que é o 2º diapasão que emite o som, abafemos o 1º diapasão, segurando-o com a mão. Mesmo com distâncias maiores entre os dois diapasões, verificamos que se consegue transmitir a vibração do o 1º diapasão para o segundo. A faz a transmissão da energia de energia de um diapasão para o outro é feita pelo ar. Ao se bater no primeiro diapasão o ar ao seu redor vibra e atrita o outro diapasão. O efeito maior provém do impulso do ar que entra na caixa aberta pondo o ar na segunda caixa em oscilações também. Este fenômeno aqui verificado recebe o nome de *ressonância*.

**B)** Colocamos agora a caixa acústica (sem o diapasão e com o furo tampado) com a sua abertura voltada para cima como mostra a Figura 13.3 ao lado. Seguramos então o diapasão acima da caixa e batemos nele com um martelo de borracha.

**Questão 3-** Primeiro batemos no diapasão afastado da caixa e depois batemos no diapasão bem próximo da caixa. Que diferença notamos entre estes dois procedimentos?

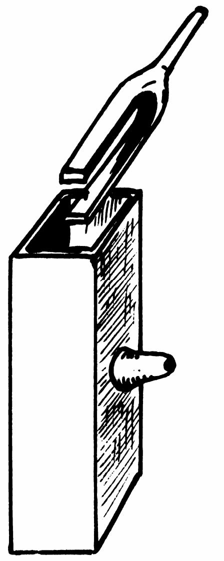


***Fig. 13.3***

**<u>CONCLUSÃO</u>:** Observamos então que enquanto o diapasão está longe da caixa o som é fraco, mas quando o diapasão chega bem próximo da caixa o som aumenta consideravelmente. Isto acontece porque o ar dentro da caixa entra em vibração com o diapasão e o volume de ar dentro da caixa que entra em vibração é muito maior que o ar posto em vibração diretamente pelo diapasão. Daí o aumento do som. Além disto o diapasão é por natureza um emissor de som fraco por ser constituído sempre de dois emissores. Cada extremidade é um emissor e estes dois sempre estão em oposição, porque um vibra contra o outro, anulando-se (mas não completamente) o som por interferência.

**C)** A Posição do diapasão na caixa também é importante. Bata no diapasão e coloque-o próximo à abertura da caixa de ressonância como mostra a Figura 13.4 abaixo. Faça para cada uma das quatro posições. Na posição 1 ou 2 a ressonância é forte. Na posição 3 ou 4 a ressonância é fraca ou nula, porque coincide com a hipérbole de interferência (veja Figura 13.5).

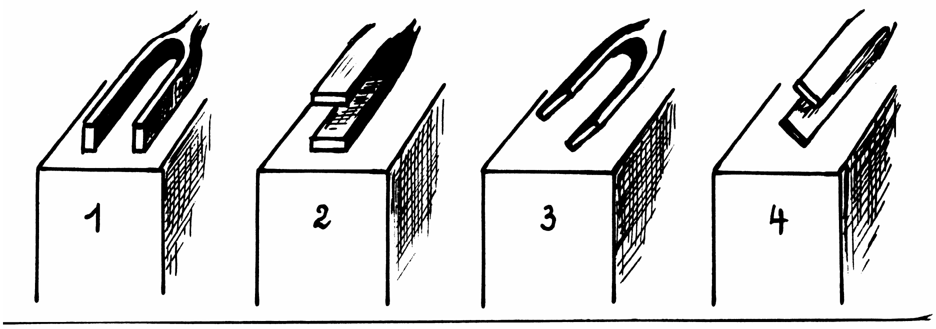



***Figura 13.4***

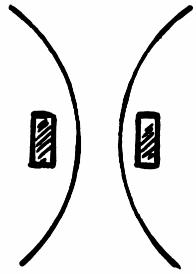


***Figura 13.5***

# Aula 14 – Ressonância: Parte II

## Experimento A - Ressonância em Aro Metálico

### 14.1 Objetivo

Verificar os fenômenos de ressonância e demonstrar ondas estacionárias em um arame circular fechado.

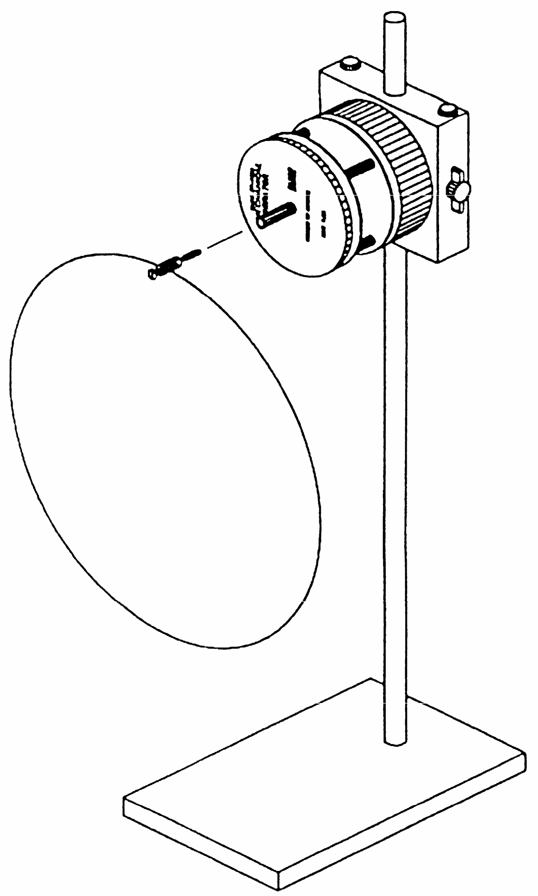
### 14.2 Material Necessário

- Vibrador (SF9324);
- Aro metálico (SF9405).
- Amplificador (PI9587C);

### 14.3 Procedimento

Monte o equipamento como mostra a figura ao lado.

Inicie o vibrador com uma freqüência por volta de 4 Hz com aproximadamente 1 mm de amplitude e aumente vagarosamente a freqüência. Quando a freqüência é aumentada o arame circular vibra em vários modos com um número impar de antinodos presentes. O arame circular apresenta ondas estacionárias com freqüências discretas, cada uma correspon-dendo a um único comprimento de onda.



### 14.4 Questão

Construa uma tabela com a primeira coluna sendo a freqüência e a segunda coluna o número de antinodos presentes no arame para a referida freqüência.

# Experimento B - Ressonância em Barras Metálicas

## 14.5 Objetivo

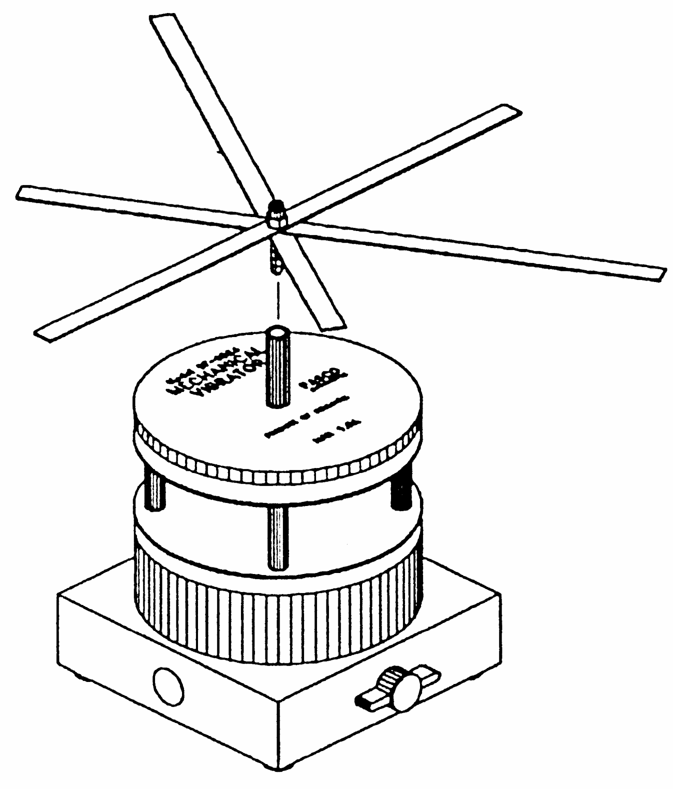
A ressonância em barras metálicas tem a finalidade de demonstrar a relação entre a freqüência e o comprimento de uma trave metálica. O equipamento fornece seis traves metálicas de diferentes comprimentos, mas com a mesma massa por comprimento (ou seja, a mesma densidade).

## 14.6 Material Necessário

- Vibrador (SF9324);
- Amplificador (PI9587C);
- Barras Metálicas (SF9404).

## 14.7 Montagem do Equipamento e Procedimento

a) Rotacione as barras metálicas de maneira que elas fiquem com iguais ângulos entre si, como mostra a figura ao lado;
b) Meça com uma régua o comprimento de cada barra;
c) Insira o plug da barra metálica no cano do vibrador;
d) Conecte o vibrador a um gerador de funções;
e) Ligue o gerador de funções e inicie com uma freqüência por volta de 6 Hz e vá aumentando vagarosamente a freqüência. Quando ocorrer a ressonância com uma das barras ela irá vibrar com máxima amplitude.
(ATENÇÃO: quando a ressonância é atingida é necessário diminuir a amplitude do vibrador para não danificar o aparelho).



## 14.8 Questão

Anote o valor da freqüência com a qual cada uma das barras entra em ressonância.

# Aula 15 – Membrana Vibrante

## 15.1 Introdução

Membranas são corpos flexíveis, que produzem ondas sonoras, mas que possuem uma de suas dimensões muito menor que as outras duas, ou seja, a espessura bem menor que a largura e o comprimento.

As vibrações nas membranas não são definidas por nós e antinós de vibração, como nas cordas vibrantes, anteriormente estudadas. Devido ao seu formato característico, as vibrações nas membranas são definidas pelas *linhas nodais*, isto é, linhas cujos pontos permanecem em repouso, ao invés dos nós (veja Fig. 15.1).

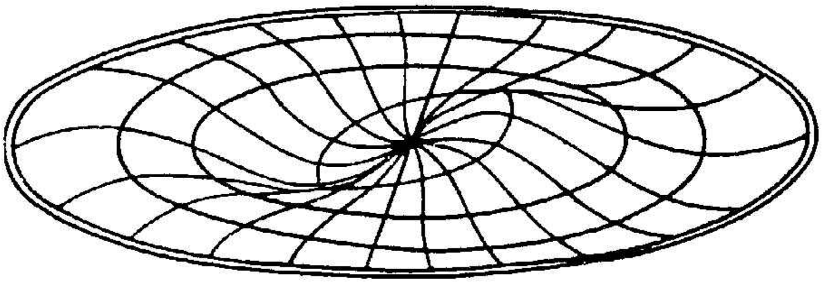


Figura 15.1

Uma maneira de se obter linhas nodais é mostrada na Fig. 15.2. Uma chapa metálica (circular ou quadrada) é colocada sobre um vibrador, e em cima da chapa despeja-se areia fina. Ligando-se o vibrador o estudante poderá perceber linhas em que os grãos de areia não vibram. Estas serão as linhas nodais. O estudante poderá também verificar que para diferentes frequências irão se formar "imagens" diferentes (diferentes linhas nodais). Não só a frequência, mas a forma da chapa metálica irá influenciar no tipo de linha nodal formada. Pode-se perceber também que para frequências elevadas as linhas nodais se tornam bem estreitas enquanto que para frequências baixas praticamente toda a chapa entra em oscilação. Analogamente às chapas metálicas o tímpano também é uma membrana. Quando uma onda sonora atinge a membrana timpânica esta entra em vibração. A membrana timpânica irá, portanto, ter uma resposta diferente para as diferentes frequências de sons que a atingem.

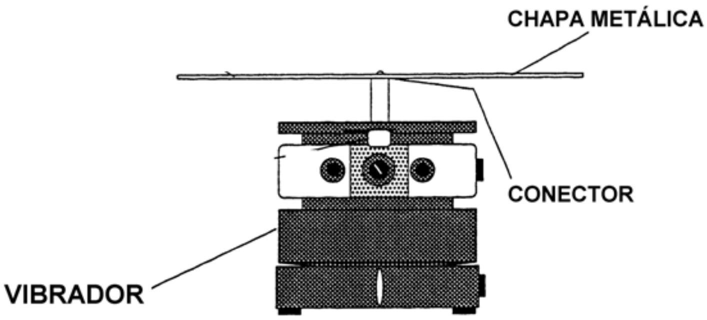



Figura 15.2

A frequência fundamental dos instrumentos musicais, que utilizam membranas como fontes de vibração, depende do tamanho da superfície e da tensão a que a membrana esteja submetida. Estes instrumentos podem mesmos ser afinados esticando ou afrouxando a membrana que os recobre. Instrumentos de percussão, tais como pandeiro, bumbo, tambor, tamborim, cuíca, são exemplos de instrumentos musicais que utilizam membranas. Estes instrumentos contêm membranas prensadas em um anel ou linha de suporte, o qual sempre será uma linha nodal.

## 15.2 Material Necessário

- Vibrador (SF9324);
- Amplificador (PI9587C);
- Membranas.

## 15.3 Procedimento Experimental

a) Com uma placa quadrada verifique as imagens formadas para uma frequência de 66 Hz e uma de 77 Hz. Faça as figuras das imagens que você observou. O que acontece para uma frequência baixa?

b) Troque a placa quadrada por uma circular. Para uma frequência de 77 Hz, desenhe uma figura da imagem que você observou. O que acontece para uma frequência baixa?

**QUESTÃO:** Que relação existe entre este experimento e a membrana timpânica do ouvido?

# Aula 16 - Batimento

## 16.1 Objetivo

Verificar o fenômeno de batimento.

## 16.2 Material Necessário

- Dois Diapasões;
- Duas caixas ressonantes;
- Martelo com ponta de borracha;
- Dois grampos.

## 16.3 Teoria

De acordo com o princípio de superposição, quando duas ondas de frequências iguais se propagam ao longo da mesma linha, em sentidos opostos, formam-se ondas estacionárias (veja por exemplo a Figura 10.1). Podemos caracterizar estas ondas por meio de um gráfico da amplitude de oscilação em função da distância. Isto ilustra um tipo de interferência que podemos denominar *interferência no espaço*.

Devemos lembrar, entretanto, que uma onda possui além de uma dependência espacial uma dependência temporal. Pelo mesmo princípio de superposição, podemos ter então, uma interferência no tempo também. Este tipo de interferência no tempo ocorre quando duas ondas de frequências ligeiramente diferentes se propagam na mesma região.

Consideremos uma região no espaço por onde estão passando duas ondas, como mostra a Figura 16.1a. A Figura 16.1a mostra o gráfico dos deslocamentos destas duas ondas em função do tempo. A vibração resultante do ponto considerado, em função do tempo, será a soma das vibrações individuais de cada onda, e o seu gráfico é mostrado na Figura 16.1b. Notamos que a amplitude da onda resultante, naquele ponto, não é constante, mas varia com o tempo, possuindo regiões de máxima e mínima interferência. No caso de ondas sonoras, a variação da amplitude origina variações na intensidade da onda que se denominam *batimentos*.

Uma aplicação do batimento é, por exemplo, a afinação de cordas. Duas cordas podem ser afinadas com a mesma frequência esticando-se uma delas, enquanto ambas são tocadas simultaneamente, até os batimentos desaparecerem.

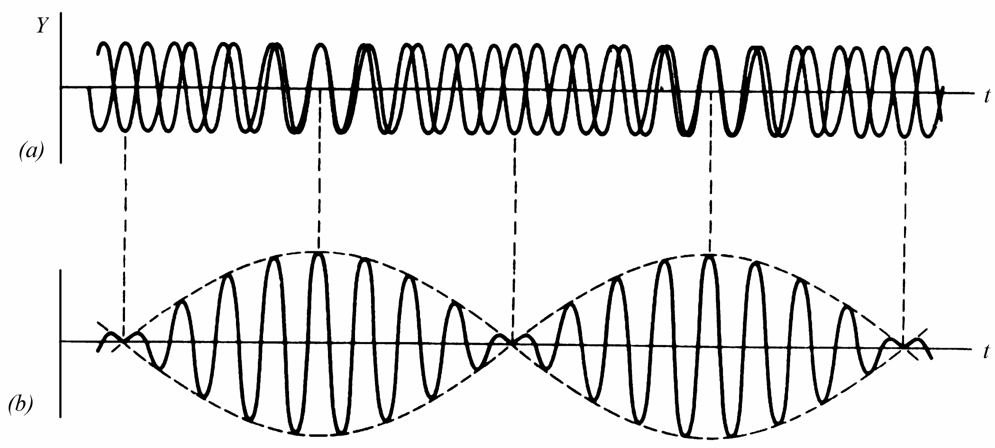



Figura 16.1

## 16.4 Procedimento Experimental

Coloque os dois diapasões próximos um do outro com as aberturas das caixas ressonantes voltadas de frente uma para a outra como mostra a Figura 16.2. Um dos diapasões deve ser um pouco diferente do outro. Isto pode ser obtido colocando pequenos cursores (veja Figura 16.3) num deles.

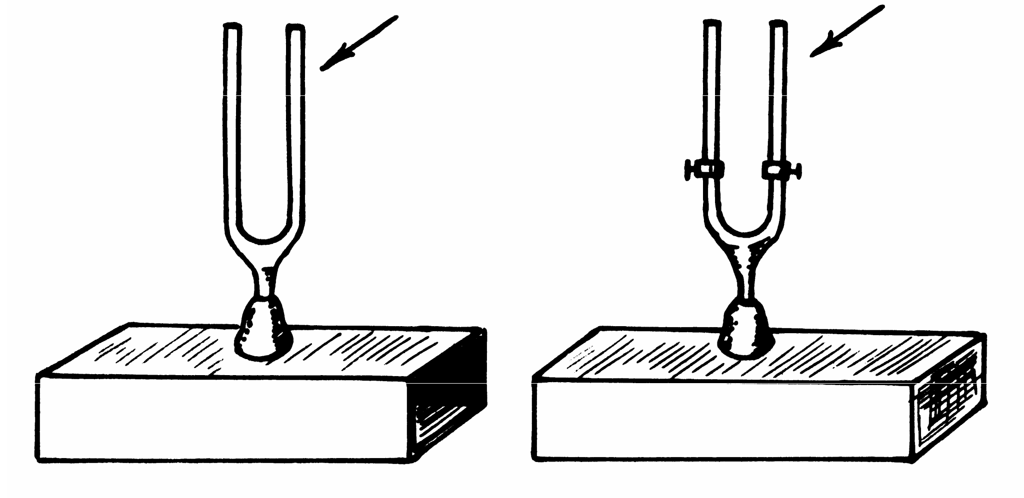


*Figura 16.2*

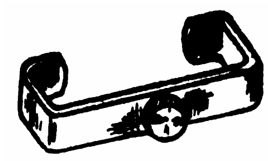


Figura 16.3

Bata simultaneamente com um martelo nos diapasões de três maneiras diferentes:

1º) Com os cursores bem embaixo, próximos à curva do diapasão conforme a Figura 16.2.

2º) Com os cursores mais acima, mais ou menos no meio do diapasão.

3º) Por último coloque os cursores bem acima na extremidade superior do diapasão.

**QUESTÃO:** O que acontece em cada caso?

No 1º caso escutamos um crescer e decrescer rítmico do som em mudanças lentas. Neste caso as frequências dos dois diapasões são quase iguais e por isso em certo tempo as fases combinam e o som é reforçado e em outro tempo as fases são opostas e o som é anulado.

No 2º caso o rítmo das mudanças é acelerado porque quanto mais acima colocamos os cursores as frequências se tornam cada vez mais diferentes.

No 3º caso, com os cursores bem em cima, o ritmo das mudanças é tão rápido que não escutamos mais batimentos, mas sim uma sensação desagradável, uma desarmonia, como diz os músicos.

**Observações**:

Parece que o nome batimento vem desta observação, pois o ruído assemelha-se a um bater. A frequência dos batimentos pode ser às vezes tão grande que é percebida como som. Por exemplo: tocando duas notas agudas e bem próximas, um ouvido apurado, escuta às vezes um som grave que não está entre as harmônicas da nota tocada. É a nota causada pelos batimentos. No rádio constatamos muitas vezes que uma estação desaparece lentamente ou enfraquece, mas pouco depois volta com força normal. Repetindo-se este fenômeno, trata-se então provavelmente de batimentos. Uma outra estação, com uma frequência próxima à primeira, está irradiando ao mesmo tempo, causando o fenômeno. Na vida prática os batimentos são frequentes. Por exemplo: sentado num ônibus velho, parado, mas com o motor ligado, escutamos uma janela ou outra peça do carro entrar em vibrações de vez em quando. Trata-se de peças cuja frequência é quase igual ao ritmo do motor. São, portanto batimentos.

# Aula 17 – Nível de Intensidade Sonora

## 17.1 Objetivo

Medir o nível de intensidade sonoro utilizando um decibelímetro.

## 17.2 Material Necessário

- Decibelímetro.

## 17.3 Conceitos Teóricos

Os pesquisadores que estudam os fenômenos relacionados com a intensidade do som, perceberam que a "sensação" produzida em nosso ouvido, pelo som de uma certa intensidade $I$, não varia proporcionalmente a esta intensidade. Por exemplo, um som de intensidade $I_2 = 2I_1$ não produz, em nosso ouvido, uma "sensação" duas vezes mais intensa do que aquela produzida por $I_1$. Na realidade, os cientistas verificaram que esta sensação varia com o logaritmo da intensidade sonora. Por esta razão, para medir esta característica do nosso ouvido, foi definida uma grandeza, $\beta$, denominada *nível de intensidade sonora,* da seguinte maneira:

$$\beta = \log\left(\frac{I}{I_0}\right), \tag{17.1}$$

onde $I$ é a intensidade da onda sonora e $I_0 = 10^{-12}$ W/m$^2$. A unidade para medida dessa grandeza $\beta$ foi denominada "bel", e o símbolo desta unidade é B (1 bel = 1 B). A unidade mais usada, porém, para a medida de $\beta$ é o "decibel", cujo símbolo é dB (1 dB = 0,1 B). Assim podemos reescrever a Eq. 17.1 como:

$$NIS = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right), \tag{17.2}$$

onde, $NIS$ é o nível de intensidade sonora cuja unidade é o dB (decibel).

O instrumento utilizado para realizar a medição de níveis de intensidade sonoro é o *Decibelímetro*, um aparelho de fácil manuseio e grande precisão. O microfone é uma peça vital no circuito, sendo sua função a de transformar um sinal mecânico (vibração sonora) num sinal elétrico. Os decibelímetros comerciais, em geral, medem numa escala que vai de 30 a 130 dB (com uma resolução de 0,1 dB) numa faixa de frequência que varia de 30 Hz a 8 kHz, tendo uma precisão de aproximadamente $\pm$1,5 dB. A Figura 17.1 mostra dois modelos comerciais de decibelímetros.


Figura 17.1 – Modelos de decibelímetros.

## 17.4 Procedimento Experimental

Meça com o decibelímetro o nível de intensidade sonoro em diferentes locais e anote os valores obtidos na tabela abaixo. Discuta as diferenças ocorridas nos valores medidos.

| Local onde foi medido | NIS (dB) |
| --- | --- |
| | |
| | |
| | |
| | |