Ministério da Educação
Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Exatas
Departamento de Física

# LABORATÓRIOS DE ENSINO DE FÍSICA

**Setor B (Eletricidade, Magnetismo e Ótica)**

**Disciplina de FÍSICA BÁSICA EXPERIMENTAL III**
**Cursos de Licenciatura e Bacharelado em Física**

# Manual de Experimentos

**Prof. Dr. Carlos A. M. de Carvalho**
**Prof. Dr. Carlos M. Lepienski**
**Prof. Dr. Dietmar W. Foryta**
**Prof. Dr. Ivo A. Hümmelgen**
**Prof. Dr. Lucimara S. Roman**
**Dr. Marcos C. Ramoni**
**Prof. Dr. Mauro G. Rodbard**
**Prof. Dr. Ney P. Mattoso Filho**
**Prof. Dr. Sergio L. M. Berleze**
**Prof. Dr. Guilherme Abreu**

**CURITIBA**

**2º Semestre de 2016**

# INTRODUÇÃO

A aprendizagem dos conceitos básicos da física é melhor desenvolvida quando se utilizam metodologias em que os fenômenos sejam apresentados em experiências simples de laboratório.

Porém, desenvolver os conceitos em laboratório não é tão simples. Necessita-se isolar os fenômenos, para que fique explícito o conceito a desenvolver. Para isto foi preparado este conjunto de experimentos com o objetivo de apresentar alguns dos conceitos básicos de eletromagnetismo e óptica.

São utilizados alguns equipamentos desenvolvidos mais recentemente e outros já utilizados há mais de um século com o mesmo fim. O objetivo final é fazer com que sejam entendidos alguns dos conceitos básicos do eletromagnetismo e da óptica.

Para que essa metodologia de curso, composto de 15 semanas com 2 horas de aula semanais, tenha êxito é necessário como contrapartida dos alunos iniciativa, criatividade e responsabilidade.

Os objetivos da disciplina são os seguintes:

- Desenvolver a capacidade de compreensão dos fenômenos físicos, a partir das atividades experimentais.
- Disciplinar as anotações de um evento experimental de forma clara e objetiva.
- Analisar e discutir os experimentos realizados, bem como seus resultados.
- Ampliar a capacidade de apresentar um relatório de um evento experimental.
- Aprimorar a crítica com relação à comparação entre os resultados experimentais obtidos e os modelos teóricos do fenômeno estudado.

## 1 ESTRUTURA E FUNCIONAMENTO DOS LABORATÓRIOS:

As seguintes regras deverão ser observadas, com o objetivo de se obter a maior eficiência do laboratório e, conseqüentemente, um melhor aproveitamento por parte dos alunos.

- Cada turma comportará, no máximo, 24 alunos.
- Cada laboratório manterá 8 bancadas experimentais disponíveis.
- Em cada bancada, trabalhará um grupo de no máximo 3 alunos e no mínimo 2.
- Os grupos serão identificados por G1, G2,..., G8 e a programação dos experimentos, por semana, é feita no início do semestre. No cronograma semestral estão estabelecidos os experimentos que serão feitos em cada semana.
- Nos roteiros de experiência, há um item denominado "**Roteiro de estudo**". As questões apresentadas deverão ser respondidas antes de cada aula, pois corresponde a uma preparação para a realização do experimento.
- A tolerância para o ingresso do aluno no laboratório será no máximo de 10 minutos.
- Alunos que justificarem a falta ou atraso, de acordo com as normas previstas no regimento da UFPR, poderão fazer o experimento, condicionado à disponibilidade de tempo de laboratório e equipamentos.

Cada grupo deve ter disponível, em cada aula, um pendrive ou um disquete, para gravar resultados de medidas e gráficos.

## 2 CRONOGRAMA DO SEMESTRE – FÍSICA EXPERIMENTAL II:

Nos quadros que se seguem estão descritas as atividades mínimas da disciplina Física Experimental II, no período de um semestre. Está prevista a realização de 3 blocos de experimentos. Cada bloco contém 4 experimentos diferentes, sendo que serão disponibilizados 2 conjuntos iguais de cada experimento, perfazendo sempre a ocupação de 8 bancadas.

As datas das aulas referem-se sempre ao início da semana, uma vez que o laboratório tem sua programação prevista por semana.

| **ATIVIDADE** | **DATA/GRUPO** | | | |
|---|---|---|---|---|
| Introdução ao Laboratório | | | | |
| | | | | |
| Introdução aos Instrumentos de Medidas Elétricas – multimetos e Principios de Circuitos Elétricos | Todos os grupos | | | |
| | | | | |
| BLOCO 1 | | | | |
| Eletrostática e Grandezas Elétricas | G1 e G2 | G3 e G4 | G5 e G6 | G7 e G8 |
| Elementos Ohmicos e não Ohmicos | G3 e G4 | G5 e G6 | G7 e G8 | G1 e G2 |
| Superfícies Equipotenciais e Campos Elétricos | G5 e G6 | G7 e G8 | G1 e G2 | G3 e G4 |
| Resitencia Interna de Fontes e Força Eletromotriz | G7 e G8 | G1 e G2 | G3 e G4 | G5 e G6 |
| | | | | |
| Resistividade de Fios e Filmes – Medidas a 4 pontas | Todos os Grupos | | | |
| | | | | |
| REVISÃO DE EXPERIMENTOS e ENTREGA DE RELATÓRIO | | | | |
| | | | | |
| 1ª PROVA | | | | |
| | | | | |
| BLOCO 2A | | | | |
| Froça Magnética sobre condutores de Corrente | G1 a G4 | | G5 a G8 | |
| Indução Magnética | G5 a G8 | | G1 a G4 | |
| | | | | |
| Introdução ao Osciloscopio | | | | |
| | | | | |
| BLOCO 2B | | | | |
| Circuitos RC e RLC – Regime Transitório | G1 a G4 | | G5 a G8 | |
| Circuitos RC e RLC – Regime Permanente Senoidal | G5 a G8 | | G1 a G4 | |
| | | | | |
| REVISÃO DE EXPERIMENTOS e ENTREGA RELATÓRIO | | | | |
| | | | | |
| 2ª PROVA | | | | |
| | | | | |
| EXAME FINAL | | | | |

## 3 AVALIAÇÃO

- **Provas escritas:**
  A disciplina terá em seu processo de avaliação, duas provas escritas e individuais, cujas datas, horário e local serão publicados no edital da disciplina**.**
  **A média aritmética destas duas notas terá peso ____ na formação da média geral.**

  Datas das provas: 1ª prova: _____.

  2ª prova: _____.

  Exame Final: _____.

- **Trabalho escrito – Relatório:**

  Serão solicitados relatórios por equipe, a serem indicado durante o semestre. O formato será especificado durante o curso.

  Esta nota terá peso _____ na formação da média geral.

## 4 FREQÜÊNCIA:

A disciplina Física Básica Experimental III tem a carga horária de ___ horas-aula. Para a aprovação é necessário ter 75% de presença. Com presença inferior a 75%, o aluno estará automaticamente reprovado.

**O aluno poderá ter no máximo ___ faltas, ou seja, faltar em ___ experiências.**

## 5 MÉDIA GERAL E MÉDIA FINAL

| |
|---|
| MÉDIA GERAL = (Média das provas escritas) × ____ + (Nota do Relatório) × ____ |

## 6 ENDEREÇO ELETRÔNICO DA DISCIPLINA:

_____

## Conteúdo

Eletrostática.....1
Eletrostática e Grandezas Elétricas.....6
Princípios de Circuitos Elétricos.....14
Instrumentos de Medidas Elétricas.....15
Elementos Ôhmicos e Não-Ôhmicos.  Potência Elétrica.....22
Determinação da Resistividade Elétrica (Medida a Quatro Terminais) e Resistência de Filme.....26
Superfícies Equipotenciais e Campos Elétricos.....30
Resistência Interna de Fontes e o Conceito de Força Eletromotriz.....32
Utilização do Osciloscópio:.....36
Circuito RC em Série e Associação de Capacitores.....42
Campo Magnético e Força Magnética Sobre Condutores de Corrente.…49
Indução Eletromagnética, Lei de Faraday e Lei de Lenz.....56
Reatância Indutiva e Reatância Capacitiva.....61
Medida da Indução Magnética em Imãs e Bobinas.....63
Transformadores, Geradores e Motores.....65
Ciclo de Histerese em Materiais Ferromagnéticos.....67

# Eletrostática

## 1 CONCEITOS BÁSICOS CONSIDERADOS:

- Cargas elétricas.
- Campo elétrico.
- Potencial elétrico.

## 2 INTRODUÇÃO:

A eletrostática trata do estudo dos efeitos causados pela presença de distribuições de cargas elétricas fixas no espaço (que não variem com o tempo).

Nesta aula exploraremos:

- Manifestações da existência de cargas elétricas.
- Observação de alguns fenômenos devidos à presença de cargas elétricas.
- Quanto vale as grandezas elétricas: carga, campo e potencial nos fenômenos observados.

## 3 OBSERVAÇÃO DOS FENÔMENOS:

### 3.1 Idéias envolvidas:

A principal força que une os materiais, de maneira geral, é de natureza elétrica; isto é, as forças interatômicas que mantêm os sólidos, os líquidos e as moléculas dos gases são essencialmente resultado da interação entre cargas elétricas. As cargas elétricas podem ser de dois tipos: cargas positivas (prótons) e cargas negativas (elétrons). Os materiais são neutros, em geral, possuindo igual número de elétrons e de prótons. Os elétrons são fáceis de serem removidos e quando existir excesso de elétrons dizemos que o material está negativo; se houver falta de elétrons o material é dito positivo. A remoção de elétrons de um corpo pode ser feita simplesmente atritando um corpo em outro. Aquele que tiver maior afinidade por elétrons ficará carregado negativamente. A quantidade de carga elétrica retirada ou adicionada a um corpo é sempre um múltiplo inteiro da carga do elétron que é igual a $1{,}6 \times 10^{-19}$ coulombs.

### 3.2 Demonstrações:

- Arrepiar cabelos.
- Acender lâmpada fluorescente.
- Linhas de campo elétrico.
- Repulsão ou atração de chama de vela.

Estas demonstrações têm caráter puramente ilustrativo e devem ser observadas com cuidado sem, contudo, prender-se aos detalhes. A interpretação dos fenômenos deve ficar clara no decorrer da aula.

### 3.3 **Experimento 1** - *Repulsão entre corpos com cargas iguais.*

*3.3.1 Material*:

- Três canudos de suco, sendo dois presos por barbante.
- Pedaço de flanela.
- Caixa de fósforos.

*3.3.2 Previsões:*

Suspenda os canudos pelo barbante e atrite-os com o papel. Admitindo que elétrons sejam retirados do papel ficando aprisionados no canudo de plástico, que é um bom isolante, os canudos deverão se repelir.
Obs: Existem tabelas que indicam qual é o material que ganha e qual aquele que perde elétrons quando são atritados.

*3.3.3 Exploração:*

- Os canudos realmente se repelem?
  Aproxime seu dedo dos canudos carregados e observe o que acontece. Explique o que aconteceu.
- Atrite o terceiro canudo e aproxime-o dos outros.
- A força de repulsão depende da força com que os canudos são atritados?
- Como poderíamos proceder para descarregar os canudos?
  Acenda um fósforo logo abaixo dos canudos carregados e observe o que acontece.
  **Deixe um determinado afastamento entre a chama e os canudos, para que estes não queimem.**

**3.4 <u>Experimento</u> <u>2</u> -** *Atração entre um corpo carregado e um corpo neutro. Repulsão entre corpos com mesma carga.*

*3.4.1 Material*:

- Dois pedaços de saco plástico, um deles medindo aproximadamente 50 cm $\times$ 50 cm e o outro 10 cm $\times$ 10 cm.
- Pedaço de flanela.

*3.4.2 Previsões*:

No experimento 1 aprendemos que se atritarmos papel com plástico, o plástico ficará carregado. Assim, tomando dois pedaços do mesmo plástico e atritando ambos com o mesmo papel, poderemos fazer com que estes pedaços sofram repulsão. O pedaço menor deverá flutuar sobre o pedaço maior quando um for colocado sobre o outro.

*3.4.3 Exploração*:

Note que quando atritado, o plástico é atraído pela mesa que esta descarregada, isto se deve a indução de cargas na superfície da mesa (polarização elétrica).
Observe que o plástico é atraído por qualquer corpo descarregado devido ao fenômeno de polarização por indução.
Segurando nas quatro pontas do plástico maior e tendo colocado o pedaço menor próximo ao centro deste levante-o afastando da mesa (após ter atritado ambos os pedaços). Observe o que acontece.
Repita o procedimento caso não tenha acontecido nada de interessante.

**3.5 <u>Experimento</u> <u>3</u> -** *Interação entre a chama de uma vela e um corpo com forma de ponta carregado.*

## 4 AVALIAÇÃO DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS ENVOLVIDAS:

**<u>Experimento</u> <u>1</u>** - *Lei de Coulomb. Estimativa dos valores de carga, campo e potencial elétricos.*

*4.1 Material.*

- Gerador van der Graaff.
- Bolinhas de isopor presas num barbante.

*4.2 Introdução e definições.*

A unidade de medida de carga elétrica é o coulomb, e esta é quantizada. Isto é, não pode ser subdividida em partes menores do que a carga de um elétron que é de $1{,}60 \times 10^{-19}$ C (C: coulomb).

Uma maneira mais eficiente de carregarmos os corpos consiste na utilização de geradores como o gerador de van der Graaff, onde um motor elétrico promove o atrito constante entre uma correia de borracha e um outro material que, por exemplo, cede elétrons. Os elétrons são transportados pela correia até uma esfera metálica ôca onde se acumulam. Com este processo contínuo de reposição das cargas na esfera, podemos acumular tanta carga quanto os isolamentos da esfera e o ar possam suportar, antes que se rompam eletricamente. O rompimento elétrico de um isolante se dá quando for atingido o limite de rigidez dielétrica deste, resultando em uma descarga elétrica, por exemplo, na forma de centelha.

O acúmulo de cargas de mesmo sinal em uma determinada região gera a tendência destas de se afastarem e buscarem regiões onde possam ser neutralizadas.

Definições de potencial elétrico e de campo elétrico:

Quando elevamos um objeto, este adquire uma energia que chamamos de energia potencial gravitacional. A energia potencial dividida pela massa do corpo é uma característica do campo gravitacional, e depende da altura que o corpo foi levantado. Analogamente, quando a partir de um corpo neutro separamos cargas elétricas, geramos uma energia potencial elétrica que depende das cargas envolvidas e das distâncias entre elas.

O *Potencial Elétrico* em um ponto do espaço, produzido por uma determinada distribuição de cargas, pode ser obtido calculando-se a energia potencial elétrica por unidade de carga. Sua unidade de medida no Sistema Internacional é o volt (símbolo V).

À medida que aproximamos as cargas de uma determinada região, o potencial elétrico nesta região aumenta. A variação do potencial elétrico numa certa distância se relaciona com a tendência das cargas em se deslocarem e é chamada *Campo Elétrico*. Sua unidade de medida no Sistema Internacional é volt / metro (V/m).

*4.3- Previsões:*

A carga se acumula na esfera do gerador van der Graaff e, quando aproximamos objetos, deverão ocorrer descargas. Estas descargas acontecem devido ao alto potencial elétrico próximo da esfera carregada, e ao intenso campo elétrico gerado entre a esfera e o objeto que se aproximou. Este campo elétrico é tão intenso que rompe a chamada rigidez dielétrica do ar.

A rigidez dielétrica do ar seco é de aproximadamente 10.000 V/cm. Assim, campos elétricos maiores do que este valor fazem com que as cargas se movam pelo ar. Normalmente estas descargas ocorrem em avalanches com a formação de íons no ar.

*4.4- Exploração:*

- Aproxime objetos diferentes da esfera do gerador e observe o que acontece.
- Faça uma estimativa da distância para a qual as faíscas começam a saltar.
- Supondo que a rigidez dielétrica do ar seja 10.000 V/cm, calcule os valores aproximados de:
  - campo elétrico.
  - potencial elétrico da esfera.
  - carga elétrica acumulada na esfera.

Nesta parte deveremos fazer cálculos estimativos que nos permitam ter idéia do significado físico de grandezas que medem carga, campo e potencial elétricos. Assim, faremos cálculos estimativos que nos permitam uma análise quantitativa dos fenômenos observados. Da mesma forma que sabemos fazer estimativas de distâncias, pesos, etc., gostaríamos também de saber fazê-las com grandezas elétricas.

*4.5- Cálculo:*

Para nossas estimativas das grandezas elétricas necessitamos de alguns conceitos físicos.

**Lei de Coulomb:**

Coulomb observou que o módulo da força elétrica entre duas distribuições esféricas de cargas era proporcional ao produto das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os centros destas. Esta lei pode ser expressa, sob forma escalar, como:

$$F = k\frac{Q\,q}{r^2}.$$

Onde

- $k$ é uma constante que depende do meio material onde estão as cargas (**$k = 8{,}99 \times 10^9\ \mathrm{N}\cdot\ \mathrm{m}^2/\mathrm{C}^2$** para o ar seco).
- $q$ é a carga que aproximamos do gerador de van der Graaff.
- $Q$ é a carga acumulada na esfera do gerador.
- $r$ é a distância entre o centro das cargas.

**Campo Elétrico:**

O módulo do campo elétrico pode ser definido como a força por unidade de carga. Assim, o campo elétrico produzido pela carga Q do gerador será dado por:

$$E = \frac{F}{q}$$

$$E = k\frac{Q}{r^2}$$

**Potencial Elétrico:**

Para evitar a utilização de recursos matemáticos mais avançados, definiremos somente a diferença de potencial elétrico a partir do campo elétrico. O campo elétrico representa a variação do potencial com a distância, assim, podemos escrever:

$E$ = [variação do potencial / variação da distância ] = $(V_2 - V_1)$ / $(r_2 - r_1)$

variação do potencial = $(V_2 - V_1)$
variação da distância = $(r_2 - r_1)$
onde,
$V_2$ e $V_1$ representam os potenciais elétricos nas posições $r_2$ e $r_1$ , respectivamente.
Se admitirmos que as faíscas saltam do potencial da esfera ($V_2$) para o potencial zero ($V_1$) do objeto aproximado do gerador, então poderemos fazer uma estimativa do potencial na superfície da esfera.

**Carga acumulada no gerador de van der Graaff:**

A partir da definição $E = k.Q/r^2$ , fazendo-se uma estimativa da distância $r$ e sabendo-se o valor de $k$, pode-se calcular $Q$ utilizando-se o valor do campo elétrico que rompe a rigidez dielétrica do ar.

- Aproxime as esferas de isopor do gerador ligado e observe que dependendo da situação esta é atraída ou repelida. Procure entender fisicamente os fenômenos de atração e de repulsão. Lembre de levar em conta se o fio que prende o isopor é realmente um bom isolante.
- Com a esfera de isopor sendo repelida aproxime a mão desta e observe o que acontece.

⇨ Sabendo-se a massa das esferas de isopor, o comprimento do fio, e determinando-se o ângulo do fio podemos, a partir da condição de equilíbrio de forças, determinar $Q$ e, posteriormente $q$. Assim, teremos um eletroscópio que nos fornecerá a carga acumulada no gerador de van der Graaff.

# Eletrostática e Grandezas Elétricas

## 1 INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO:

A maioria de nós consegue avaliar claramente o significado físico de grandezas que medem comprimentos, tempo, massa e peso. Quando nos referimos à velocidade e aceleração a dificuldade aumenta, mas ainda costumamos avaliar intuitivamente os significados físicos destas grandezas, classificando-as como pequenas, médias ou grandes nas várias circunstâncias em que ocorrem.

Entretanto, quando nos referimos a grandezas elétricas, magnéticas ou ópticas, a maioria das pessoas não tem a menor noção do que a magnitude destas grandezas representa fisicamente.

Nesta aula procuraremos exercitar o uso de grandezas elétricas que medem carga elétrica, potencial elétrico e campo elétrico. É claro que para nos familiarizarmos com estas grandezas, algumas definições terão que ser relembradas.

A eletrostática está presente em várias atividades modernas como pintura, cópias do tipo xerox, sistemas antipoluentes, transporte de combustíveis, processamento de cereais, etc...

## 2 MATERIAL UTILIZADO:

Fonte de tensão contínua, eletrômetro, esferas condutoras isoladas, gaiola de Faraday, bastões de prova e bastões condutores.

## 3 APRENDIZADO:

Utilizando o material acima vamos aprender sobre os efeitos causados pela presença de cargas elétricas, avaliando a magnitude destas cargas, o valor do campo elétrico por elas causado e os potenciais elétricos provocados pela presença destas cargas. As definições das grandezas: carga, campo e potencial elétricos podem ser consultadas em qualquer livro texto de física básica.

## 4 OBJETIVOS:

Nesta parte executaremos uma série de experimentos procurando:

- Observar e prever efeitos causados pela presença de cargas elétricas.
- Fazer estimativas dos valores das cargas acumuladas nos diversos materiais.
- Determinar o sinal das cargas acumuladas.
- Determinar os valores dos potenciais e campos elétricos presentes.
- Verificar a distribuição de cargas em diferentes disposições geométricas.

## 5 ROTEIRO DE ESTUDO:

1) Quais os tipos de cargas elétricas existentes?
2) O que acontece quando colocamos duas cargas de mesmo sinal próximas?
3) O que ocorre com duas cargas de sinais diferentes?
4) O que diz a lei de Coulomb?
5) Diferencie, de uma maneira simples, condutores de isolantes.
6) Quais os processos mais comuns para transferir carga de um corpo para outro.
7) Qual grandeza física é medida com um voltímetro?
8) Como podemos diminuir o efeito da presença de cargas elétricas externas a um sistema, no qual se deseja efetuar medidas elétricas?
9) Qual a unidade de carga elétrica no S.I. ?

## 6 O ELETRÔMETRO E A ELETROSTÁTICA:

A eletrostática é o estudo das cargas elétricas e suas características. Para estudar experimentalmente a eletrostática torna-se necessário o uso de algum tipo de aparelho que detecte a presença de cargas. O mais comum destes aparelhos é o eletroscópio, que consiste basicamente de duas folhas muito finas de ouro suspensas verticalmente de um ponto comum. Quando um objeto carregado é colocado em contato com o eletroscópio, as folhas de ouro se separam, indicando - de modo grosseiro - a magnitude da carga. Um eletrômetro é o que se pode chamar de eletroscópio eletrônico, onde um ponteiro se movendo sobre uma escala calibrada substitui a repulsão das folhas de ouro. Este instrumento é bem mais sensível que os eletroscópios, pois requer uma quantidade menor de carga para se realizar uma medida, com a vantagem de indicar diretamente a polaridade da carga. A grandeza medida quando uma carga elétrica se aproxima do eletrômetro é a diferença de potencial (voltímetro). No esquema da Figura 1 é mostrado como o eletrômetro é utilizado para medir a diferença de potencial devido à aproximação de um corpo eletrizado: quando um corpo eletrizado positivamente se aproxima do terminal do eletrômetro este acusa um potencial positivo.

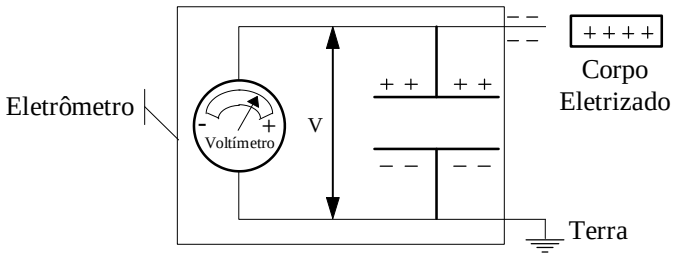



FIGURA 1 – Eletrômetro medindo cargas.

## 7 GAIOLA DE FARADAY:

Este dispositivo opera de acordo com o princípio de que uma carga colocada dentro de uma superfície condutora induzirá uma carga igual na superfície externa. Neste caso, tem-se um cilindro aramado montado sobre uma base isolante e, em volta dele, outro cilindro do mesmo material.

## 8 MONTAGEM EXPERIMENTAL:

- Conecte o cabo do eletrômetro à gaiola: o cabo preto, que fornece o aterramento, no cilindro externo, e o vermelho no cilindro interno. Veja a Figura 2.
- Ligue o eletrômetro e selecione inicialmente a escala de 100 V;
  Quando não há cargas na gaiola de Faraday , o eletrômetro deve acusar leitura igual a 0 V.
- Zere (ou descarregue) o eletrômetro conforme o item “CALIBRAÇÃO”, a seguir.

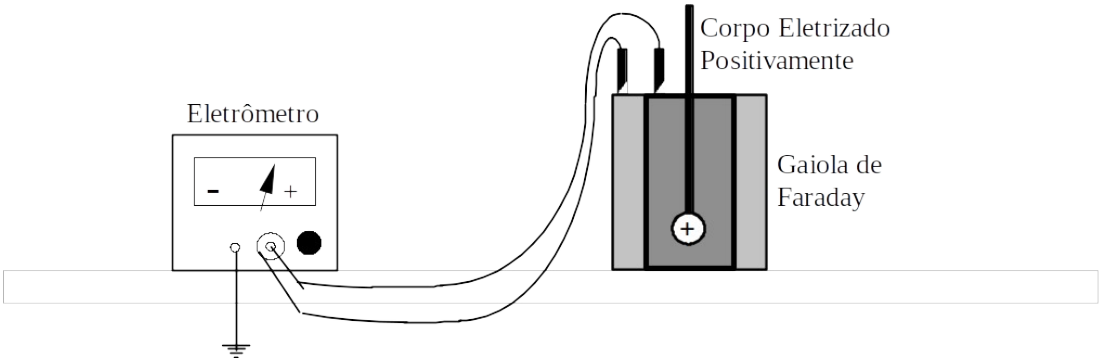



FIGURA 2 – Esquema da montagem experimental.

**CALIBRAÇÃO:** Quando o aparelho está devidamente calibrado e descarregado, o ponteiro se encontra sobre o valor "0". Caso não esteja, pode ser que não esteja corretamente calibrado. Neste caso proceda da seguinte maneira:

- antes de ligar o aparelho, observe se o ponteiro está sobre o valor "0". Se não estiver, gire o pequeno parafuso que se encontra abaixo do mostrador, até este ficar zerado;
- ligue o eletrômetro;
- gire o botão superior "FUNCTION" para "3";
- gire o botão inferior para a posição "ZERO LOCK";
- gire o botão "ZERO ADJUST" até o ponteiro indicar "0";
- retorne este botão para a posição inicial "PUSH TO ZERO";
- conecte o cabo de teste do eletrômetro ao terminal "INPUT";
- conecte o cabo terra ao terminal "GND". (O pino de "terra" está indicado nas tomadas em cada bancada).

## 9 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE RESULTADOS:

⇨ Antes de iniciar o processo de atrito entre bastões, é necessário encostá-los em alguma parte aterrada, para descarregar cargas residuais.

⇨ Antes de iniciar as medidas, encoste momentaneamente suas mãos na gaiola aterrada para eliminar as cargas em excesso existentes nas mãos.

⇨ Após atritar os bastões, enquanto estiver fazendo medidas com um deles, evite que o outro encoste na mesa ou nas mãos, o que provocaria uma rápida descarga.

### Experimento I – SEPARAÇÃO DE CARGAS POR ATRITO:

- Atrite o bastão azul contra o branco, e coloque um deles dentro da gaiola. Não o encoste na gaiola. Modifique a escala do eletrômetro até a menor escala possível para se obter a melhor leitura. Anote a leitura do mostrador do eletrômetro.
- Retire o primeiro bastão da gaiola e coloque o outro bastão. Verifique a leitura novamente.

1) *As duas leituras foram iguais? O que se pode concluir deste fato?*
2) *Identifique a polaridade das cargas produzidas nos bastões branco e azul.*

- Atrite novamente os dois bastões.
- Insira um deles no interior da gaiola e encoste-o na gaiola. A seguir, retire o bastão. Anote a leitura do eletrômetro, $V_1$.
- Zere o aparelho. Insira o mesmo bastão dentro da gaiola.

3) *Qual foi a leitura do mostrador nesta situação? Explique o que aconteceu.*

- Zere o aparelho e coloque o outro bastão na gaiola, tocando-a com ele. Anote a leitura do eletrômetro, $V_2$ .

4) *O que se pode concluir, quando se compara $V_1$ e $V_2$ ?*

**NOTA**: Quando estiver medindo, introduza sempre o bastão na metade inferior da gaiola. Faça um pequeno teste: introduza um dos bastões atritados apenas 1 cm abaixo da borda superior da gaiola e compare a leitura do eletrômetro quando o bastão é colocado na metade inferior. Como se explica este fato ?

- Insira um dos bastões previamente carregado dentro da gaiola de Faraday, sem tocá-la. Anote a leitura do eletrômetro. $V_1$ = _____
- Remova o bastão e anote a leitura do eletrômetro. $V_2$ = _____
- Insira o mesmo bastão e o encoste na gaiola. Remova-o e anote a leitura do eletrômetro. $V_3$ = _____
- Descarregue a gaiola. Encoste novamente o bastão dentro da gaiola. Anote a leitura do eletrômetro. $V_4$ = _____

*5) Com base no valor de $V_4$ , permaneceu alguma carga no bastão, após encostá-lo na gaiola?*

6) *Comparando $V_1$ e $V_3$ , o que se pode concluir sobre a carga induzida na gaiola em relação, a carga contida de fato no bastão?*

- Atrite os bastões um contra o outro.
- Meça a magnitude e a polaridade de suas cargas com o eletrômetro.
- Descarregue os bastões e atrite-os dentro da gaiola, sem tocá-la. Qual é a leitura do eletrômetro?
- Remova um dos bastões e verifique o eletrômetro. Recoloque o bastão e retire o outro. Anote a leitura do eletrômetro.
- Descarregue os bastões e o eletrômetro. Atrite o bastão branco com um dos bastões pretos (condutores). Meça a magnitude e a polaridade de suas cargas com o eletrômetro.
- Repita o procedimento anterior trocando o bastão branco pelo azul. Anote os resultados.

**Experimento II - DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS ( ELETRIZAÇÃO POR INDUÇÃO):**

Nesta parte iremos analisar a variação da densidade de carga (ou da distribuição de carga) através de amostragem, utilizando para isso um bastão com um condutor isolado na extremidade (preto), colocado em contato com diferentes regiões da superfície do condutor que se deseja estudar. Esses condutores serão esferas pintadas com tinta condutora.

⇨ *Nesta etapa iremos estudar a redistribuição da carga sobre uma esfera neutra devido à proximidade de uma outra esfera carregada positivamente.*

- Coloque as duas esferas distantes 3 centímetros uma da outra, conforme a Figura 3;
- Aterre momentaneamente as duas esferas, ligando o seu parafuso de conexão, com um pedaço de fio, a um ponto ou terminal de aterramento.

**ATENÇÃO: NUNCA TENTE MEDIR A TENSÃO DA FONTE USANDO DIRETAMENTE O ELETRÔMETRO. ESTE EQUIPAMENTO SUPORTA TENSÕES DE NO MÁXIMO 100V.**

- Conecte uma das esferas ao terminal verde da fonte de tensão para que fique carregada a um potencial de +1000 V em relação a terra; a outra esfera deverá estar desconectada, isto é, funcionar como um condutor isolado.

- Com o bastão totalmente preto deverão ser medidas as cargas nos pontos em 0°, ±30°, ±60°, ±90°, ±120°, ±150° e 180° da esfera carregada e os pontos análogos da esfera isolada (veja a Figura 3). Em cada ponto toque com a parte condutora do bastão preto em cada região. Encoste o bastão no interior da gaiola de Faraday conectada ao eletrômetro e meça a magnitude do potencial para cada região em análise. Antes de tocar a esfera novamente, verifique se o bastão condutor e a gaiola de Faraday estão descarregados (basta pressionar o botão "PUSH TO ZERO" para descarregar a gaiola). Anote estes valores na tabela 1.

Deve ser enfatizado que a diferença de potencial medida no eletrômetro não representa o potencial dos pontos sobre a esfera, mas sim uma diferença de potencial entre os cilindros da gaiola de Faraday devido ao efeito de indução provocado pela carga amostrada no bastão. Na realidade o potencial sobre cada esfera é constante, pois elas são condutoras e constituem uma superfície equipotencial.

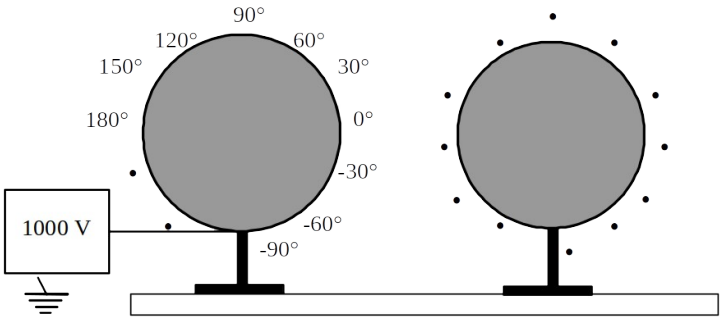



FIGURA 3 - Pontos de amostragem do potencial.

⇨ *Nesta etapa iremos provocar o carregamento da esfera inicialmente neutra, fazendo um contato momentâneo com a terra, e estudar a nova distribuição da carga.*

- Aterre momentaneamente a segunda esfera, ligando o seu parafuso de conexão, com um pedaço de fio, a um ponto ou terminal de aterramento.
- Meça a magnitude do potencial do bastão preto (condutor) que você encostou nos pontos indicados. Anote os valores na Tabela 1.

⇨ *Nesta etapa iremos estudar a redistribuição de carga sobre as esferas quando a distância entre elas é aumentada. Será avaliado o efeito da distância entre os corpos carregados.*

- Afaste a primeira esfera, carregada a 1000 VDC, da segunda esfera no mínimo 50 cm. Meça novamente a magnitude do potencial nos pontos indicados:
- Desligue a fonte de 1000 VDC.

**TABELA 1** – Distribuição de carga nas esferas

| Esfera | Região | Separação das esferas = 3cm | Separação das esferas =3cm. Medida após aterramento da esfera isolada. | Separação das esferas = 50cm. |
|---|---|---|---|---|
| | | ddp no eletrômetro (volts) | ddp no eletrômetro (volts) | ddp no eletrômetro (volts) |
| Conectada à fonte | 0º | | | |
| | 30º | | | |
| | 60° | | | |
| | 90° | | | |
| | 120° | | | |
| | 150° | | | |
| | 180° | | | |
| | -30° | | | |
| | -60° | | | |
| | -90° | | | |
| | -120° | | | |
| | -150° | | | |
| Isolada | 0° | | | |
| | 30° | | | |
| | 60° | | | |
| | 90° | | | |
| | 120° | | | |
| | 150° | | | |
| | 180° | | | |
| | -30° | | | |
| | -60° | | | |
| | -90° | | | |
| | -120° | | | |
| | -150º | | | |

7) *Faça um desenho esquemático mostrando, como ficou a distribuição de cargas nas duas esferas, antes e depois de aproximá-las.*

*8 )O que produziu a distribuição de cargas em cada etapa do experimento?*

9) *Permaneceu alguma carga na segunda esfera após ter sido aterrada? Explique o que aconteceu.*

10) *Explique a diferença da leitura antes e depois do aterramento.*

## 10 GRÁFICOS CARTESIANOS E GRÁFICOS POLARES:

Para analisar graficamente a relação entre grandezas num processo, normalmente empregam-se gráficos cartesianos. Porém, existem outras formas de representação. Um exemplo são os gráficos polares. Estes gráficos são úteis quando o sistema físico ou a grandeza estudada tem uma distribuição esférica ou cilíndrica. Neste caso cada ponto é posicionado pelas coordenadas radial e angular. A coordenada angular especifica a direção ao longo da qual a função está sendo avaliada, e a coordenada radial é proporcional à magnitude desta função. Este tipo de gráfico encontra aplicação nas diferentes áreas da Física, por exemplo, no eletromagnetismo, na acústica e na óptica.

Como os gráficos polares usualmente não são encontrados no dia a dia, é natural que tenhamos alguma dificuldade para interpretar um gráfico deste tipo. Como ilustração, consideremos o fenômeno da difração da luz ao incidir sobre uma fenda única de largura comparável ao comprimento de onda. Após atravessar a fenda, a luz se irradia em todas as direções do semi-espaço com intensidades diferentes, sendo máxima ao longo do eixo óptico e decrescendo para outros ângulos. Este comportamento está representado na Figura 1(a) na forma cartesiana e 1(b) na forma polar. Ambos os gráficos representam a mesma função, mas sob formas diferentes. Compare estas duas figuras e procure entender como se interpreta um gráfico polar.

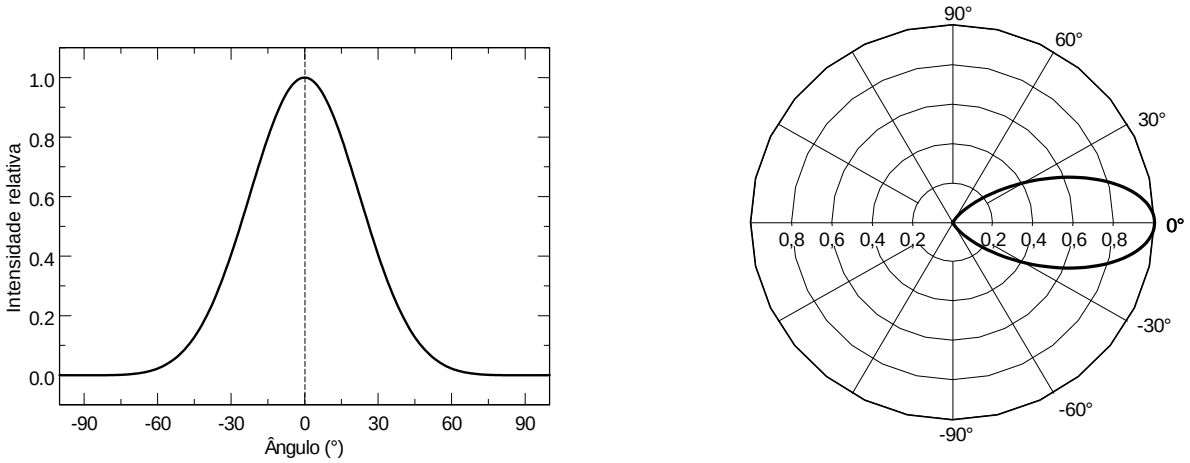



Figura 1 – Intensidade da luz difratada em função da direção de difração. (a) forma cartesiana e (b) forma polar.

Devemos observar que neste tipo de gráfico a grandeza representada na coordenada radial é sempre positiva. Assim, se houver a necessidade de representar alguma grandeza que assuma valores positivos e negativos, como é o caso da carga elétrica, é preciso utilizar um símbolo gráfico (p. ex. ● e ■ ) para distinguir os sinais da grandeza e representá-la em módulo.

Com base no que foi exposto, represente em gráficos polares os potenciais medidos e registrados na Tabela 1. Utilize a página anexa. Faça um gráfico para cada esfera, nas três situações estudadas.

- A partir destes gráficos, discuta a distribuição de cargas sobre as esferas.

- Para uma das esferas, numa das situações, faça também um gráfico cartesiano dos potenciais medidos em função do ângulo. Compare os dois gráficos correspondentes.

# Princípios de Circuitos Elétricos

## 1 INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO:

Os equipamentos que utilizam energia elétrica para seu funcionamento estão baseados em circuitos elétricos, que permitem a passagem de cargas elétricas pelos mesmos. Hoje a nossa investigação se aterá aos princípios de funcionamento de circuitos elétricos.

Pode parecer fácil montar e analisar de circuitos elétricos simples. Porém, esses fundamentos devem ser bem entendidos por todos, para que se consiga um bom aproveitamento em todas as experiências desta disciplina.

## 2 OBJETIVOS:

- Montar circuitos simples com lâmpadas, baterias e resistores.
- Construir circuitos a partir de esquemas.

## 3 MATERIAL UTILIZADO:

- Baterias
- Lâmpadas
- Resistores
- Placa para conexão de resistores.
- Cabos para conexões.

## 4 PROCEDIMENTO, PREVISÕES E EXPLORAÇÃO:

- Utilizando os materiais disponíveis, monte circuitos que possam acender lâmpadas.
- Faça montagens que permitam associar lâmpadas e resistores formando circuitos em série e em paralelo observando que:

⇨ Um circuito tem seus elementos associados em série quando a variação de potencial ao longo do circuito é igual à soma das variações de potencial ao longo dos elementos do circuito.

⇨ Um circuito tem seus elementos associados em paralelo quando a variação do potencial é a mesma para todos os elementos do circuito.

É importante ressaltar que os circuitos mais complexos, em geral, são compostos por subunidades formadas por circuitos em série e subunidades formadas por circuitos em paralelo.

## 5 QUESTÕES:

1) Esboce os circuitos montados e indique os elementos constituintes.
2) Descreva os principais problemas encontrados na montagem dos circuitos.
3) Considere três resistores com valores $R_1$, $R_2$ e $R_3$ diferentes. Quantos circuitos diferentes você pode formar associando estes resistores? Esboce as associações.
4) Quais as características da associação de pilhas em série e em paralelo? Que cuidados devemos observar com relação à polaridade e à diferença de potencial de cada pilha?
5) Faça esquemas de outros circuitos e monte-os, utilizando o material disponível.

# Instrumentos de Medidas Elétricas

## 1 INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO:

Nas primeiras aulas investigamos algumas manifestações da presença de cargas elétricas, considerando somente os aspectos estáticos. Aqueles fenômenos foram descritos pela lei de Coulomb e pelas definições de campo elétrico, de potencial elétrico e de densidade de carga elétrica.

Nesta aula continuaremos a investigação de fenômenos que envolvem o movimento das cargas. Dedicaremos nosso tempo no aprendizado de técnicas de medidas de corrente elétrica e de diferença de potencial ou tensão, devidas à passagem da corrente elétrica em elementos resistivos. Serão discutidos também os conceitos envolvidos.

Os conceitos básicos que utilizaremos em tal estudo são:

⇨ Definição de corrente elétrica: $I = \frac{dq}{dt}$ ou $q = \int I(t)\,dt$ .

⇨ Definição de resistência (R): V = RI . De fato não contém nenhum conceito físico novo além da definição de resistência e a aplicação da lei de Coulomb.

⇨ Princípio de conservação da carga elétrica: A carga que entra em um nó de um circuito é necessariamente igual à carga que sai deste nó.

## 2 OBJETIVOS:

- Familiarizar-se com os instrumentos de medida de tensão, corrente e resistência elétrica.
- Estabelecer quais são os princípios de funcionamento dos multímetros em geral.
- Familiarizar-se com unidades das grandezas elétricas como: volts, ampères e ohms.
- Estabelecer “regras de soma” de resistores associados em série e em paralelo.

## 3 AMPERÍMETROS, VOLTÍMETROS E OHMÍMETROS:

Em várias situações torna-se necessário efetuar medidas de diferentes grandezas elétricas em circuitos de corrente contínua ou corrente alternada. Os dispositivos que medem *intensidade de corrente elétrica*, *diferença de potencial* e *resistência elétrica* são, respectivamente, os *amperímetros*, *voltímetros* e *ohmímetros*. É comum encontrar estes três instrumentos reunidos em apenas um equipamento, denominado de *multímetro*. Esse equipamento múltiplo é composto basicamente de três partes: sensor de corrente, resistências acopladas e indicador de valores.

- *Sensor de corrente*: O princípio básico que é utilizado num multímetro é a capacidade de medir correntes elétricas. Nos multímetros analógicos o papel de “sensor de corrente” é desempenhado por um galvanômetro (galvanômetro de D’Arsonval), que consiste em uma bobina colocada sob a influência do campo magnético de um ímã. A bobina pode girar em torno de um eixo, e quando a corrente passa através dos fios da bobina a força magnética em cada parte do fio fará a bobina girar em torno do eixo. Colocando-se uma mola para realizar uma força contrária a esse movimento pode-se girar a bobina de ângulos diferentes para valores diferentes da corrente que por ela passa.
- *Resistências acopladas*: As resistências são colocadas em série ou em paralelo com o galvanômetro para realizar uma calibração do equipamento para os diferentes usos do multímetro.
- *Indicador de valores*: Um ponteiro e uma escala calibrada.

O galvanômetro de D'Arsonval que é amplamente utilizado em instrumentos analógicos tem sido substituído por sistemas digitais sem partes móveis. No laboratório dispomos de ambos os sistemas. Verifique quais são os multímetros analógicos e onde está o galvanômetro.

Nos multímetros digitais, continuam sendo três as partes principais:

- o *sensor* é um circuito eletrônico que compara uma corrente a medir com um valor pré-determinado gerado no próprio aparelho;
- o conjunto de *resistências* é praticamente o mesmo, variando apenas os valores absolutos;
- o *indicador* de valores é um dispositivo eletrônico onde os valores são transformados em dígitos (números).

Note que em qualquer medida de grandeza física o sistema de medida interfere em maior ou menor intensidade no valor a ser medido. **O objetivo de quem desenvolve o instrumento é sempre fazer com que a interferência do instrumento seja menor do que a resolução necessária para as medidas de interesse.**

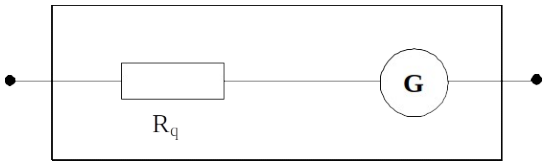



FIGURA 1 – Voltímetro.

Na Figura 1 apresentamos um voltímetro com o galvanômetro e a resistência acoplada $R_q$ (queda), colocada em série com o galvanômetro. Essa resistência tem valor elevado e com isto a corrente que atravessa o galvanômetro é pequena devido ao fato de que a maior parte da diferença de potencial fica aplicada no resistor $R_q$.

Com a aplicação de uma diferença de potencial ao conjunto aparecerá uma corrente circulando pelo galvanômetro. Se a resistência em série for baixa, a corrente no galvanômetro será demasiadamente alta e o instrumento será danificado. **Um dos maiores cuidados que se deve tomar ao se utilizar um multímetro é não passar altas correntes pelo galvanômetro**, **quando o multímetro está ajustado para medir baixas diferenças de potencial ou ajustado para medir correntes**. Neste caso uma corrente elevada passará pelo galvanômetro e o instrumento não irá suportar tal situação. Portanto, muito cuidado deve ser tomado na hora de utilizar esse equipamento. Por isto devemos sempre escolher corretamente qual função será utilizada e começar a medir sempre da maior escala, baixando para menores valores à medida que o valor medido assim o permitir.

Na Figura 2 é apresentado um amperímetro, onde o galvanômetro e a resistência acoplada $R_d$ são colocadas em paralelo.

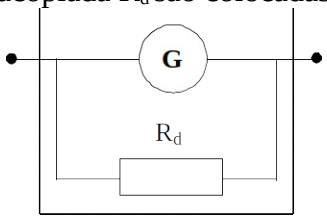



FIGURA 2 – Amperímetro.

Neste caso, se aplicarmos grandes diferenças de potencial, a corrente no galvanômetro será elevada e o instrumento ficará danificado. Para diferentes escalas de medida da corrente deveremos utilizar diferentes valores da resistência $R_d$. O papel de $R_d$ neste caso é diminuir o valor da corrente que passa pelo galvanômetro. Assim, se quisermos medir grandes correntes deveremos utilizar baixos valores para $R_d$.

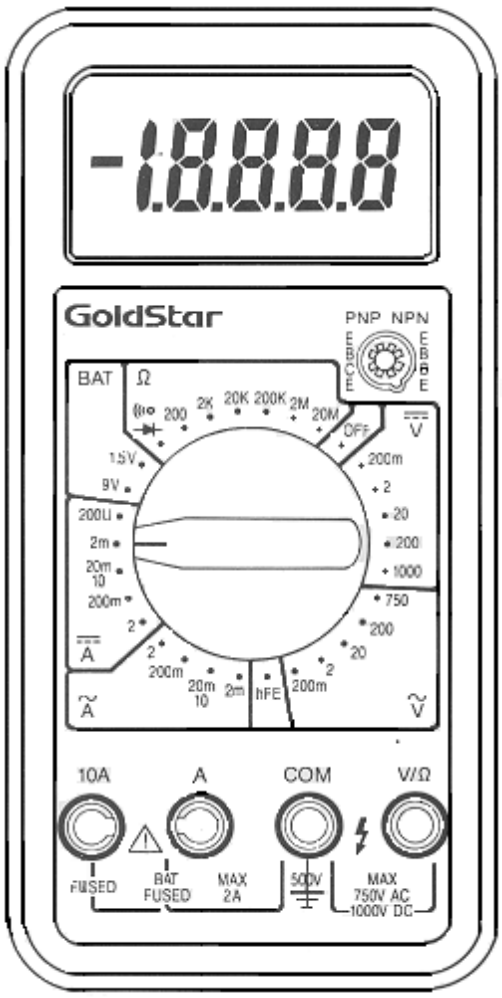



FIGURA 3 – Multímetro.

Na Figura 3 temos um desenho do aspecto externo do multímetro que iremos utilizar nos experimentos. Podem ser observados o mostrador e as diferentes escalas para as funções: amperímetro, voltímetro e ohmímetro. Aparecem também os pontos onde devem ser ligados os cabos, também chamados de "pontas de prova", para as funções de voltímetro, ohmímetro e amperímetro.

### 3.1 MODO DE OPERAÇÃO DO AMPERÍMETRO

- Gire a chave seletora do multímetro para a região **Ã** - quando estiver trabalhando com corrente alternada - ou então para a região $\overline{\overline{\mathbf{A}}}$ - quando trabalhar com corrente contínua;
- Selecione inicialmente a maior escala do amperímetro;
- Conecte o pino banana do terminal da ponta de prova preto no borne "COM" do multímetro;
- Conecte o pino banana do terminal da ponta de prova vermelho no borne "A" do multímetro;
- **Abra o circuito e coloque o amperímetro EM SÉRIE com os demais elementos do circuito;**
- Baixe gradualmente a escala até obter uma boa condição de leitura;
- Após fazer a leitura, desconecte o amperímetro do circuito e só depois o desligue.
- **Para trocar de função no multímetro, isto é, passar de voltímetro para amperímetro e vice-versa, SEMPRE desconecte os cabos do aparelho.**

**OBSERVAÇÃO:** Uma outra maneira para se medir a corrente, sem utilizar o amperímetro, consiste em se colocar um resistor *R* conhecido em série com o circuito e medir a queda de tensão (com o voltímetro) sobre este resistor. Isto é uma determinação indireta da corrente, pois mede-se a tensão *V* e calcula-se a corrente através da relação:

$$I = \frac{V}{R} .$$

### 3.2 MODO DE OPERAÇÃO DO VOLTÍMETRO

- Gire a chave seletora do multímetro para a região $\tilde{\mathrm{V}}$ quando estiver trabalhando com circuitos de corrente alternada, ou então para a região $\overline{\overline{\mathrm{V}}}$ quando trabalhar com circuitos de corrente contínua;
- Selecione inicialmente a maior escala do voltímetro;
- Conecte o pino banana do terminal da ponta de prova preto no borne "COM" do multímetro;
- Conecte o pino banana do terminal da ponta de prova vermelho no borne "V/Ω" do multímetro;

- Coloque o voltímetro em paralelo com o elemento do circuito sobre o qual se deseja medir a diferença de potencial;
- Baixe gradualmente a escala até obter uma boa condição de leitura;
- Após fazer a leitura, desconecte o voltímetro do circuito e só depois o desligue.

### 3.3 MODO DE OPERAÇÃO DO OHMÍMETRO

- Gire a chave seletora do multímetro para a região Ω;
- Selecione inicialmente a maior escala do ohmímetro;
- Conecte o pino banana do terminal da ponta de prova preto no borne "COM" do multímetro;
- Conecte o pino banana do terminal da ponta de prova vermelho no borne "V/Ω" do multímetro;
- **O componente a ser medido deve estar isolado do circuito. Não podem existir fontes ligadas.** Coloque o ohmímetro em paralelo com o resistor que se deseja medir;
- Baixe gradualmente a escala até obter uma boa condição de leitura;
- Após fazer a leitura, desconecte o ohmímetro do circuito e só depois o desligue.

## 4 MATERIAL UTILIZADO POR GRUPO:

Dois multímetros digitais, um multímetro analógico, fonte de tensão, placa para conexão de resistores, resistores na faixa de alguns ohms até megaohms, cabos para conexões.

## 5 PROCEDIMENTO, PREVISÕES E EXPLORAÇÃO:

Procure, com auxílio do livro texto, dos manuais dos instrumentos, dos colegas e do professor, familiarizar-se com as várias partes, escalas e terminais existentes nos multímetros.

Responda as questões abaixo apresentando diagramas explicativos dos circuitos quando necessário:

1. Como um voltímetro detecta as voltagens?
2. Como um amperímetro detecta as correntes?
3. Como o ohmímetro detecta as resistências?
4. Certifique-se que você entende a diferença entre um multímetro digital e um analógico.
5. Certifique-se que você entende o significado de cada escala mostrada nos instrumentos.

**MEDIDA DA DIFERENÇA DE POTENCIAL EM CIRCUITOS:**

- Monte o circuito da Figura 4, utilizando resistores da ordem de ohms ou kΩ. Conecte a fonte de corrente contínua a este circuito, identificando a saída positiva e negativa. Não ligue a fonte ainda;
- Conecte os terminais das pontas de prova (preto e vermelho) do multímetro digital nos bornes "COM" e "V/Ω" respectivamente;

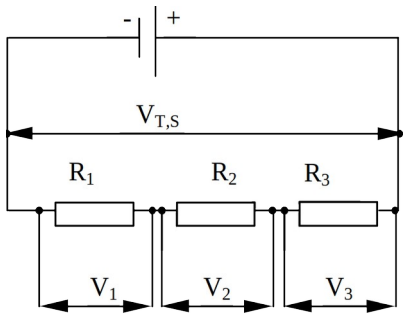



FIGURA 4

- Selecione no voltímetro digital a maior escala em corrente contínua (CC);
- Ligue a fonte e forneça uma diferença de potencial elétrico de 9 volts ao circuito;
- Com o voltímetro meça no circuito as diferenças de potencial sobre os resistores individualmente e da combinação deles em série. Observe a polaridade das pontas de prova (vermelho: positivo e preto: negativo);
- Se a escala estiver inadequada vá progressivamente descendo de escala até obter uma boa condição de leitura;

- Anote os valores das medidas indicadas na Tabela 1.

TABELA 1 - Medidas realizadas no circuito em série.

| | |
|---|---|
| $R_1$ = | $V_1$= |
| $R_2$ = | $V_2$= |
| $R_3$ = | $V_3$= |
| | $V_{T,S}$= |

- Substitua os resistores do circuito por outros com resistência da ordem de MΩ. Repita as medidas das tensões.

**MEDIDA DA INTENSIDADE DE CORRENTE EM CIRCUITOS:**

- Inicialmente prepare o multímetro para medidas de intensidade de corrente: conecte os terminais das pontas de prova (preto e vermelho) do multímetro digital nos bornes "COM" e "A" respectivamente;
- Posicione a chave seletora da escala do amperímetro na escala máxima;
- Monte o circuito em paralelo, conforme a Figura 5, utilizando resistores da ordem de kΩ. Ligue o amperímetro inicialmente na posição 1;
- Certifique-se sempre se o amperímetro está ligado **EM SÉRIE** com algum elemento do circuito. Em caso de dúvida, consulte o professor.

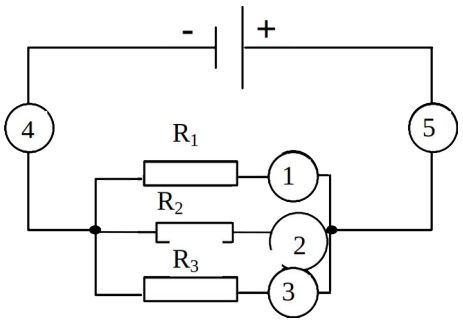



FIGURA 5

- Ligue a fonte de corrente contínua para 9 volts de saída;
- Faça a leitura indicada da intensidade de corrente. Anote na Tabela 2 o valor da corrente nesta posição;

Mova o amperímetro para as posições 2, 3, 4 e 5, observando sempre que para efetuar medidas de intensidade de corrente elétrica o circuito deve ser interrompido! Anote os valores da corrente, preenchendo a Tabela 2.

TABELA 2 - Medidas da intensidade de corrente no circuito em paralelo.

| |
|---|
| $R_1$ = |
| $R_2$ = |
| $R_3$ = |

| |
|---|
| $I_{1,P}$ = |
| $I_{2,P}$ = |
| $I_{3,P}$ = |
| $I_{4,P}$ = |
| $I_{5,P}$ = |

- Substitua os resistores no circuito anterior por outros da ordem de alguns ohms ou centenas de ohms. Refaça as medidas das correntes.

6. Monte um circuito elétrico que permita mostrar experimentalmente (sem a utilização do ohmímetro) como resistores devem ser "somados" quando associados em série e em paralelo. Relacione todo o material. Faça diagramas dos circuitos. Compare o resultado com aquele obtido diretamente com o ohmímetro. Justifique o procedimento. Atribua erros estimativos a cada grandeza medida e faça o cálculo da propagação dos erros nas grandezas calculadas.

7. Monte um circuito que permita a determinação da resistência interna do voltímetro analógico e do amperímetro analógico em uma determinada escala. Verifique se o valor obtido corresponde ao valor especificado pelo fabricante. Este valor deverá estar dentro do intervalo de erro calculado.

## 6 QUESTÕES:

1. Esboce os circuitos internos de um multímetro, um amperímetro e um ohmímetro.

2. Que tipos de problemas podem ocorrer quando se comete o erro de, com o multímetro ajustado como amperímetro, colocar-se os seus terminais em paralelo com uma fonte de tensão ou um resistor?

3. Considere as tensões medidas nos dois circuitos em série considerados. Faça a soma das tensões sobre cada resistor, e verifique se a lei de Kirchhoff das tensões é satisfeita nos dois casos. Em caso negativo, explique por quê.

4. Considere as correntes medidas nos dois circuitos em paralelo considerados. Faça a soma das correntes através de cada resistor, e verifique se a lei de Kirchhoff das correntes é satisfeita nos dois casos. Em caso negativo, explique por quê.

5. Suponha que realizamos corretamente uma medida da diferença de potencial num resistor (isto é colocando os terminais do voltímetro em paralelo com o resistor do circuito). Todavia, a resistência interna do voltímetro é baixa (da mesma ordem do resistor considerado). De que forma isto modificará as condições iniciais do circuito?
   - O valor que lemos no aparelho, é maior, menor ou o valor correto da diferença de potencial sobre o resistor no instante da medida? Explique.
   - Esse valor é o valor da diferença de potencial sobre o resistor no circuito sem a influência do medidor? Explique.

6. Se num ohmímetro a bateria estiver fraca, que tipo de erro ocorrerá na determinação da resistência de um resistor?

7. Que tipos de problemas podem ocorrer quando se comete o erro de, com o multímetro ajustado como voltímetro, colocar-se os seus terminais em série a um circuito com uma fonte de tensão e um resistor? Conseguiremos medir alguma coisa?

# Elementos Ôhmicos e Não-Ôhmicos. Potência Elétrica

## 1 INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO:

Na aula anterior exploramos a definição de resistência elétrica ( $R = V/I$ ) e o uso de instrumentos como voltímetro, amperímetro e ohmímetro. Certifique-se que você entendeu como funcionam tais instrumentos e qual o papel das suas resistências internas.

Nesta aula faremos um estudo sistemático de elementos ôhmicos e não-ôhmicos, tais como lâmpadas incandescentes e diodos. A lei de Ohm estabelece que o valor da resistência elétrica não varia com a tensão aplicada ou com a corrente, no entanto, isto não é verdadeiro em vários casos. Exploraremos as lâmpadas que têm a resistência variada pela alteração da temperatura, e os diodos cuja resistência depende da tensão aplicada (campo elétrico). A interpretação correta de muitos resultados experimentais depende da compreensão destes fenômenos. Na maioria dos circuitos eletrônicos os elementos não-ôhmicos são os que definem as propriedades dos circuitos.

Esta aula também consiste em um exercício de utilização do multímetro.

Faremos também um estudo da resistividade de fios considerados ôhmicos.

## 2 OBJETIVOS:

- Praticar a utilização do multímetro e a montagem de circuitos elétricos.
- Investigar elementos que não seguem a lei de Ohm.
- Introduzir o conceito de resistência diferencial: $r = \left(dI/dV\right)^{-1}$.
- Determinar experimentalmente a resistividade de materiais.

## 3 MATERIAL NECESSÁRIO:

Dois multímetros, fonte de corrente contínua, cabos para conexões elétrica, lâmpada incandescente, diodo, resistores, prancha com fios de ligas resistivas, micrômetro.

## 4 ROTEIRO DE ESTUDO:

1) O que afirma a lei de Ohm?
2) O que é um resistor?
3) Com base na lei de Ohm, diferencie elementos ôhmicos de elementos não ôhmicos.
4) Como se define a resistência entre dois pontos de um condutor?
5) Qual a unidade no S.I. da intensidade de corrente elétrica, diferença de potencial e resistência?
6) O que é um diodo?
7) Explique como se deve utilizar um multímetro em um circuito a fim de medir a intensidade de corrente elétrica em um ponto de um circuito.
8) Explique como se deve utilizar um multímetro em um circuito a fim de medir a diferença de potencial entre dois pontos de um circuito.
9) Qual o significado da resistividade de um material? Qual é a expressão que fornece a resistência de um fio em função da resistividade?
10) Como é possível calcular a potência elétrica dissipada num componente de um circuito?

## 5 PROCEDIMENTO, PREVISÕES E EXPLORAÇÃO:

**OBSERVAÇÃO: Antes de iniciar as medidas, verifique se o limitador de corrente da fonte está na posição máxima.**

RESISTOR**:**

- Monte um circuito com um resistor de 1 kΩ, conforme a Figura 1. Conecte a fonte de corrente contínua a este circuito, identificando a saída positiva e negativa;
- Ligue a fonte e forneça uma diferença de potencial de 1 volt ao circuito;
- Com o voltímetro meça no circuito a diferença de potencial V sobre o resistor. Observe a polaridade das pontas de prova (vermelho corresponde ao pólo positivo e preto corresponde ao pólo negativo).
- Inicie sempre pela escala de maior valor no multímetro. Se a escala estiver inadequada vá progressivamente utilizando escalas de menor amplitude até obter uma boa condição de leitura;

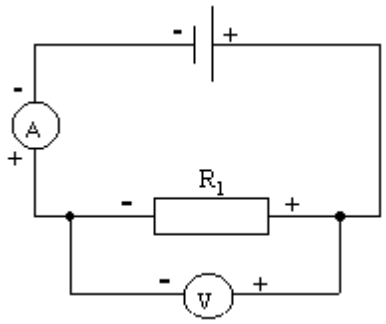



Figura 1

- Com o amperímetro meça no circuito a intensidade da corrente elétrica I que atravessa o resistor. Observe a polaridade das pontas de prova (vermelho: positivo e preto: negativo);
- Se a escala estiver inadequada vá progressivamente descendo de escala até obter uma boa condição de leitura.
- Anote os valores de V e de I .
- Aumente a diferença de potencial da fonte e meça os respectivos valores para a diferença de potencial e intensidade de corrente elétrica. Você pode adotar, por exemplo, variações de 1 volt, até atingir 10 volts.
- Inverta os cabos dos pólos da fonte - mantendo as mesmas conexões no voltímetro e no amperímetro - e meça novamente a diferença de potencial e a intensidade de corrente.

DIODO:

- **Para esta medida o diodo deve estar isolado do circuito**. Utilizando o multímetro ajustado na função "diodo", teste um dos diodos fornecidos e procure entender o que está sendo medido. Qual o significado das leituras obtidas com as duas polaridades possíveis das pontas de prova ?
- Monte um circuito elétrico que permita a determinação da tensão V sobre o diodo e da corrente I que por ele circula. Tome cuidado de **limitar a corrente em valores inferiores a *100 mA*.** Trabalhe, por exemplo, na faixa de –5,0 V até +5,0 V aplicados pela fonte. As tensões negativas são obtidas invertendo-se os cabos dos pólos da fonte. Na região onde o comportamento não linear é significativo, é interessante realizar maior número de medidas. Organize os dados numa tabela.
- Faça o gráfico da corrente I em função da tensão V.
- Com base na tabela de valores medidos e na definição de resistência ( $R = V/I$ ), calcule a resistência R em cada ponto.
- Com os mesmos dados, calcule a resistência diferencial *r* em cada ponto. Compare R e *r*.

LÂMPADA INCANDESCENTE:

- Determine pares de valores da tensão V e da corrente I para a lâmpada incandescente, montando um circuito adequado. Por exemplo, trabalhe na faixa de 0 V a 30 V aplicados pela fonte.
- Inverta os cabos dos pólos da fonte - mantendo as mesmas conexões no voltímetro e no amperímetro - e meça novamente a diferença de potencial e a intensidade de corrente.
- Faça um gráfico da corrente em função da tensão.
- Com base na tabela de valores medidos e na definição de resistência, calcule a resistência R em cada ponto. Lembre-se que a resistência do fio de tungstênio depende da temperatura do filamento.
- A potência P dissipada na lâmpada, para cada ponto, pode ser determinada com os dados de corrente e tensão medidos anteriormente. Faça o gráfico da potência dissipada P em função da resistência da lâmpada R.
- Neste caso também é possível determinar a resistência diferencial *r*?

## 6 QUESTÕES :

**RESISTOR:**

1) Com os dados obtidos, faça um gráfico da corrente em função da tensão para o resistor. Qual a sua forma?
2) De que modo é possível determinar, a partir do gráfico, a resistência R do resistor?
3) Compare o valor de R obtido através do gráfico com o valor nominal do resistor.

> OBSERVAÇÃO: A resistência de um resistor comercial pode ser indicada por um valor gravado sobre seu corpo, ou por faixas coloridas. Isto representa o "valor nominal", que geralmente não é exatamente igual ao valor real. Associada ao valor nominal temos a incerteza ou tolerância, que também é especificada pelo fabricante. No laboratório existe uma tabela com o código internacional de cores. Verifique nesta tabela como se obtém o valor nominal de um resistor a partir da análise das faixas coloridas. Faça isto para alguns resistores.

4) Através do gráfico é possível dizer se o resistor é um elemento ôhmico? Justifique!
5) Com os valores de V e I medidos, calcule a potência dissipada no resistor em cada ponto.
6) Faça um gráfico da potência P em função da corrente. Que forma tem este gráfico? Como você pode linearizá-lo? Com o gráfico linearizado é possível obter a resistência R do resistor? Explique como.

**DIODO:**

1) Que funções um diodo pode realizar num circuito eletrônico?
2) Para valores abaixo de 0,5 V qual a influência da presença de um diodo num circuito? E para valores de tensão acima de 2 V.
3) Qual a interpretação geométrica para R e *r* nos gráficos da corrente em função da tensão?
4) Através do gráfico é possível dizer se o diodo é um elemento ôhmico? Justifique!

**LÂMPADA**:

1) A resistência elétrica da lâmpada variou ? Em caso afirmativo explique por quê.
2) Através do gráfico é possível dizer se a lâmpada é um elemento ôhmico? Justifique!
3) ***Obtenção de parâmetros para modelos físicos:*** Uma análise importante na física experimental é a determinação dos coeficientes e expoentes de modelos que

descrevem determinados fenômenos. Normalmente isto é feito pelo ajustamento de funções aos dados obtidos experimentalmente no laboratório. Com as medidas

feitas nesta aula podem ser obtidos alguns resultados interessantes. Por exemplo, na curva da corrente em função da tensão para o diodo observa-se um crescimento exponencial na região onde o diodo começa a conduzir. Isto pode ser mostrado analiticamente utilizando-se os conceitos da física do estado sólido. Para a lâmpada incandescente o modelo é mais complicado, pois se tem a coexistência de dois processos: a geração de calor por efeito Joule no filamento, e a difusão deste calor para a vizinhança. Um desenvolvimento teórico prevê que a corrente varia com a tensão obedecendo a "função potência": $I = \alpha V^{\beta}$, onde $\alpha$ e $\beta$ são parâmetros a serem determinados a partir dos dados experimentais. A forma geométrica do filamento influencia fortemente a troca de calor entre ele e o ambiente vizinho, assim, o valor dos coeficientes $\alpha$ e $\beta$ pode ser diferente para cada lâmpada.

Com os dados que você mediu para a lâmpada incandescente é possível determinar os parâmetros que descrevem o seu comportamento. Para isto é conveniente que você linearize a equação acima e represente-a num gráfico log-log. Lembre que é possível escrever:

$$I = \alpha V^{\beta}$$

$$\ell n I = \ell n \alpha + \beta \, \ell n V$$

$$Y = A + BX$$

Interpretando os coeficientes da equação linearizada e calculando a equação da reta a partir deste novo gráfico, você terá o valor do fator $\alpha$ e do expoente $\beta$ do modelo proposto.

Faça isto com os dados disponíveis no momento.

- Se o novo gráfico não tiver o aspecto aproximado de uma reta, então significa que o modelo proposto não é adequado para as condições em que os dados foram obtidos.
- Você já estudou este método de análise numa disciplina de Física Experimental ("função potência" na forma $y = ax^b$). Agora aplique os seus conhecimentos a uma situação e dados reais.

## RESISTIVIDADE ELÉTRICA:

**1** Ao medirmos a resistência elétrica de um pedaço de fio (à temperatura constante), observamos que ela depende das dimensões e também do material que constitui o fio. Para explorar este fato, e também para exercitar o uso do ohmímetro, será realizada a próxima etapa.

Para esta experiência, a prancha dada contém três fios: dois deles do mesmo material, mas com diâmetros diferentes, e um terceiro de material diferente dos outros dois.

Para cada fio:

- Utilizando um ohmímetro, determine a resistência do fio em função da distância a partir de uma das extremidades;
- Faça um gráfico da resistência em função da distância;
- Ajuste uma curva ao gráfico obtido. Qual o significado físico dos seus coeficientes?
- Utilizando um micrômetro determine o diâmetro dos fios. Qual conclusão você pode tirar com base nas medidas?
- Comente sobre as dificuldades encontradas na realização destas medidas.

### 2 MEDIDA A QUATRO TERMINAIS:

Quando se efetua uma medida de resistência elétrica utilizando dois terminais (duas pontas de prova), como no caso de um ohmímetro, a medida indicada pelo aparelho pode ser falsa, dependendo dos materiais. O problema se deve à resistência de contato. O que se mede a dois terminais é a resistência do material investigado, adicionada às resistências das junções do material com as pontas de prova do ohmímetro. Em alguns casos, a resistência de contato pode ser muito maior que a resistência do material investigado, como por exemplo, no caso de semicondutores ou de metais oxidados. Além disso, resistências de contato podem depender da magnitude da tensão aplicada pelo equipamento de medida e de sua polaridade.

Utilizando-se uma barra de um material qualquer, conforme a Figura 1, e posicionando-se as pontas de prova do ohmímetro nas extremidades, como indicado na figura, mede-se na verdade

$$R_{total} = R + r_d + r_e = \rho \frac{\ell}{A} + r_d + r_e \quad ,$$

onde $R$ é a resistência elétrica da parte da barra entre as duas pontas de prova, $r_d$ e $r_e$ são as resistências de contato da barra com as pontas de prova da direita e da esquerda, respectivamente, $\rho$ é a resistividade do material da barra, $\ell$ é a distância entre as pontas de prova na barra e $A$ é a área da seção da barra.

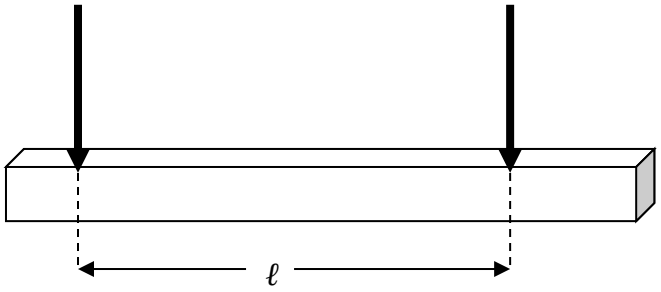



FIGURA 1 – Representação do sistema de medida utilizando dois terminais.

Pode-se constatar que a medida de *R* só será correta se $R_{total} = R$, isto é, se $r_d + r_e$ for igual a zero. Em muitos casos práticos, utilizando-se um ohmímetro, não é possível saber se a resistência de contato é desprezível ou não.

O problema descrito acima é contornado efetuando-se medidas a quatro terminais (quatro contatos elétricos), conforme mostrado na Figura 2.

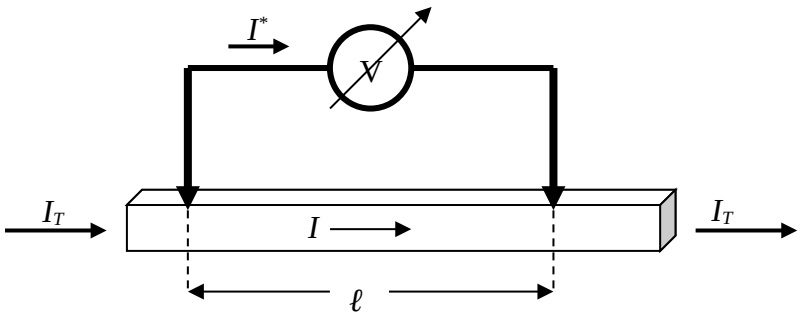



FIGURA 2 – Representação do sistema de medida utilizando quatro terminais.

Na medida a quatro terminais, dois terminais são utilizados para permitir que uma corrente constante *I* flua através da amostra, nesse caso a barra. Ao efetuar os contatos, deve-se zelar para que a densidade de corrente seja uniforme na barra. Mede-se a diferença de potencial *V* entre os dois terminais separados pela distância $\ell$ utilizando-se um multímetro. Nesse caso, tem-se que a resistência da barra entre as pontas de prova do multímetro é $R = \frac{V}{I}$.

O interessante nesse caso é que a técnica permite minimizar o efeito da resistência de contato, pois

$$V = R(I_T - I^*) - (r_d + r_e)I^*,$$

onde $I^*$ é a corrente que passa pelo voltímetro, que está associado em paralelo com o segmento de comprimento $\ell$ da barra. Como a resistência interna do voltímetro é muito grande (condição que deve ser satisfeita no experimento), $I^*$ é muito pequena e muito menor que *I*, de forma que:

$$V = R(I_T - I^*) - (r_d + r_e)I^* = RI - (r_d + r_e)I^* \cong RI .$$

A medida a quatro terminais é tanto mais precisa quanto menor for a razão entre *R* e a resistência interna do multímetro.

A resistividade, tendo-se determinado *R*, é então calculada como:

$$\rho = \frac{RA}{\ell} = \frac{VA}{I\ell}.$$

# Determinação da Resistividade Elétrica (Medida a Quatro Terminais) e Resistência de Filme

## 1 OBJETIVO:

A presente prática experimental objetiva o aprendizado do método de medida de resistência a quatro terminais, que elimina a contribuição da resistência de contato.

## 2 MEDIDA A QUATRO TERMINAIS:

Quando se efetua uma medida de resistência elétrica utilizando dois terminais (duas pontas de prova), como no caso de um ohmímetro, a medida indicada pelo aparelho pode ser falsa, dependendo dos materiais. O problema se deve à resistência de contato. O que se mede a dois terminais é a resistência do material investigado, adicionada às resistências das junções do material com as pontas de prova do ohmímetro. Em alguns casos, a resistência de contato pode ser muito maior que a resistência do material investigado, como por exemplo, no caso de semicondutores ou de metais oxidados. Além disso, resistências de contato podem depender da magnitude da tensão aplicada pelo equipamento de medida e de sua polaridade.

Utilizando-se uma barra de um material qualquer, conforme a Figura 1, e posicionando-se as pontas de prova do ohmímetro nas extremidades, como indicado na figura, mede-se na verdade

$$R_{total} = R + r_d + r_e = \rho \frac{\ell}{A} + r_d + r_e \quad ,$$

onde $R$ é a resistência elétrica da parte da barra entre as duas pontas de prova, $r_d$ e $r_e$ são as resistências de contato da barra com as pontas de prova da direita e da esquerda, respectivamente, $\rho$ é a resistividade do material da barra, $\ell$ é a distância entre as pontas de prova na barra e $A$ é a área da seção da barra.

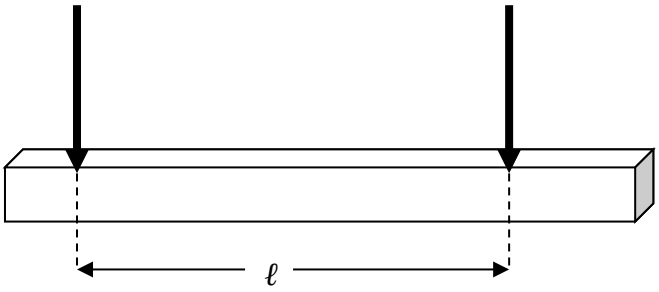



FIGURA 1 – Representação do sistema de medida utilizando dois terminais.

Pode-se constatar que a medida de $R$ só será correta se $R_{total} = R$, isto é, se $r_d + r_e$ for igual a zero. Em muitos casos práticos, utilizando-se um ohmímetro, não é possível saber se a resistência de contato é desprezível ou não.

O problema descrito acima é contornado efetuando-se medidas a quatro terminais (quatro contatos elétricos), conforme mostrado na Figura 2.

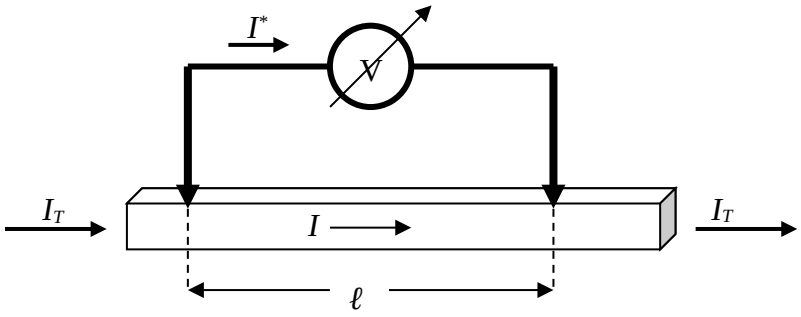



FIGURA 2 – Representação do sistema de medida utilizando quatro terminais.

Na medida a quatro terminais, dois terminais são utilizados para permitir que uma corrente constante *I* flua através da amostra, nesse caso a barra. Ao efetuar os contatos, deve-se zelar para que a densidade de corrente seja uniforme na barra. Mede-se a diferença de potencial *V* entre os dois terminais separados pela distância $\ell$ utilizando-se um multímetro. Nesse caso, tem-se que a resistência da barra entre as pontas de prova do multímetro é $R = \frac{V}{I}$.

O interessante nesse caso é que a técnica permite minimizar o efeito da resistência de contato, pois

$$V = R(I_T - I^*) - (r_d + r_e)I^*,$$

onde $I^*$ é a corrente que passa pelo voltímetro, que está associado em paralelo com o segmento de comprimento $\ell$ da barra. Como a resistência interna do voltímetro é muito grande (condição que deve ser satisfeita no experimento), $I^*$ é muito pequena e muito menor que *I*, de forma que:

$$V = R(I_T - I^*) - (r_d + r_e)I^* = RI - (r_d + r_e)I^* \cong RI.$$

A medida a quatro terminais é tanto mais precisa quanto menor for a razão entre *R* e a resistência interna do multímetro.

A resistividade, tendo-se determinado *R*, é então calculada como:

$$\rho = \frac{RA}{\ell} = \frac{VA}{I\ell}.$$

## 3 RESISTÊNCIA DE FILME:

Outro problema importante consiste na determinação de resistência de filmes finos. Filmes finos condutores elétricos são muito importantes tecnologicamente, principalmente em áreas como a microeletrônica.

Para se calcular a resistividade é necessário conhecer a resistência da amostra, seu comprimento, largura e espessura. O problema reside no fato de que nem sempre é fácil ou possível, dependendo da disponibilidade de equipamentos, medir a espessura de filmes finos, para calcular a sua resistividade. Mas a resistência depende da largura e do comprimento da amostra e sendo assim, ela não é adequada para comparar diferentes filmes de diferentes geometrias. Em muitos casos práticos, não é tão importante saber qual a resistividade e espessura de um filme, mas é necessário conhecer-se a resistência de um filme de determinado comprimento e largura, pois é a resistência que tem influência sobre o comportamento do circuito elétrico no qual o filme está inserido. Nesses casos a *resistência de filme* é uma grandeza muito útil.

Tendo-se uma amostra com as dimensões mostradas na Figura 3, pode-se definir a *resistência de filme* para o caso em que $\ell = w$.

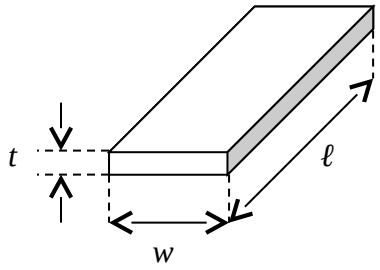



FIGURA 3 – Especificação das dimensões da amostra de filme fino.

A *resistência de filme*, denotada por $R_\bullet$, é então:

$$R_\bullet = \rho\frac{\ell}{A} = \rho\frac{\ell}{wt} = \frac{\rho}{t},$$

sendo comumente expressa em Ω/•. Embora não seja equivalente à resistividade, a resistência de filme permite comparar diferentes filmes, independente de sua forma geométrica, e permite calcular a resistência dos mesmos após conhecidas suas dimensões.

Para determinar a resistência de filme, basta efetuar a medida de resistência ajustando-se os terminais de medida de tensão de forma a preencher a condição $\ell = w$ ou, caso isso não seja possível, corrigindo-se os valores para essa condição, multiplicando-se, ambos os termos da equação por um mesmo valor.

**4 EXPERIÊNCIA:**

1) Utilize alguns substratos de vidro recobertos com um filme fino de óxido de estanho dopado com flúor (material condutor elétrico e transparente). Efetue a medida da resistência elétrica dos mesmos a dois e a quatro terminais.
   a. Na **medida a quatro terminais**, nos contatos pelos quais passa a corrente (terminais externos) fornecida por uma fonte de corrente, utilize grampos de prender folhas de papel fixados paralelamente um em relação ao outro e perpendicularmente em relação à corrente elétrica, para que a corrente flua por todo o filme condutor, uniformemente. Coloque os substratos sobre um papel milimetrado de forma a poder visualizar as dimensões da amostra e com o voltímetro, efetue a medida da diferença de potencial para uma distância ($\ell$) ao longo do comprimento da amostra equivalente à sua largura ($w$). Efetue essa medida em diversas regiões da amostra, calculando o valor médio.
   b. Na medida a dois terminais, use uma fonte de tensão e um amperímetro, para poder variar a tensão aplicada (no ohmímetro, os valores são fixos). Varie a tensão, medindo a corrente que passa pela amostra. Os mesmos grampos podem ser usados, desde que se multiplique ambos os termos da equação por um fator que leve à condição $\ell = w$, para se obter $R_\bullet$.

OBSERVAÇÃO: As correntes utilizadas não devem ser muito elevadas pois, caso contrário, haverá elevação da temperatura da amostra, mudando sua resistência. Sugere-se utilizar correntes em torno de 1 mA.

2) Determine a resistência de filme ($R_\bullet$) dos filmes de óxido de estanho dopado com flúor.

## 5 QUESTÕES:

1) Na medida a dois terminais a resistência da amostra independe da tensão aplicada e da polaridade?
2) A resistência de contato é comparável à resistência do material?
3) A resistência de contato depende da resistência do material ou tem valor constante para os materiais usados, independentemente da amostra?
4) Qual a resistência de filme das amostras?
5) O óxido de estanho dopado com flúor utilizado nos experimentos tem resistividade da ordem de $10^{-5}$ a $10^{-6}$ Ω.m. Estime a espessura desses filmes assumindo, por exemplo, o valor $\rho = 5 \times 10^{-6}$ Ω.m.

# Superfícies Equipotenciais e Campos Elétricos

Superfícies equipotenciais podem ser determinadas encontrando-se os pontos de potencial constante. A partir do conhecimento das equipotenciais, pode-se determinar linhas de campo elétrico e a intensidade de campo nos vários pontos do espaço. Nesta aula exploraremos este problema do ponto de vista de simetrias planas, para várias geometrias.

## 1 OBJETIVOS:

- Determinação das superfícies equipotenciais.
- Determinação das linhas do campo elétrico.

## 2 MATERIAL:

Fonte de corrente contínua, voltímetro, papel condutor, papel para marcação dos potenciais medidos, placa de cortiça, pinos metálicos, cabos para conexão e computador.

## 3 ROTEIRO DE ESTUDO:

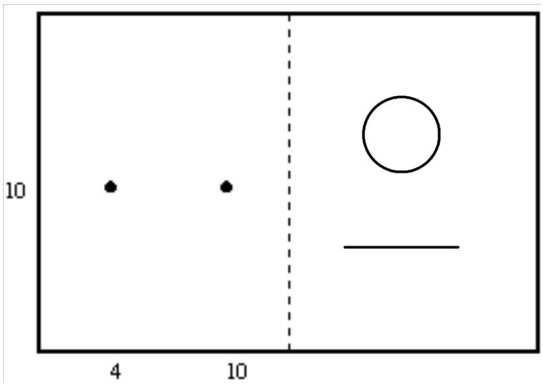
1) Qual é a relação matemática entre campo elétrico e potencial elétrico?
2) Qual é a relação matemática entre a densidade de corrente e o campo elétrico?
3) Como se define uma superfície equipotencial?
4) Qual é a direção do campo elétrico em relação a uma superfície equipotencial?
5) Qual o significado físico das linhas de força?
6) Represente esquematicamente as superfícies equipotenciais e as linhas do campo elétrico para uma carga puntiforme positiva *q*.
7) Com base no seu desenho, onde o potencial é maior, próximo ou afastado da carga positiva?
8) Com base no seu desenho, para onde se moveria uma carga de mesmo módulo e sinal se fosse colocada exatamente sobre uma linha de força?
9) Represente as superfícies equipotenciais e as linhas de campo elétrico para duas cargas pontuais de sinais opostos separadas por uma distância *d*.
10) Cite três situações do cotidiano onde os fenômenos estudados estão envolvidos e são relevantes.

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL:

Este experimento consiste em aplicar uma diferença de potencial entre eletrodos de diferentes formas geométricas (por exemplo: pontos, linhas paralelas e círculos) desenhados com uma caneta com tinta condutora sobre um papel condutor (cuja resistência varia entre 5 kΩ a 20 kΩ). Através da análise do potencial em diversos pontos do papel condutor faz-se um levantamento das superfícies (ou curvas) equipotenciais e, por conseqüência, das linhas de força do campo elétrico. Trabalharemos sempre com diferenças de potencial de no máximo 5 volts e dividiremos o papel condutor em duas metades (uma com coordenadas *x* de 0 a 14 e outra com coordenadas *x* de 14 a 28) para melhor aproveitá-lo. O uso do papel especial condutor é necessário tendo em vista a necessidade de se fazer medidas do potencial elétrico com o voltímetro em diferentes regiões, o que só pode ser realizado se tivermos um meio que permita a passagem de uma corrente elétrica.

## 5 MEDIÇÕES:

- Fixe o papel condutor fornecido sobre a placa de cortiça com o auxílio dos pinos metálicos.
- Conecte, com o auxílio dos pinos metálicos, os cabos vermelho e preto aos pontos com tinta condutora sobre o papel condutor, utilizando inicialmente a região com o desenho 1(a) abaixo.
- Conecte estes cabos à fonte de corrente contínua, mas não a ligue ainda.
- Selecione no voltímetro a escala correspondente a 20 volts em corrente contínua.
- Conecte a ponta preta do voltímetro ao terminal preto da fonte de corrente contínua. Assim, a diferença de potencial será medida em relação a este ponto.
- Ligue a fonte de corrente contínua e a regule para fornecer 5 volts.
- Com a ponta vermelha do voltímetro (ligado ao terminal "V/Ω") faça a leitura do potencial em todos os pontos entre as coordenadas (1, 1) e (13, 19) (seguindo a grade) do papel condutor.




(a) (b)

**Figura 1 –** DESENHOS DOS ELETRODOS.

- Anote cada valor do potencial lido no papel branco, que possui o mesmo padrão de marcação do papel condutor preto, respeitando as coordenadas de cada ponto. Caso esteja disponível, anote os potenciais na planilha do computador (arquivo: *equipotn.org*).
- Após a leitura do potencial em todos os pontos, desligue a fonte de corrente contínua.
- Proceda da mesma forma para a região com o desenho 1(b). Conecte cada terminal da fonte a um dos eletrodos desenhados. Faça a leitura do potencial agora entre as coordenadas (15, 1) e (27, 19) do papel condutor.

## 6 ANÁLISE DE RESULTADOS:

1) Trace, para cada distribuição de carga, as curvas equipotenciais usando um programa de construção de gráficos e esboce as linhas de campo.
2) Qual a forma geométrica das equipotenciais próximas ao eletrodo pontual da Figura 1(a) ?
3) Como é o potencial elétrico dentro do condutor circular da Figura 1(b) ?

4) Determine, por meio da derivada, o campo elétrico em alguns pontos da Figura 1(a). Lembre que $\vec{E} = -\,grad\, V$ ou, aproximadamente, $\vec{E} \cong -\left( \frac{\Delta V_x}{\Delta x}\hat{i} + \frac{\Delta V_y}{\Delta y}\hat{j} \right)$,

para $\Delta x$ e $\Delta y$ os mínimos possíveis.

# Resistência Interna de Fontes e o Conceito de Força Eletromotriz

## 1 INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO:

Nas aulas anteriores examinamos voltímetros, amperímetros e ohmímetros utilizando a definição de resistência elétrica, a lei de Ohm e a condição de conservação da carga elétrica. Sabemos que um bom instrumento de medida deve ter a menor influência possível nas medidas. Com o objetivo de entendermos claramente como os instrumentos de medida podem modificar os circuitos onde estão inseridos, fizemos alguns experimentos que possibilitaram a determinação da resistência interna destes.

Para alimentar os circuitos podemos utilizar, por exemplo, pilhas, baterias ou fontes retificadoras. Estas fontes não são ideais e também introduzem alguma alteração no circuito original. A sua resistência, em geral, não é nula e, dependendo do circuito utilizado, este valor pode ser importante. Nesta aula passaremos a explorar o conceito de força eletromotriz e de resistência interna de fontes de corrente contínua.

## 2 OBJETIVOS:

- Estabelecer o conceito de força eletromotriz.
- Estabelecer os conceitos de resistência interna.
- Medir estas grandezas para fontes reais.
- Verificar experimentalmente a condição de máxima transferência de potência.

## 3 MATERIAL:

Fonte de corrente contínua com constituição interna desconhecida (“caixa preta”), dois multímetros digitais, placa para conexão de resistores, resistores diversos, cabos de conexão.

## 4 PROCEDIMENTO, PREVISÕES E EXPLORAÇÃO:

Um modelo para representar uma fonte real pode ser formado por uma fonte de força eletromotriz $\varepsilon$ e um resistor *r* ligado em série, conforme o circuito ilustrado na Figura 1. A resistência *r* é chamada de resistência interna da fonte, e é devida à resistência ôhmica dos materiais que constituem a fonte. Na prática, o processo que origina a força eletromotriz $\varepsilon$ pode ser de diferentes naturezas, por exemplo, magnética, química, térmica, luminosa, etc…

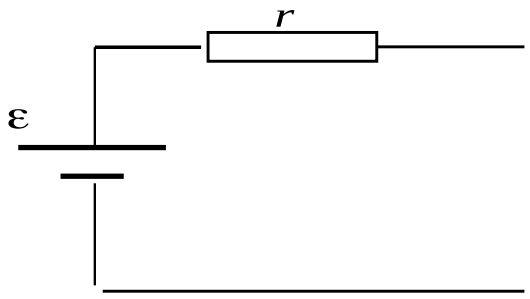



FIGURA 1 – Circuito equivalente para uma fonte de corrente contínua.

É importante lembrar que o circuito da Figura 1 é apenas um modelo, e que nas fontes reais dispomos unicamente de dois terminais acessíveis externamente. Assim, não podemos medir diretamente a resistência interna *r*.

Consideremos o circuito mostrado na Figura 2, onde um resistor *R* está conectado aos terminais externos da fonte. Para determinar experimentalmente os valores de ε e *r* podem ser utilizados diferentes métodos de análise. Por exemplo, a aplicação direta da equação:

$$V = \varepsilon - rI$$

também conhecida como *equação das fontes,* ou ainda,

$$\frac{\varepsilon}{I} = R + r\ .$$

Outro procedimento possível é a análise da máxima transferência de energia. Nesta aula serão utilizados diferentes métodos de análise e comparados os resultados fornecidos. Para isso medimos, com o multímetro, a corrente através do resistor *R* ou a tensão sobre ele e, a seguir, calculamos a potência dissipada neste resistor.

A potência elétrica *P* dissipada em uma resistência é definida como o produto da diferença de potencial *V* pela corrente *I* que circula por essa resistência. Assim, tem-se $P = V \cdot I$. Com base na Figura 2 podemos analisar dois casos extremos: se *R* tem um valor muito alto, tendendo a infinito, implica em corrente nula e conseqüentemente potência nula; por outro lado, se a resistência *R* é muito baixa, tendendo a zero, a corrente pelo circuito em série é alta, acarretando uma maior queda de tensão na resistência interna *r* ($V_r = r \cdot I$) e uma diminuição na tensão *V* aplicada ao resistor externo. Estes dois limites nos levam a acreditar que, num gráfico de potência *P* em função da resistência externa *R*, deverá ocorrer um máximo em algum ponto intermediário.

⇨ Imagine um circuito tal que uma fonte de força eletromotriz $\varepsilon$ seja conectada em série com um resistor *r* e um resistor *R*, conforme a Figura 2. Calcule a relação entre *r* e *R* que corresponde à condição de máxima potência dissipada em *R*.

Monte um circuito usando a fonte fornecida (“caixa preta”) e diferentes valores para o resistor *R*. Para fazer o papel de *R*, escolha na caixa de resistores diversos valores, por exemplo desde 2 Ω até 1000 Ω. Se necessário, faça associações para obter alguns valores intermediários.

- Para determinar a força eletromotriz $\varepsilon$ basta medir a tensão entre os terminais da fonte quando o circuito está aberto, ou seja, sem o resistor *R*.

- Para cada resistor *R* ligado ao circuito, efetue medidas da corrente *I*.

**OBSERVAÇÃO**: Em algumas fontes, por exemplo, as de origem química, a força eletromotriz pode não se manter constante após o fornecimento de certa quantidade de corrente. Assim, é conveniente iniciar as medidas com os maiores valores de *R*. É recomendável também conectar cada resistor *R* apenas durante o tempo necessário para se efetuar a medida.

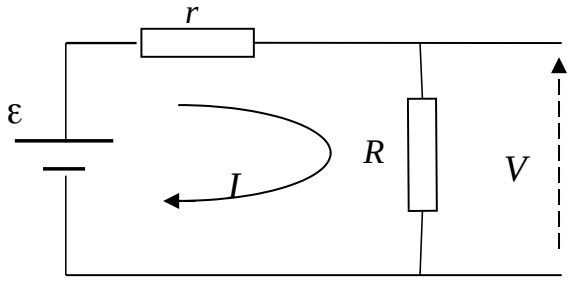



FIGURA 2 – Circuito para análise da máxima transferência de potência

**i)** Analisando pela equação das fontes, calcule a resistência interna *r* para cada resistor externo *R* utilizado. Teoricamente todos os resultados para *r* deveriam ser iguais. Na prática, este valor pode variar um pouco entre uma medida e outra. Calcule o valor médio do conjunto de valores e a incerteza da medida (a partir da flutuação dos resultados). Expresse *r* na forma explícita.

**ii)** A equação $\frac{\varepsilon}{I} = R + r$ permite que se obtenha *r* a partir da análise gráfica.

Faça um gráfico de *R* em função de $1/I$. Determine a equação da reta que melhor se ajusta a este gráfico. Interpretando os coeficientes angular e linear, obtenha a fem ε da fonte e a sua resistência interna *r*.

**iii)** Pela análise da máxima transferência de energia, calcule a potência dissipada ($P = R \cdot I^2$) em cada caso e faça um gráfico de *P* em função de *R*.

⇨ *O ponto de máximo é verificado, de fato ?*

⇨ *Qual o valor aproximado de R para o qual ocorreu o máximo?*

Compare os resultados obtidos pelos diferentes métodos de análise.

Sabemos que os instrumentos de medida podem influenciar as condições do circuito onde se efetuam as medidas. Conforme a configuração utilizada no circuito, esta influência pode ser minimizada.

No estudo realizado até aqui, mediu-se a corrente *I* e calculou-se a potência com a expressão $P = R \cdot I^2$. Porém, se a tensão *V* sobre o resistor for conhecida, a potência também poderá ser calculada por $P = V^2 / R$. Observe os circuitos mostrados na Figura 3.

Modifique o circuito anterior, tal que seja medida a tensão *V* e refaça a experiência com os mesmos resistores *R* usados naquela etapa. Faça um novo gráfico de *P* em função de *R*.

⇨ Para qual valor de *R* ocorreu a máxima potência dissipada? Isto concorda com o resultado anterior?

⇨ As duas formas que você usou para realizar o experimento estão esquematizadas na Figura 3. Analise-as e indique em qual dos casos o valor obtido para a resistência interna está mais próximo do verdadeiro. Explique.

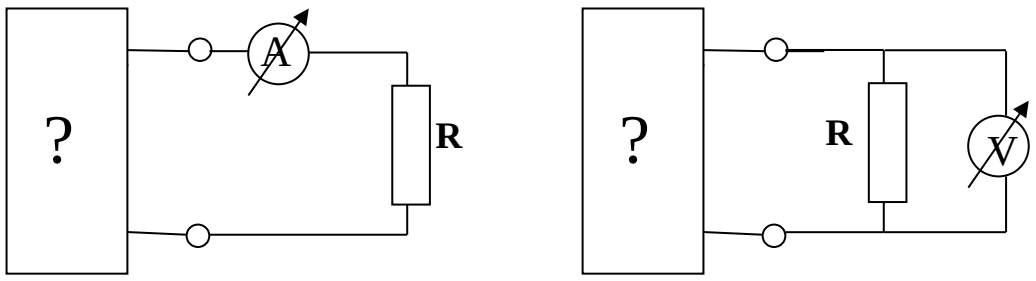



FIGURA 3 – Duas maneiras de realizar o experimento, medindo a corrente ou a tensão.

⇨ Descreva a diferença entre força eletromotriz e tensão fornecida por uma fonte.

Na terminologia de circuitos elétricos faz-se a distinção entre fontes de tensão e fontes de corrente.

- Uma fonte de tensão é aquela que mantém uma tensão constante entre seus terminais externos, independente da intensidade de corrente fornecida ao circuito externo.

- Uma fonte de corrente é aquela que fornece uma corrente constante ao circuito externo, independente da tensão entre seus terminais, imposta pelo circuito externo.

TÓPICO ADICIONAL:

Algumas fontes de corrente contínua disponíveis no laboratório têm um botão que limita a corrente máxima que elas podem fornecer. Assim, quando a fonte estiver fornecendo 30 V em circuito aberto, isto não significa que esta conseguirá manter esta tensão quando for ligado a ela uma resistência qualquer. Por exemplo, uma resistência de 100 Ω ligada nos terminais da fonte deixará circular uma corrente de 300 mA, desde que a tensão entre os terminais seja 30 V. Assim, se a corrente que a fonte puder fornecer estiver limitada em 100 mA a fonte fornecerá somente 10 V !!!

# Utilização do Osciloscópio:

O osciloscópio é um instrumento que permite representar graficamente variações da diferença de potencial entre dois pontos de um circuito como função do tempo. Na maioria das vezes este gráfico mostra como o sinal está variando com o tempo: o eixo vertical (Y) representa a diferença de potencial - entre um ponto do circuito e a Terra - e o eixo horizontal (X) representa o tempo.

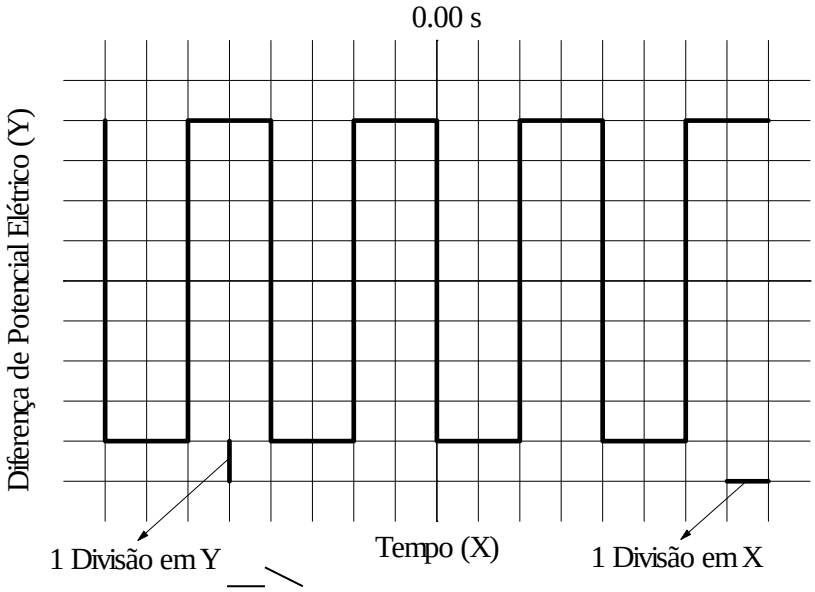



FIGURA 1 – Exemplo da tela do osciloscópio.

Há osciloscópios analógicos e osciloscópios digitais, sendo que estes últimos possuem sistemas adicionais de processamento de dados que permitem a coleta de dados da forma inteira da onda, para então mostrá-la no visor.

Com um voltímetro somente seria possível construir o gráfico acima para variações lentas, i.e., se mudanças no sinal ocorressem com freqüência menor do que a freqüência de coleta de dados (algo em torno de 1 medida a cada 5 segundos), ou seja, o tempo suficiente para fazer a leitura com o multímetro e anotar o resultado. A construção de uma curva requer vários pontos, o que torna a operação de monitoramento de um sinal com um voltímetro um recurso limitado. A grande vantagem do osciloscópio é poder fazer amostragens rápidas, possibilitando coletar muitos pontos em um intervalo de tempo muito curto. A amostragem (leitura do sinal) dos equipamentos digitais é discreta, enquanto que nos analógicos é contínua, mas ambas tem um tempo mínimo de resposta.

Apresentam-se a seguir os passos iniciais para a utilização de osciloscópios digitais existentes neste Laboratório.

## 1 OSCILOSCÓPIOS DIGITAIS AGILENT

**Inicializando o osciloscópio**

- Contecte-o à rede elétrica, preferencialmente em 127 V (este equipamento é bivolt automático).
- Para inicializar o osciloscópio pressione o botão on/off e aguarde 10 s para que os testes de inicialização seja efetuados.

- Auto
- 50 µs
- 2.00 Msa/s

- Durante os 10 s todos os botões de silicone permanecem iluminados, depois disso eles se apagam.

**Tela Inicial**

- Ficará piscando a palavra Auto, no canto superior esquerdo do display;
- Na linha inferior do visor do equipamento estarão indicados, o tempo de leitura (default : 50 µs) e taxa de amostragem (default: 2.00 Msa/s)

**Menu**

- - A seleção das funções é feita mediante o menu localizado na lateral direita da tela, por default ele fica exposto por 10 s.
- - Caso as funções estejam em língua inglesa, pressione o botão language 5 vezes para selecionar a língua portuguesa.
- - Para desligar o Menu pressione a tecla Menu on/off uma segunda vez.

**Ativando um Canal**

- - Para ativar um canal basta pressionar o botão correspondente, ele ficará iluminado e o sinal relativo ao canal será apresentado na tela na cor correspondente ao botão.
- - Na linha inferior da tela estará indicado o canal ativado e a tensão (default: 2.00V).
- - Pressionando o botão uma segunda vez o menu relativo ao canal aparecerá no display. - Pressionando o botão do canal uma terceira vez o canal se desligará.

**Realizando uma Medida**

- 1- Conecte o cabo adequado (BNC-BNC ou BNC-Banana) ao conector do canal desejado.
- 2- Para realizar uma medida ative o canal desejado pressionando seu respectivo botão; 3- Observe no display se a função ponta tem o valor selecionado de 1X, caso contrário pressione o botão no menu correspondente até obter o valor de 1X.
- 4- Conecte o osciloscópio ao circuito a ser analisado.
- 5- Para uma leitura mais rápida acione a tecla Auto-Scale (cor branca) no painel do osciloscópio. Em situações normais, essa função ajusta o equipamento à condição mais favorável à visualização e medidas.
- 6- Caso prefira fazer uma varredura manual utilize o vernier de tensão correspondente ao canal. Girando o vernier no sentido horário a tensão de leitura é diminuída, no sentido contrário ela é aumentada.
- 7- Pressione o botão cursors uma vez (ficará iluminado) para acessar o menu e selecionar a função desejada, tempo ou tensão.
- 8- Escolha a fonte, CH1 (canal 1) ou CH2 (canal 2).
- 9- Selecione CurA e o vernier que fica à direita no canto superior do painel do osciloscópio ficará acionado (indicado por luz) e pode ser utilizado para medida. O valor associado ficará exposto no display.
- 10- Selecione CurB e o vernier que fica à direita no canto superior do painel do osciloscópio ficará acionado (indicado por luz) e pode ser utilizado para medida. O valor associado ficará exposto no display.

**Lissajous**

- Para a obtenção da figura de lissajous é preciso pressionar o botão Main/Delayed, na posição superior do painel. O menu correspondente aparecerá no display e a função Base de Tempo deverá ser selecionada no modo desejado, Y-Tou X-Y.

**Desligar o Osciloscópio**

- Desconecte os cabos do osciloscópio e pressione o botão On/Off.

**2 OPERAÇÃO (MODELO HP54600B)**

➔ Verifique a tensão de operação do osciloscópio e do gerador de função (127V ou 220V).
➔ Conecte-os à rede de energia elétrica, nos terminais adequados.
➔ Ligue o osciloscópio (pressione a tecla **"LINE",** localizada abaixo do visor, à direita) e o gerador de função.
➔ Conecte o terminal de saída do gerador de função ao terminal **1** do osciloscópio, com o cabo tipo BNC.
➔ Ajuste o sinal do gerador de função para uma onda senoidal de 1 kHz e um valor de amplitude na escala de 1,0 V.

**2 AJUSTANDO AS ESCALAS**

Os osciloscópios digitais possuem uma função que possibilita um ajuste automático de escala. Neste caso basta pressionar a tecla **"AUTOSCALE"**, que está localizada no painel de controle, à direita.

➔ Observe no visor o que acontece quando esta tecla é pressionada.

O ajuste manual das escalas horizontal e vertical pode ser executado através dos botões **"TIME/DIV"** e **"VOLTS/DIV"**, respectivamente, ambos localizados no painel de controle.

➔ Depois de fazer um ajuste automático do sinal, verifique o que acontece com o sinal elétrico no visor quando se gira os botões **"TIME/DIV"** e **"VOLTS/DIV"**.

Em ambos os casos aparecerá na parte superior do visor, indicações das escalas utilizadas, que podem variar de 2 mV/divisão (ou $2\times10^{-3}$ V/divisão) a 5 V/divisão para o eixo da diferença de potencial e de 2 ns/divisão (ou $2\times10^{-9}$ s/divisão) a 5 s/divisão para o eixo relativo ao tempo.

**3 LINHA DE STATUS**

Na parte superior do visor aparecem indicações da configuração do osciloscópio. Quando os terminais de entrada do osciloscópio **1** e/ou **2** estão ligados a algum tipo de sinal elétrico, aparece indicado na parte superior do visor - na linha de status - algumas informações, entre elas: a escala vertical de cada canal (**1** e/ou **2**) e também a escala horizontal, que corresponde ao tempo. A última indicação corresponde ao modo de operação do osciloscópio, que pode ser alterado através dos comandos no painel de controle, localizados acima e à direita:

**RUN**: neste modo o osciloscópio coleta dados e mostra no visor o traço mais recente do sinal elétrico;

**STOP**: este comando permite um "congelamento" da imagem, tornando possível analisar as características de um evento isolado;

**AUTOSTORE**: com esta função é possível coletar dados e colocar ao mesmo tempo o sinal elétrico mais recente - com um brilho intenso - e o sinal prévio - com um brilho menos intenso.
**ERASE**: limpa o visor. A indicação anterior ao modo de operação na linha de status (um símbolo ligado ao canal **1** ou **2**) diz respeito à função **"TRIGGER"** , que é o circuito que inicializa uma varredura horizontal no osciloscópio e determina o ponto inicial da onda no visor.

## 4 REALIZANDO MEDIDAS

### 4.1 *Medidas no Eixo Horizontal*

Para melhor compreender todas as opções de medidas que este aparelho proporciona, observe a figura 2 que ilustra alguma das muitas características de uma onda, por exemplo, senoidal:

➔ Localize no painel de controle a tecla **"TIME"**. Pressione esta tecla e observe que surge um menu de opções na parte inferior do visor, correspondente às seis teclas cinzas ali localizadas:

**SOURCE**: com esta tecla é possível selecionar qual sinal (do canal 1 ou 2) se deseja analisar;
**FREQ**: mede a freqüência da onda aplicada no canal selecionado;
**PERIOD**: determina o período da onda aplicada no canal selecionado
**DUTY CYCLE**: ciclo de trabalho fornece a relação entre a largura do semiciclo positivo e a largura total do ciclo, ambas medidas no nível 50% da amplitude.
**CLEAR MEAS**: apaga todas as medidas realizadas e remove os cursores;
**NEXT MENU**: dá acesso ao próximo menu, descrito a seguir:

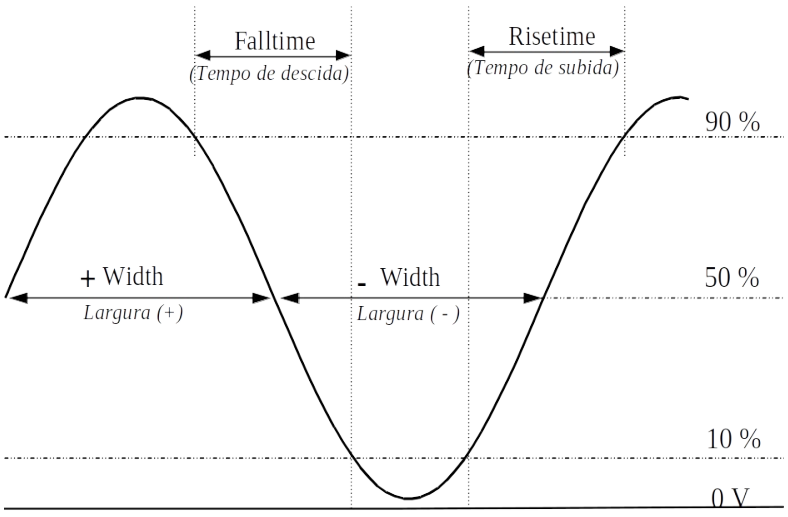



FIGURA 2 – Exemplo de sinal no visor do osciloscópio.

**SHOW MEAS (OFF) ON**: (não) mostra a posição dos cursores onde as medidas estão sendo realizadas;
**+ WIDTH**: largura do semiciclo positivo, medida no nível de 50% da amplitude;
**- WIDTH**: largura do semiciclo negativo, medida no nível de 50% da amplitude;
**RISE TIME**: tempo de subida, medido entre os níveis 10% e 90% da amplitude;
**FALL TIME**: tempo de descida, medido entre os níveis 10% e 90% da amplitude;
**PREVIOUS MENU**: retorna ao menu anterior.

➔ Observe no visor os valores indicados e a região (delimitada pelos cursores) onde elas são efetuadas, ao pressionar estas teclas no osciloscópio.

## 4.2 *Medidas no Eixo Vertical*

A figura a seguir ilustra alguns parâmetros ligados à diferença de potencial:

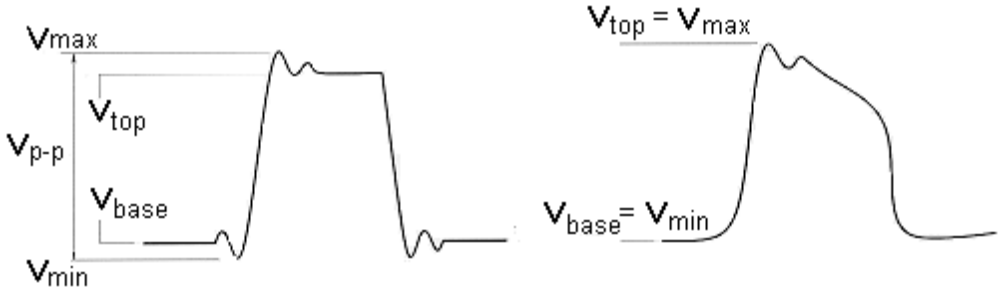



FIGURA 3 – Sinais na tela do osciloscópio.

➔ Localize no painel de controle a tecla **"VOLTAGE"**. Pressione esta tecla e observe que surge um menu de opções na parte inferior do visor, correspondente às seis teclas cinzas ali localizadas:

**SOURCE**: com esta tecla é possível selecionar qual sinal (do canal 1 ou 2) se deseja analisar;
**V p-p**: determina a diferença de potencial entre os picos;
**V avg**: determina a diferença de potencial média;
**V rms**: determina a diferença de potencial quadrática média ou eficaz que, para uma onda senoidal, é igual a 0,707 Vmax para uma onda senoidal;
**CLEAR MEAS**: apaga todas as medidas realizadas e remove os cursores;
**NEXT MENU**: dá acesso ao próximo menu, descrito a seguir:

**SHOW MEAS (OFF) ON**: (não) mostra a posição dos cursores onde as medidas estão sendo realizadas;
**V max**: determina a diferença de potencial máxima;
**V min**: determina a diferença de potencial mínima;
**V top**: determina a diferença de potencial do topo do sinal;
**V base**: determina a diferença de potencial da base do sinal;
**PREVIOUS MENU**: retorna ao menu anterior.

## 4.3 *Medidas aleatórias nos Eixos Horizontal e Vertical*

As possíveis medidas realizadas nos itens 7.4.1 e 7.4.2 se referem a parâmetros pré-definidos. Também é possível realizar, com auxílio de *cursores*, quaisquer medidas tanto em um eixo, como no outro.

➔ Localize no painel de controle e pressione a tecla **"CURSORS".**
➔ Observe no visor do osciloscópio o menu contendo as seguintes opções:

**SOURCE**: com esta tecla é possível selecionar qual sinal (do canal 1 ou 2) se deseja analisar;
**ACTIVE CURSOR: V1, V2, t1 e t2 -** V1 e V2 são cursores para medidas da diferença de potencial, no eixo Y, enquanto que t1 e t2 são cursores para medidas de tempo, no eixo X.

➔ Selecione com o auxílio das teclas cinzas o que deseja medir: V1 e/ou V2, e t1 e/ou t2. Se apertar simultaneamente V1 e V2 ou t1 e t2 os dois cursores se movem juntos.

➔ Use o botão localizado logo abaixo da tecla **"CURSORS"** no painel de controle para mover o(s) cursor(es) selecionado(s) no osciloscópio.
➔ Verifique o que aparece no visor, logo acima do menu, após pressionar uma das teclas e mover o cursor.

**CLEAR CURSORS:** Apaga as medidas realizadas e remove os cursores da tela.

## 5 TRIGGER (GATILHO)

É graças ao Trigger (Gatilho) que repetidos trens de onda aparecem imóveis na tela do osciloscópio. Se o aparelho não dispusesse desta função, cada varredura poderia acontecer em diferentes pontos do sinal, causando uma imagem com vários trens de onda em movimento. Esta função permite então sincronizar o aparecimento do próximo trem de ondas justamente sobre o anterior e assim dar a impressão de imobilidade da onda.

Ao girar o botão **"LEVEL"**, ou então ao pressionar a tecla **"SOURCE"** ou ainda **"MODE"** aparece, por alguns segundos logo abaixo do diagrama, o nível do Trigger (do canal em análise), indicando a partir de que nível o osciloscópio começará a fazer a varredura horizontal a fim de detectar algum sinal elétrico. Para ver esta função em operação, proceda da seguinte maneira:

➔ Selecione o gerador de função para fornecer uma onda senoidal.
➔ Ajuste no gerador de função uma amplitude de onda que ocupe aproximadamente duas divisões na escala vertical do osciloscópio.
➔ Pressione a tecla **"MODE"** e observe o nível do Trigger em relação ao terra.
➔ Selecione o modo **"NORMAL"** no menu abaixo do diagrama.
➔ Gire o botão **"LEVEL"** deslocando o nível do Trigger para cima e observe que, a partir de um determinado nível, o símbolo do Trigger na linha de status começará a piscar. Quando isto acontecer, o osciloscópio não estará sincronizando qualquer sinal elétrico no canal em análise, pois estamos procurando um sinal com um valor (*Level*) maior do que aquele que é fornecido pelo gerador. (O diagrama fica congelado e se forem pressionadas as teclas **"ERASE"** e "**RUN"** sucessivamente, o último sinal que o osciloscópio capturou e congelou será apagado do monitor).
➔ Para encontrar o sinal, gire o botão **"LEVEL"** no sentido contrário ao realizado anteriormente até o símbolo do Trigger na linha de status parar de piscar.

Além de controlar o nível da varredura horizontal, é possível também determinar se o ponto do Trigger está sobre a parte ascendente ou descendente da onda.

➔ Pressione a tecla **"SLOPE/COUPLING"**.
➔ Selecione com a tecla cinza onde posicionar o Trigger, na parte ascendente ou descendente da onda (*Slope* ↑ ou ↓ ).

Há diferentes modos de configurar o *Trigger*. Os mais comuns são **"AUTO"** e **"NORMAL"**. Para selecioná-los, pressione a tecla **"MODE"**. No modo **"NORMAL"** o osciloscópio somente mostra o sinal elétrico se este atingir o nível do Trigger (ou então irá congelar na tela o último sinal capturado por ele). Por outro lado, mesmo que o sinal sofra uma redução significativa na diferença de potencial, se o osciloscópio estiver no modo **"AUTO"**, este sinal não irá desaparecer do monitor, pois haverá um ajuste do nível do Trigger.

O osciloscópio reconfigura o nível do Trigger para o centro da onda quando se pressiona as teclas **"MODE"** e **"AUTO LVL"** ou **"MODE"** e **"AUTO"** ou ainda **"MODE"** e **"NORMAL"**. Se o osciloscópio estiver apropriadamente configurado em relação à varredura horizontal, o espaço relativo ao modo de operação do Trigger na linha de status fica sem qualquer indicação.

## 6 DOIS SINAIS ELÉTRICOS

É possível analisar dois sinais elétricos provenientes de dois diferentes geradores de função.

➔ Conecte o terminal de saída de um outro gerador de função ao terminal **2** do osciloscópio, com o cabo tipo BNC.
➔ Ligue este gerador de função.
➔ Faça um ajuste automático de escala.
➔ Observe o que acontece.

Na linha de status estará indicado, além das escalas vertical e horizontal, em que canal o *Trigger* está configurado. Para este canal o sinal se apresentará estável no osciloscópio, enquanto que o outro sinal se mostrará em constante movimento. Para alterar o canal do *Trigger* proceda da seguinte maneira:

➔ Localize no painel de controle e pressione a tecla **"SOURCE"**.

Surgirá no visor na parte de baixo um menu contendo as opções para a seleção do *Trigger*.

➔ Mude de canal apertando as teclas **1** ou **2** e verifique o que ocorre no visor.
➔ Procure selecionar no gerador de função, que fornece o sinal elétrico ao canal não configurado para o *Trigger*, uma freqüência muito próxima ao sinal do canal configurado para o *Trigger*.
➔ Verifique o que ocorre quando as duas freqüências são iguais.

Todas as medidas descritas para apenas um sinal elétrico podem ser realizadas para os dois canais em questão. Além disso, é possível operar matematicamente (adicionar e subtrair) as duas ondas.

➔ Localize no painel de controle e pressione a tecla **" + - ".**

Surgirá no visor na parte de baixo um menu indicando:

**OFF**: Mostra os dois sinais sem nenhuma operação envolvendo-os;
**1 + 2**: Soma os dois sinais elétricos;
**1 - 2**: Subtrai os dois sinais elétricos.

## 7 MODO XY

Este modo converte o gráfico do osciloscópio de diferença de potencial × tempo em diferença de potencial × diferença de potencial. O modo XY é útil quando se quer determinar a diferença de fase entre dois sinais de mesma freqüência com o método de Lissajous.

➔ Conecte dois sinais de mesma freqüência ao osciloscópio.
➔ Pressione sucessivamente as teclas **"AUTOSCALE"**, **"MAIN/DELAYED"** e **"XY".**
➔ Centralize o sinal no visor com a ajuda dos botões **"POSITION"**, localizados logo abaixo dos botões que ajustam a escala vertical **"VOLTS/DIV"**.

Através da figura que surge no visor, é possível determinar a diferença de fase entre os dois sinais elétricos. Considerando a figura abaixo, pode-se determinar a diferença de fase ($\varphi$) a partir da expressão $\text{sen}\ \varphi \cong d/D$.

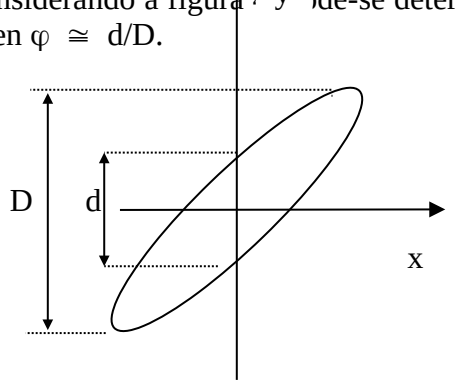


FIGURA 4 – Determinação da diferença de fase pela figura de Lissajous.

Podemos ter dois casos limites: => linha reta, quando $\varphi = 0°$;
=> circunferência, quando $\varphi = 90$ °.

Deve ser enfatizado que este não é o único método para se determinar a diferença de fase. Ela também pode ser obtido com os dois canais no modo **V** *x* **t** .

# Circuito RC em Série e Associação de Capacitores

## 1 INTRODUÇÃO:

Você fará este experimento em duas partes distintas. Na primeira você utilizará uma fonte CC, resistor, capacitor, multímetros e cronômetro. Na segunda será usado um gerador de funções, o qual fornece ao circuito RC uma diferença de potencial periódica do tipo quadrada – cuja freqüência e amplitude podem ser controladas facilmente. Através do osciloscópio se monitora a resposta dos elementos resistivo e capacitivo do circuito sob ação daquele sinal externo. Com esta montagem é possível, por exemplo, determinar a constante de tempo capacitiva do circuito.

## 2 OBJETIVOS:

- Estudar a resposta de um circuito RC em série sob a ação de uma diferença de potencial externa.
- Determinar a constante de tempo capacitiva do circuito utilizando um ajustamento gráfico.
- Determinar a constante de tempo capacitiva característica do circuito utilizando o osciloscópio.
- Usar adequadamente os recursos disponíveis no osciloscópio.

## 3 MATERIAL UTILIZADO:

Fonte de corrente contínua; capacitores e resistores; multímetros; cronômetro; placa de conexão; cabos para conexão, gerador de função; osciloscópio digital.

## 4 ROTEIRO DE ESTUDOS:

1) Qual grandeza física caracteriza um resistor? Qual sua unidade no S.I.?
2) Qual grandeza física caracteriza um capacitor? Qual sua unidade no S.I.?

Para as próximas questões considere o circuito da Figura a seguir, constituído por um resistor em série com um capacitor. Quando a chave "*s*"é posicionada em "*a*" introduz-se uma força eletromotriz $\varepsilon$ no circuito, provocando o carregamento do capacitor. Aplicando-se a lei das malhas ao circuito, obtém-se a *Equação da Carga*:

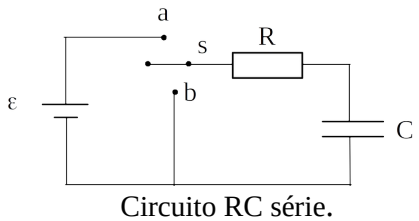
$$\varepsilon = V_R + V_C = i\,R + q/C,$$

onde a corrente $i$ e a carga $q$ estão relacionadas pela expressão:

$$i = dq/dt.$$

Quando a chave "*s*" é colocada na posição "*b*", inicia-se o descarregamento do capacitor, uma vez que neste caso a fonte de força eletromotriz não faz parte do circuito. Nesta situação, a lei das malhas fornece a *Equação de Descarga*:

$$0 = V_R + V_C = i\,R + q/C.$$



Circuito RC série.

3) Para o circuito RC da Figura ao lado, escreva a equação diferencial que descreve a variação da carga (*q*) com o tempo (*t*) durante o carregamento do circuito, identificando cada elemento da equação.
4) Faça o mesmo para o descarregamento do circuito.

5) Quais são as expressões que representam as soluções das equações diferenciais anteriores?
6) De que forma varia a corrente na carga e na descarga do circuito RC série?
7) Supondo dois capacitores de capacitâncias conhecidas $C_1$ e $C_2$, escreva a equação para a capacitância equivalente da associação em série e em paralelo.

## 5 PREVISÕES:

- O comportamento de um circuito RC pode ser observado utilizando-se um cronômetro comum se os valores de *R* e *C* forem suficientemente elevados. Caso contrário a carga e a descarga de um capacitor podem ser observadas no osciloscópio, com a utilização de um sinal periódico quadrado.
- Uma vez conhecido o produto $R \cdot C$, por alguma técnica experimental, é possível calcular o valor da capacitância, e assim poderemos determinar experimentalmente a capacitância equivalente, quando capacitores forem associados em série e em paralelo.

## 6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E EXPLORAÇÃO:

### ***Parte A***

#### MONTAGEM EXPERIMENTAL:

- Faça a montagem experimental conforme a Figura 1, onde C é um capacitor de 1 F e R é um resistor de 75 Ω. Coloque dois multímetros para medir as tensões no resistor e no capacitor, simultaneamente. Observe que o terminal do capacitor com uma marca preta deve ser ligado ao terminal negativo da alimentação. Utilize uma tensão de 3V na fonte de CC.

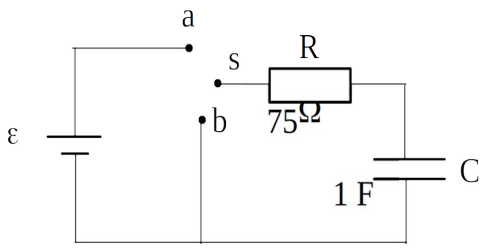



FIGURA 1 - Montagem Experimental do Circuito RC

#### COLETA DE DADOS:

- Durante a carga e a descarga do capacitor, monitore as duas voltagens em função do tempo. Organize tabelas.
- Faça os gráficos de $V_R \times t$ e $V_C \times t$ para o resistor e o capacitor durante a carga e a descarga, usando o computador e um programa para traçado de gráficos.
- Faça o ajustamento (“fitting”) das duas curvas obtidas, tanto na carga quanto na descarga, usando os recursos matemáticos do programa de gráficos.

**ANÁLISE DOS RESULTADOS:**

1) Que tipo de curva $V_R \times t$ e $V_C \times t$ você obtém na carga e na descarga do capacitor?
2) O que você observa ao somar $V_R(t)$ e $V_C(t)$ para cada instante de tempo $t$ (para a carga e para a descarga) ? Explique este comportamento.
3) Dê o significado físico de cada coeficiente obtido no ajustamento das curvas.
4) Qual o valor da constante de tempo capacitiva para o circuito analisado.
5) Com base no comportamento de $V_R(t)$ e $V_C(t)$, o que você pode concluir sobre a variação da corrente e da carga armazenada no capacitor (durante a carga e a descarga)?
6) Se você quisesse determinar a carga máxima no capacitor, como você procederia?

## ***Parte B***

**MONTAGEM EXPERIMENTAL:**

- Observe a tensão de operação do osciloscópio e do gerador de função (127 V ou 220 V) e conecte-os à rede elétrica adequadamente.
- Observe a Figura 2 e monte o circuito RC sobre a placa de conexão, usando os componentes sugeridos na Tabela 1.

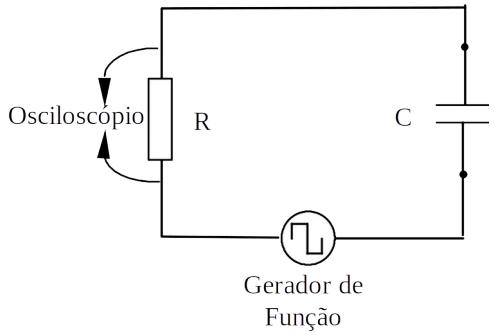



FIGURA 2 - Montagem Experimental do Circuito RC (parte B)

- Conecte, com um cabo BNC-banana, o gerador de função à placa do circuito, identificando antes a polaridade dos cabos.
- Ligue o gerador de função e selecione uma onda quadrada com freqüência de 100 Hz aproximadamente.
- Verifique com o osciloscópio o sinal sobre o resistor e sobre o capacitor. Observe que os terminais de terra (terminais pretos) tanto do gerador quanto do osciloscópio devem estar ligados no mesmo ponto. Deixe o terminal terra (ponta preta) do gerador de função fixo na placa do circuito e conecte o cabo terra do osciloscópio (ponta preta) a este terminal. Por causa desta restrição (de mesmo terminal terra para ambos os equipamentos) haverá necessidade de se realizar a troca de posição entre o capacitor e o resistor, e vice-versa, para monitorar a diferença de potencial sobre cada um desses elementos do circuito.

**AQUISIÇÃO DE DADOS:**

Com o osciloscópio, monitore o sinal sobre o capacitor. Ajuste as escalas vertical e horizontal no osciloscópio, tal que apareça na tela somente a parte que corresponde à carga do capacitor (isto corresponde à parte positiva da diferença de potencial sobre o resistor, conforme a figura a seguir).

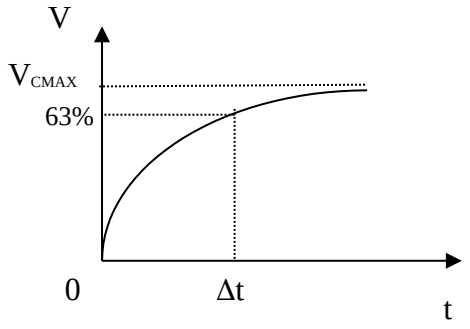



FIGURA 3(A) – Tensão sobre o capacitor durante a carga

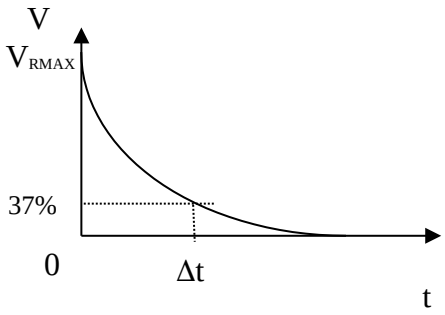



FIGURA 3(B) – Tensão sobre o resistor durante a carga

- Observando no osciloscópio a forma de onda da tensão sobre o capacitor, ajuste no gerador de função uma amplitude de tensão de 1,00 V para esta parte positiva da diferença de potencial.
- Com o auxílio do botão "CURSORS" meça o tempo necessário para este sinal atingir 63% da carga total do capacitor, ou o equivalente: o tempo para atingir 37% da tensão total (positiva) sobre o resistor. Para esta situação específica o tempo medido no osciloscópio ($\Delta t$) é o próprio valor da constante de tempo. Anote os dados coletados na Tabela 1.
- Repita os procedimentos acima para os demais resistores.

- Considere a Figura 3(B). Usando uma das montagens, verifique experimentalmente (com uso dos cursores) a seguinte propriedade da curva exponencial: determine o intervalo $\Delta t$ para que a tensão $V_R(t)$ na descarga, caia de $V_{RMAX}$ até $V_{RMAX}/2$. Agora, determine o intervalo $\Delta t$ para que a mesma tensão caia de $V_{RMAX}/2$ até $V_{RMAX}/4$. Você está medindo o tempo para que a tensão, e também a carga, caia à metade do seu valor, em relação a um dado valor inicial. Em certos fenômenos na Física, este intervalo $\Delta t$ é chamado de tempo de meia-vida.

**TABELA 1**- Valores nominais de R e C e o tempo de carga de um capacitor.

| R | C | R·C teórico* ( ) | $\Delta t$ medido ( ) |
|---|---|---|---|
| 10 kΩ | 0,1 μF | | |
| 5 kΩ | 0,1 μF | | |
| 1 kΩ | 0,1 μF | | |

** Calculado a partir dos valores nominais.*

⇨ Nos passos seguintes é recomendado que você escolha dois capacitores com capacitâncias na mesma ordem de grandeza.

- Use a mesma montagem dos itens anteriores. Associe dois capacitores em *série*. Escolha um resistor para formar o circuito RC em série.

$C_1$ = _____ $C_2$ = _____ R = _____

- Faça uma estimativa da freqüência que deve ser utilizada no gerador de sinais para que a medida seja possível.

- Através da medida da constante de tempo capacitiva do circuito, determine experimentalmente a capacitância equivalente da associação. Complete a Tabela 2.
- Repita as medidas para uma associação em *paralelo*.

$C_1$ = _____ $C_2$ = _____ R = _____

**TABELA 2** – Associação de capacitores

| associação | R ( ) | $C_{eq}$ teórico* ( ) | $\Delta T$ teórico ( ) | $\Delta T$ medido ( ) | desvio % |
|---|---|---|---|---|---|
| *série* | | | | | |
| *paralelo* | | | | | |

**ANÁLISE DOS RESULTADOS:**

1) Qual o valor da constante de tempo capacitiva para os circuitos analisados na Tabela 1?

2) Analise a diferença obtida entre o valor medido de $\Delta t$ e o valor nominal na Tabela 1. Quais são as possíveis causas para as discrepâncias?

4) Compare os resultados experimental e teórico na Tabela 2. Discuta o desvio porcentual em cada associação.

5) Por que a freqüência do gerador não deve ser excessivamente alta?

# Indutores e Circuito RL em Série

## 1 INTRODUÇÃO:

Numa das aulas anteriores, praticamos o uso do osciloscópio na análise de um circuito RC em série. Pudemos observar as curvas de carga e descarga do capacitor. Verificamos que no processo de carga do capacitor a corrente máxima ocorre no instante $t = 0$, quando nenhuma carga está acumulada no capacitor. Assim, a tensão inicial no capacitor é igual a zero. Porém no resistor a tensão inicial ($t = 0$) é máxima, tendendo exponencialmente a zero com o decorrer do tempo. Notamos assim que o processo de carga do capacitor faz com que as tensões no capacitor e no resistor não sigam juntas. Passamos posteriormente à análise das respostas do circuito RC a um sinal senoidal, onde pudemos variar a freqüência deste. As fases das tensões sobre o resistor e o capacitor, em relação ao sinal do gerador, puderam ser analisadas utilizando-se os dois canais do osciloscópio. Em termos de energia pudemos concluir que a energia fornecida pela fonte é inicialmente dissipada no resistor, e passa a se acumular no capacitor à medida que o tempo avança.

Nesta aula utilizaremos os mesmos recursos para analisarmos indutores e o comportamento dos circuitos RL em série. Exploraremos o comportamento de indutores quando submetidos a sinais periódicos, procurando observar as grandezas equivalentes àquelas que observamos no circuito RC. Determinaremos o valor da indutância de uma bobina e da associação de bobinas.

## 2 MATERIAL UTILIZADO:

Osciloscópio, gerador de funções, caixa de resistores, placa para conexões elétricas, indutores diversos, cabos para conexão.

## 3 ASSUNTOS PARA EXPLORAR:

- O acúmulo de energia no indutor pode ser observado no osciloscópio com a utilização de um sinal periódico, na forma de onda quadrada.
- A forma da tensão sobre o resistor ou sobre o indutor não é necessariamente igual àquela fornecida pela fonte.
- A determinação experimental da constante de tempo $\tau$ (que é igual a L/R) nos permite calcular o valor da indutância. Assim, poderemos realizar o experimento de determinação da indutância equivalente, quando indutores forem associados em série e em paralelo.

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE:

- Estabeleça o modelo físico que descreve o comportamento das tensões sobre o resistor e o indutor. Note que neste caso a resposta do circuito pode ser mais complexa do que no caso do capacitor.
- Repita o experimento que permitiu determinar as curvas de carga e de descarga de um capacitor, utilizando agora um indutor em lugar do capacitor. Monitore também o sinal do gerador. É conveniente utilizar resistores na faixa entre 300 Ω e 1000 Ω.
- Compare o aspecto do sinal observado para cada caso (gerador, resistor e indutor). Procure verificar se, ao aumentar a tensão sobre o resistor, a tensão sobre o indutor também aumenta.

- Determine a indutância de um indutor de 1200 espiras utilizando a resposta de um circuito RL.

- O valor de R, a ser considerado nos cálculos, se deve exclusivamente ao resistor colocado em série no circuito (use 1k Ω )? Meça o valor real da resistência do circuito.

- Associe indutores em série e em paralelo e determine a indutância equivalente a partir da razão L/R.

- Quais são as expressões para a indutância equivalente da associação de indutores em série e em paralelo?

- O resultado previsto no item anterior foi observado experimentalmente

- O sinal quadrado aplicado a um circuito RL pode gerar respostas bem mais complexas do que aquelas que obtivemos nos circuitos RC. Você pôde observar isso? Porque existe esta diferença?

# Campo Magnético e Força Magnética Sobre Condutores de Corrente

## 1 OBJETIVO:

- Analisar as forças magnéticas provocadas por correntes elétricas.
- Estudar de que forma a força depende da intensidade de corrente e do comprimento do condutor.
- Prever a direção e o sentido das forças que agem sobre fios e espiras condutoras de correntes, imersos em campos magnéticos.

## 2 MATERIAL UTILIZADO:

Base de ferro com imãs; fonte de corrente contínua; cabos para conexão; suporte; garras; interruptor tipo campainha; triedro de vetores; balança de braços; nível; placas com condutores em circuito impresso, ímã em forma de "U" com peças polares, suportes de cerâmica, indutores.

## 3 ROTEIRO DE ESTUDOS

1. Qual é a expressão para o campo magnético **B** produzido por uma corrente elétrica *i* que circula num fio condutor retilíneo? Faça um esboço das linhas de campo magnético nas vizinhanças do condutor, indicando o vetor **B** em alguns pontos.
2. Qual é a expressão que define a força que age sobre um fio condutor retilíneo de comprimento *L*, que transporta uma corrente elétrica *i*, imerso num campo magnético externo **B** ?
3. À medida que a intensidade da corrente aumenta, o que acontece com o módulo da força magnética que age sobre este fio?
4. O que acontece com o sentido da força magnética se invertermos o sentido da corrente?
5. Explique, esquematicamente, quais as forças que aparecem quando dois fios condutores e paralelos, transportando correntes de mesmo módulo e sentido, são colocados próximos um do outro.
6. Explique, esquematicamente, o que acontece quando os dois fios condutores paralelos transportam correntes de mesmo módulo mas de sentidos opostos.

## 4 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO:

Este experimento está dividido em partes. Inicialmente faremos uma demonstração das linhas de força do campo magnético produzido por condutores ou indutores. Nas demais é analisado o fato de que um fio, ou uma espira, que transporta uma corrente elétrica e está imerso num campo magnético experimenta uma força magnética, cuja magnitude depende da intensidade da corrente e do campo magnético. Utilizando fios e bobinas, analisa-se esta situação sob diferentes montagens experimentais. Uma das montagens emprega um sistema conhecido como balança de corrente; neste caso será possível medir a força e fazer uma análise quantitativa do fenômeno.

## 5 PROCEDIMENTO:

Utilizando limalha de ferro, determine as linhas de força de campos magnéticos criados por imãs e por bobinas percorridas por correntes.

> ⇨ Não espalhe a limalha diretamente sobre os imãs ou sobre as bobinas. Espalhe a limalha sobre uma folha de papel, então coloque esta folha sobre o ímã ou a bobina que se quer estudar. Isto facilitará a separação da limalha ao final do estudo.

**Montagem Experimental (*1ª Parte*):**

- Prenda a haste cilíndrica no suporte (observe a Figura 1).
- Prenda os terminais do arame em forma de "U" na haste.
- Com os cabos ligue as saídas destes terminais ao interruptor tipo campainha e à fonte de corrente.
- Posicione o imã na vertical, de modo que o arame fique entre seus pólos.
- Ligue a fonte e forneça inicialmente uma corrente pequena, por volta de 1 A.
- Ligue momentaneamente o interruptor e observe o que acontece ao arame.
- Aumente gradativamente a intensidade da corrente e observe o que acontece.
- Inverta os terminais na saída da fonte e repita os passos anteriores. Observe o que acontece.
- Mantenha o mesmo sentido para a corrente e inverta a posição do imã. Repita o experimento e verifique o que acontece.
- Responda as questões da seção de Análise de Resultados.

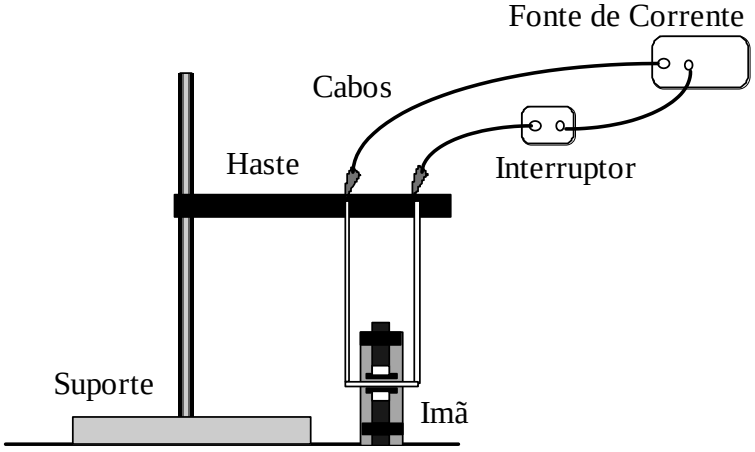



FIGURA 1 – Condutor móvel em forma de "U".

**Montagem Experimental (*2ª Parte*):**

Nesta parte é feito um estudo quantitativo, medindo-se a força que atua sobre o condutor. São utilizados quatro condutores com comprimentos diferentes e, para cada um deles, faz-se circular correntes com intensidades diferentes. O campo magnético é devido a um ímã permanente e, portanto, será constante. Para medir a força é utilizada uma balança de braços. O equipamento usado na segunda parte em geral é chamado de balança de corrente.

- Suspenda num braço da balança a placa isolante com o condutor de 12,5 mm, apertando o parafuso de fixação. Observe a Figura 2.
- Ligue a esta placa os fios flexíveis, que deverão estar conectados ao suporte de terminais.

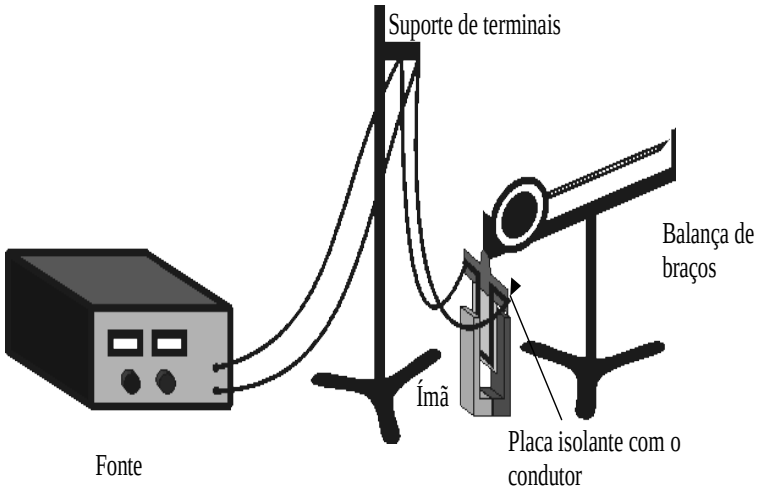



FIGURA 2 – Montagem da balança de corrente.

- Posicione o ímã permanente de forma que o condutor possa deslocar-se livremente entre as peças polares e, no equilíbrio, a trilha horizontal esteja exatamente na região central; isto diz respeito à posição vertical e também horizontal. Caso seja necessário, ajuste a haste (suporte) vertical da balança.
- Nivele a base da balança com auxílio dos parafusos do tripé e de um nível de bolha.
- Com a fonte desligada, equilibre a balança, de modo que os braços estejam na horizontal. Faça esta leitura e anote-a na Tabela 1.

Instruções para leitura da balança:

- Inicialmente desloque a massa de 200 g, na haste posterior, até uma das posições marcadas, tal que o braço não mude o sentido da sua inclinação.
- Repita o procedimento para a massa de 100 g na haste frontal.
- Faça um ajuste fino movendo a escala circular até o instante em que a haste da balança esteja perfeitamente na horizontal (observar o alinhamento das marcas horizontais).

- Cada graduação da escala circular corresponde a 0,1 g.

- Existe um vernier adjacente à escala circular, o qual subdivide cada divisão da escala circular em 10 partes, ou seja, 0,01 g.
- Na escala circular, leia o valor que está imediatamente à direita da marca "0" do vernier.
- Para ler a escala do vernier, observe qual divisão está melhor alinhada com alguma divisão da escala circular.
- A massa medida será dada pela soma: das leituras das duas massas nas hastes horizontais, da leitura na escala circular e da leitura no vernier. Será possível obter uma precisão da ordem do centésimo do grama.

- Faça circular pelo condutor uma corrente de 1 A. Equilibre novamente a balança e faça a leitura da balança.
- Repita este procedimento para outros valores de corrente, conforme a Tabela 1.

**TABELA 1** – Leituras da balança.

| *i* | Fio de 12,5 mm ( ) | Fio de 25,0 mm ( ) | Fio de 50,0 mm ( ) | Fio de 100 mm ( ) |
|---|---|---|---|---|
| Sem corrente | | | | |
| 1,0 A | | | | |
| 1,5 A | | | | |
| 2,0 A | | | | |
| 2,5 A | | | | |
| 3,0 A | | | | |
| 3,5 A | | | | |
| 4,0 A | | | | |
| 4,5 A | | | | |
| 5,0 A | | | | |

- Terminadas as medidas para a primeira placa, substitua-a por outra com um condutor de comprimento 25 mm. Lembre de fixar a placa ao braço da balança com o parafuso. Repita os passos anteriores.
- Siga os mesmos procedimentos para os condutores de comprimento 50 mm e 100 mm.

OBSERVAÇÃO: O condutor de 100 mm na realidade é formado por dois condutores de 50 mm em paralelo, percorridos por correntes iguais. O efeito desta configuração é semelhante ao de um único fio com comprimento 100 mm. A placa a ser utilizada tem a indicação: $\ell$ = 50 mm n=2 .

- Responda as questões correspondentes da Análise de Resultados.

## 5 ANÁLISE DE RESULTADOS:

### *1ª Parte* - Imã e Fio Condutor em Forma de "U":

1) Desenhe esquematicamente o sentido da corrente elétrica, do campo magnético e da força magnética para cada situação analisada no experimento. Utilize para isso o triedro de vetores.
2) Qual variação ocorreu quando a polaridade dos fios (sentido da corrente) foi invertida?
3) Qual variação foi observada quando se inverteu a posição do ímã ?
4) Explique o que aconteceu quando a intensidade de corrente foi aumentada.

### *2ª Parte* – Balança de Corrente:

Com os dados medidos será possível fazer dois estudos, que permitirão obter a relação entre a intensidade da corrente e a força magnética, e a relação entre a força magnética e o comprimento do condutor.

Não esqueça de calcular a força correspondente a cada leitura da balança, pois a força peso em um dos braços da balança é equilibrada pela força magnética sobre o condutor e pela força peso deste condutor, que estão aplicadas no outro braço da balança.

Lembre que o que interessa é a variação da força em relação ao valor medido sem corrente, o qual corresponde apenas à força peso da placa isolante com o condutor.

- Para o condutor de comprimento 12,5 mm, faça um gráfico com a força magnética representada no eixo vertical e a corrente no eixo horizontal. Ajuste uma curva a estes pontos experimentais e obtenha a sua equação.
- Que tipo de relação você obteve entre $F$ e $i$ ?
- Repita esta análise gráfica para os outros três condutores.
- Faça um gráfico dos coeficientes angulares, obtidos nos gráficos anteriores, em função do comprimento do condutor. Ajuste uma curva a estes pontos experimentais e obtenha a sua equação.
- A partir deste gráfico determine o campo magnético do ímã permanente.

- Agora vamos estudar de que forma o comprimento do condutor influi na força magnética. Considere os resultados para a corrente de 2 A. Faça um gráfico representado a força no eixo vertical e o comprimento dos fios no eixo horizontal. Neste caso teremos apenas quatro pontos a plotar.

- Ajuste uma curva a estes pontos experimentais e obtenha a sua equação.
- Que tipo de relação você obteve entre $F$ e $L$ ?
- Repita esta análise gráfica para os dados da corrente igual a 4 A.

# Indução Eletromagnética, Lei de Faraday e Lei de Lenz

## 1 INTRODUÇÃO:

Até o momento verificamos o efeito de campos magnéticos sobre cargas em movimento (correntes). Nesta aula vamos analisar outro importante fenômeno associado com os campos magnéticos. A variação do campo magnético numa região produz campos elétricos. Se houver um circuito nessa região, a presença desse campo elétrico irá produzir correntes elétricas. Vamos iniciar o estudo procurando produzir correntes elétricas em bobinas a partir de movimento relativo entre imãs e bobinas. A seguir iremos analisar esses sinais utilizando um sensor de tensão e o programa *Data Studio*. Procuraremos inferir as leis de Faraday e de Lenz a partir de algumas montagens experimentais. Discutiremos também os efeitos de correntes induzidas (correntes de Foucault) sobre o movimento de peças metálicas em regiões de campos magnéticos não uniformes.

O movimento relativo entre um ímã e uma bobina induz um sinal elétrico na bobina, o qual depende de diferentes fatores: polaridade do campo do ímã, velocidade do movimento, intensidade do campo magnético. Essas relações são descritas pelas leis de Faraday e de Lenz. Vamos explorar a relação entre esses fatores utilizando um ímã e um indutor (bobina) conectado a um sensor de tensão, para análise do sinal que aparece na bobina.

## 2 OBJETIVO:

Analisar a geração e os efeitos das correntes induzidas.

- Medir a força eletromotriz (fem) induzida pelo movimento relativo entre um indutor e um imã.
- Determinar o fluxo do campo magnético no interior do indutor

## 3 MATERIAL UTILIZADO:

Computador e interface; sensor de tensão elétrica; fonte de corrente contínua; indutores (bobinas); imãs e núcleo de ferro; galvanômetro; gerador de função; cabos para conexão; placas de alumínio; suporte; garras.

## 4 ROTEIRO DE ESTUDOS:

1) Você observou experimentalmente em uma prática anterior que se pode construir o modelo de linhas de forças para o campo elétrico. Como são as linhas de força de um campo magnético de um imã?
2) Dê exemplos de dispositivos em que a indução eletromagnética é um fenômeno importante.
3) Qual é a definição de fluxo do campo magnético? Qual é a sua unidade no S.I. ?
4) O que diz a lei de Faraday da indução eletromagnética?
5) O que diz a lei de Lenz?
6) Justifique o sinal negativo que aparece na lei de Faraday.
7) Qual é a lei de Newton análoga à lei de Lenz?
8) O que são correntes de Foucault?

## 5 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO:

Este experimento está dividido em três partes. Inicialmente é analisado o que acontece com a diferença de potencial nos terminais de um indutor (neste caso, um

enrolamento de fio em forma de bobina) quando um ímã se aproxima ou se afasta dele. Para isso monitora-se os terminais do indutor com um sensor de tensão elétrica conectado à interface. Observa-se então no computador um gráfico da diferença de potencial no indutor em função do tempo. A segunda parte é uma prática envolvendo dois circuitos independentes, cada um contendo um indutor. Um dos circuitos é conectado a um galvanômetro e o outro a uma fonte de tensão (contínua e alternada). Observa-se o que acontece ao galvanômetro, quando a fonte é ligada ou desligada. A última parte envolve uma análise qualitativa sobre o movimento de três diferentes tipos de placas de alumínio em um campo magnético, envolvendo os conceitos de corrente de Foucault.

ATENÇÃO: **NÃO APROXIME OS IMÃS DO COMPUTADOR, DO MONITOR OU DOS DISQUETES.**

## 6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL:

### 6.1 MONTAGEM EXPERIMENTAL (*1ª Parte*):

- Ligue primeiro a interface e depois o computador. *Observe a tensão de operação de cada aparelho!*
- Conecte o sensor de tensão (indutor) ao canal analógico A da interface, usando um cabo DIN–banana: preto e vermelho.
- Prenda o indutor ao tripé, deixando o furo central na vertical e uma altura suficiente (aproximadamente 20 cm) para que o ímã possa atravessá-lo inteiramente, conforme a Figura 1.

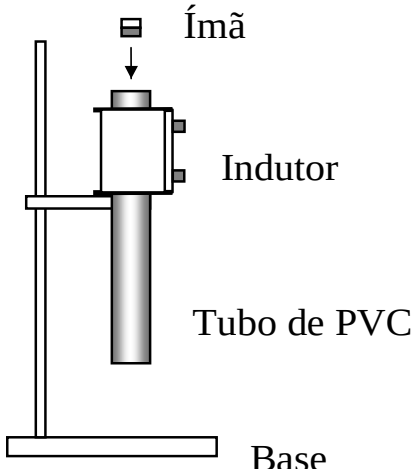



Figura 1 – Montagem do sistema para a 1ª parte.

- Conecte a outra extremidade do sensor de tensão (terminal tipo pino banana) ao indutor.
- Acione no computador o programa "*Data Studio*", clicando no ícone correspondente na área de trabalho do Windows.
- Abra o arquivo "*inducao.ds*".

- Irão surgir no monitor duas janelas: uma para o gráfico (a maior delas) e a outra que controla e opera o experimento (no alto, à esquerda).

### 6.2 AQUISIÇÃO DE DADOS (*1ª Parte*):

- Para coletar dados clique no botão "*REC*", situado no alto à esquerda, na janela que controla o experimento. Imediatamente em seguida solte o ímã de uma posição fixa, coletando os dados. *Tome cuidado para que o ímã não caia na mesa ou no chão, o que poderia estragá-lo!*
- Irá surgir na janela de gráfico um gráfico representando, em função do tempo, a diferença de potencial (ou a *força eletromotriz*) induzida no indutor, que ocorreu durante a queda do ímã.
- Com este gráfico é possível determinar a força eletromotriz máxima induzida no indutor e também o fluxo magnético Φ(t) provocado pelo ímã. Por exemplo, isto pode ser feito para os picos positivo (+) e negativo (-). Anote estes resultados na Tabela 1.
- Repita o procedimento, invertendo a posição do ímã.
- Repita o procedimento, trocando o indutor por outro com um número de espiras diferente. Para cada medida realizada: tome nota do número de espiras do indutor; meça no gráfico os valores de pico da força eletromotriz induzida no indutor (pico positivo e pico negativo); determine os fluxos magnéticos considerando os picos positivo e negativo, e a curva total, completando a Tabela 1.

TABELA 1: FORÇA ELETROMOTRIZ E FLUXO MAGNÉTICO

| **Nº de Espiras** | $\mathbf{V_+}$ **( )** | $\mathbf{V_-}$ **( )** | $\mathbf{\Phi_+}$ **( )** | $\mathbf{\Phi_-}$ **( )** | $\mathbf{\Phi_{TOTAL}=\lvert \Phi_+ - \Phi_- \rvert}$ **( )** |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

***Nesta tabela $V_+$ representa o valor máximo do pico positivo e $V_-$ o valor máximo do pico negativo. O símbolo $\Phi_+$ refere-se ao fluxo magnético calculado considerando-se apenas o pico positivo e $\Phi_-$ o fluxo calculado considerando-se o pico negativo.*

**NOTA:** Para determinar o fluxo magnético utilize diretamente a lei de Faraday:

$$\varepsilon = - N \frac{d\Phi_B}{dt} .$$

Através da integração desta expressão, obtém-se facilmente:

$$- \frac{1}{N} \int \varepsilon(t)\, dt = \int d\Phi_B = \Phi_B .$$

Com o programa "***DATA STUDIO***" é possível calcular a integral da força eletromotriz induzida. Para isso selecione inicialmente no gráfico a área a ser integrada: posicione o ponteiro no gráfico, clique o botão esquerdo, arraste o mouse até enquadrar a área e então solte o botão. A região selecionada ficará sombreada. Para determinar a integral da força eletromotriz no intervalo de tempo considerado, clique no botão **Σ** - localizado no canto esquerdo inferior. Irá surgir um botão com outro símbolo **Σ** - no alto e à direita - fornecendo as opções de cálculos estatísticos e matemáticos. Por último clique este botão e selecione a função - "*Integration*".

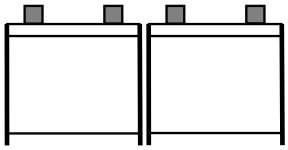
- Responda as questões da seção Análise de Dados.

### 6.3 - MONTAGEM EXPERIMENTAL (2ª *Parte*):

- Monte um circuito com um indutor conectado a uma fonte de corrente contínua.
- Monte outro circuito com um indutor ligado a um galvanômetro.
- Aproxime os dois indutores segundo a direção axial. Veja a Figura 2. Ligue e desligue a fonte. Observe se há variação no galvanômetro.
- Repita o procedimento, colocando um núcleo de ferro no indutor.
- Repita o procedimento, trocando a fonte de corrente contínua por uma de corrente alternada.
- Invés do galvanômetro, ligue uma das bobinas ao sensor de tensão conforme feito na

***1ª Parte***. É recomendável que a freqüência de amostragem ("*Sampling Options*") seja aumentada (p. ex. para 20 kHz) para obter gráficos com melhor qualidade. De agora em diante você passará a monitorar a tensão induzida com o programa *Data Studio*.

- Prepare o gerador de funções para fornecer uma onda quadrada com freqüências 10 Hz e, depois, 100 Hz.
- Clique no botão *"REC"* e observe o gráfico registrado.
- Responda a questão da seção de Análise de Dados.



Indutor 1 Indutor 2

Figura 2 – Montagem para a 2ª parte do experimento.

### 6.4 - MONTAGEM EXPERIMENTAL (3ª *Parte*):

- Sobre um suporte, fixe a barra cilíndrica preta.
- Coloque uma das três placas de alumínio para oscilar na extremidade da barra preta. Verifique se ela oscila livremente.
- Posicione o ímã no centro do pêndulo (Figura 3A).
- Suspenda a placa até uma posição horizontal e então a solte (Figura 3B).

- Observe o efeito produzido pela presença dos imãs.
- Troque a placa de alumínio por outra e repita o procedimento.
- Analise as diferenças observadas em função do tipo de placa de alumínio em questão.
- Responda a questão da seção de Análise de Dados.




FIGURA 3 (A) E (B): Montagem Experimental

## 8 ANÁLISE DE RESULTADOS:

***1ª Parte:***

1) Por que surgem dois picos para cada queda livre do ímã através do indutor?
2) Por que os picos que surgem são desiguais?
3) Qual dos picos é o maior? Tente descobrir por quê.
4) O que muda no gráfico quando a posição do ímã é invertida?
5) Para um dos casos analisados, esboce as linhas de campo magnético, o sentido da corrente elétrica induzida e a direção do movimento do imã.
6) Avalie cada situação em termos da lei de Faraday.

***2ª Parte*:**

1) Explique, para as situações analisadas, o que provocou a deflexão da agulha do galvanômetro.
2) Analise os picos registrados no computador. Por que há uma alternância de picos positivos e negativos?
3) Observe a forma dos picos. Por que a subida não é simétrica com a descida?

***3ª Parte*:**

1) Explique as diferenças observadas em função do tipo de placa de alumínio em questão, utilizando os seguintes conceitos: **a)** a geração de correntes induzidas pelo movimento relativo entre um ímã e uma bobina através da análise da variação do fluxo do campo magnético - lei de Faraday e da determinação do sentido da corrente induzida - lei de Lenz e **b)** da força magnética sobre um condutor de corrente.

**TÓPICO AVANÇADO**:

- Para uma das curvas, selecione os dados da tensão medida e transfira-os para um programa de planilha e análise de dados. Programe esta planilha de forma que seja calculado o fluxo magnético $\Phi(t)$ em todos os instantes. Faça o gráfico do fluxo calculado em função do tempo.
- Programe a planilha para calcular a posição do ímã em cada instante, supondo que seu movimento seja uma queda livre. Faça um gráfico do fluxo magnético em função da posição.

6) Analise o gráfico do fluxo magnético em função do tempo. Ele é simétrico em relação ao ponto de máximo? Explique o seu comportamento.
7) Analise o gráfico do fluxo em função da posição. Ele é simétrico? Explique este comportamento.

# ANEXO

## *PRÁTICAS EXPERIMENTAIS AVANÇADAS*

## A.I – Reatância Indutiva e Reatância Capacitiva

**1 INTRODUÇÃO:**

Nesta aula prosseguimos com o estudo dos circuitos em corrente alternada. Serão utilizados circuitos RL e RC em série. A partir de medidas de diferença de fase entre tensões e correntes, iremos determinar as reatâncias associadas aos elementos indutivo e capacitivo em diferentes freqüências.

**2 OBJETIVO:**

- Medir diferenças de fase entre duas grandezas senoidais.
- Analisar diagramas de fasores.
- Avaliar o comportamento das reatâncias em função da freqüência
- Determinar os parâmetros do circuito a partir da análise de gráficos.

**3 ROTEIRO DE ESTUDOS:**

1) Qual é o significado físico da reatância indutiva? Como ela é definida? De que forma ela varia com a freqüência?
2) Qual é o significado físico da reatância capacitiva? Como ela é definida? De que forma ela varia com a freqüência?
3) Supondo um circuito RL em série, descreva um procedimento para medir a diferença de fase entre a tensão aplicada e a corrente que nele circula.
4) Considere dois sinais oscilando com a mesma freqüência de 35 Hz. Enquanto um dos sinais atinge seu valor máximo no instante $t_1 = 0.089$ s o outro sinal só alcança seu valor máximo no instante $t_2 = 0.093$ s. Determine para este exemplo: **a)** a freqüência angular do sinal e **b)** a diferença de fase entre os sinais.
5) Considerando os diagramas de fasores para circuitos RL ou RC em série, faça uma comparação entre o triângulo das tensões e o triângulo das impedâncias. Qual grandeza tem o mesmo valor nos dois diagramas?

**3 MATERIAL UTILIZADO:**

Gerador de funções, osciloscópio, indutores (bobinas), capacitores, resistores, cabos para conexão.

**4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL:**

***Circuito RL:***

- Monte um circuito em série utilizando uma bobina de 1200 espiras e um resistor de 100 Ω.
- Alimente-o com o gerador de funções, programado para gerar ondas senoidais.
- Conecte um dos canais do osciloscópio para medir a tensão total aplicada e o outro canal para medir a tensão sobre o resistor. Observe que os “terras” das pontas de prova estejam ligados num ponto comum.
- Ajuste o gerador para produzir uma tensão com freqüência aproximada de 400 Hz.

- Visualizando as duas tensões na tela do osciloscópio determine, com ajuda dos cursores, a diferença de fase entre as tensões (lembre que um período T corresponde a 360°, logo o intervalo Δt medido corresponde à diferença de fase).
- Mude a freqüência da fonte em passos de 200 Hz, até 2000 Hz, repetindo as medidas dos passos anteriores. Organize os resultados numa tabela.

***Circuito RC:***

- Monte um circuito em série utilizando um capacitor de 0,1 μF e um resistor de 5 kΩ.
- Alimente-o com o gerador de funções, programado para gerar ondas senoidais.
- Conecte os canais do osciloscópio da mesma forma que no circuito RL.
- Ajuste o gerador para produzir uma tensão com freqüência aproximada de 200 Hz.
- Faça medidas da diferença de fase entre a tensão total e a tensão sobre o resistor.
- Mude a freqüência da fonte em passos de 100 Hz, até 1000 Hz, repetindo as medidas dos passos anteriores.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS:

***Circuito RL:***

- Fazendo uma analogia entre o diagrama de fasores das tensões ($V_T$, $V_R$ e $V_L$) e o diagrama de fasores das impedâncias ($Z$, $R$ e $X_L$), determine a reatância indutiva $X_L$ para cada freqüência aplicada. Considere conhecido o valor do resistor. É necessário levar em conta a resistência da bobina? Em caso afirmativo meça-a com o ohmímetro.
- Que forma de curva você espera obter para o gráfico de $X_L$ em função de $f$?
- Faça este gráfico e ajuste uma equação usando um programa de computador.
- Qual o significado físico dos coeficientes desta curva?
- Compare os resultados obtidos com os valores dos componentes do circuito.
- O comportamento da reatância indutiva em função da freqüência é condizente com a teoria?

***Circuito RC:***

- Fazendo uma analogia entre o diagrama de fasores das tensões ($V_T$, $V_R$ e $V_C$) e o diagrama de fasores das impedâncias ($Z$, $R$ e $X_C$), determine a reatância capacitiva $X_C$ para cada freqüência aplicada. Considere conhecido o valor do resistor. É necessário levar em conta a resistência do capacitor?
- Que forma de curva você espera obter para o gráfico de $X_C$ em função de $f$?
- Faça este gráfico e ajuste uma equação para ele usando um programa de computador. É necessário linearizar o gráfico?
- Qual o significado físico dos coeficientes desta curva?
- Compare os resultados obtidos com os valores dos componentes do circuito.
- O comportamento da reatância capacitiva em função da freqüência é condizente com a teoria?

# A.II – Medida da Indução Magnética em Imãs e Bobinas

## 1 INTRODUÇÃO:

Nesta aula vamos utilizar o efeito Hall para determinar a indução magnética em imãs e em bobinas percorridas por correntes elétricas. Vamos determinar como variam espacialmente os três componentes da indução magnética produzida por um ímã, bem como a sua variação em função da distância ao imã. Também será feito um estudo da configuração do campo produzido por uma bobina com centenas de espiras. Neste caso será avaliada a dependência entre a indução e a intensidade da corrente que circula pela bobina.

## 2 ROTEIRO DE ESTUDO:

1) O que vem a ser o efeito Hall?
2) Como ele pode ser usado para medir o vetor indução magnética?
3) Faça um desenho esquemático da direção da indução magnética produzida por um imã, utilizando a geometria em forma de disco fornecida na experiência.
4) Quais as unidades mais usadas para expressar a indução magnética?
5) De que forma a indução magnética no centro de uma bobina varia em função da corrente que por ela circula?
6) Qual é a equação para a indução magnética em pontos sobre o eixo de uma bobina?

## 3 MATERIAL NECESSÁRIO:

Imãs, computador com interface e programa *Science Workshop*, sensor de indução magnética por efeito Hall, bobinas de 1200 espiras e outros valores, fonte de corrente contínua, amperímetro, papel milimetrado.

## 4 PREPARAÇÃO DO SENSOR E DO COMPUTADOR:

- Ligue a interface antes que o computador.
- Conecte o sensor a uma das entradas analógicas da interface (p. ex., no canal A).
- Na área de trabalho do Windows, inicie o programa Science Workshop clicando no ícone correspondente.
- Arraste o ícone do conector analógico (tipo DIN) sobre o ícone do canal A.
- Na janela *Experiment Setup*, selecione *Magnetic Field* sensor. Surgirá um ícone com o símbolo de ímã em forma de "U".
- Arraste o ícone de medidor digital sobre o ícone do canal A.
- Escolha: *Streght* (para medir em gauss) ou
  *Field strenght* (para medir em tesla).
- No menu Experiment, selecione *Setup Window*.
- Para medir: clique em MON.
- Para parar: clique em STOP.

**OBSERVAÇÕES:**

⇨ Antes de iniciar a medidas, deixar o sistema ligado por 2 minutos ou mais, para que o conjunto atinja o equilíbrio térmico.

⇨ Antes de iniciar as medidas, deixar o sensor afastado de fontes de campo magnético e zerá-lo, pressionando o botão sobre a caixa do sensor.

⇨ Para alterar o número de algarismos significativos, clique sobre a janela do medidor (mostrador numérico), e escolha o número de algarismos à esquerda e à direita do ponto decimal.

## 5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE:

- Coloque um ímã sobre o papel milimetrado, colando-o se necessário. Faça medidas da indução magnética em diversos pontos na sua vizinhança, com coordenadas conhecidas. Tente obter os três componentes do vetor indução magnética.
  Lembre-se que em cada posição você pode medir somente duas componentes usando o sensor fornecido.

- Plote, em escala, o vetor indução magnética em alguns pontos do plano do papel, para esboçar a configuração das linhas de campo.
- Ligue uma bobina de centenas de espiras à fonte de corrente contínua e ajuste uma corrente menor que a máxima permitida pela bobina.
- Coloque o sensor numa posição central sobre o eixo da bobina. Para diferentes valores da *intensidade de corrente* que circula pela bobina, meça a *indução*. Faça um gráfico relacionando essas duas grandezas.
- Ajuste uma curva a este gráfico. Interprete os seus coeficientes.
- Para um dado valor de corrente, inverta os terminais ligados à fonte, provocando a inversão no sentido da corrente. Observe, pela leitura do medidor,o que acontece com o sentido do campo magnético.

- Varie a posição do sensor no interior da bobina e faça um mapeamento das três componentes do campo magnético, tanto na região interna quanto na região externa da bobina. Não é necessário fazer medidas muito próximas, mas devem ser avaliadas quais as melhores regiões a serem medidas.

- Varie a posição do sensor ao longo do eixo da bobina (interior e exterior) e meça a componente axial da indução magnética. Com isso você pode estudar como a indução varia com a posição.
- Faça um gráfico da indução em função da posição. Represente no mesmo gráfico a curva teórica e compare.

# A.III – Transformadores, Geradores e Motores

## 1 INTRODUÇÃO:

Nesta aula vamos analisar a aplicação das leis de Ampère, de Faraday e de Lenz no estudo de transformadores, motores e geradores de corrente alternada e estudar os efeitos da ação dos campos magnéticos sobre os materiais.

## 2 OBJETIVOS:

- Analisar o funcionamento de transformadores.
- Estudar o efeito de núcleos de ferro sobre as relações de transformação em transformadores de tensão.
- Compreender o funcionamento de motores.
- Compreender o funcionamento de geradores de corrente alternada.

## 3 MATERIAL UTILIZADO:

Fonte de corrente contínua, indutores (bobinas), núcleo de ferro, multímetro, osciloscópio, gerador de sinais, cabos para conexão, motor, gerador e capacitores.

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE:

- Utilizando bobinas com diferente número de espiras e núcleos de ferro, monte transformadores (elevadores e rebaixadores). Use o gerador de sinais para alimentar a bobina primária com tensão senoidal.
- Conecte os canais do osciloscópio para monitorar a tensão aplicada no primário e obtida no secundário
- Inicialmente iremos determinar a relação de transformação quando não há nenhum componente ligado ao circuito secundário (diz-se que o transformador está funcionando a vazio). Programe a fonte para fornecer tensão senoidal de aproximadamente 100 Hz e determinada amplitude. Meça, com o osciloscópio, a amplitude da tensão no primário e no secundário, anotando-as.
- Repita a etapa anterior para diferentes tensões aplicadas no primário.
- Faça um gráfico da tensão no secundário em função da tensão no primário. Ajuste uma curva aos pontos experimentais. Qual o significado físico dos coeficientes deste gráfico?
- Compare a relação de transformação obtida experimentalmente com o valor teórico esperado.
- Ligue um resistor à bobina secundária. Aplique diferentes tensões ao primário, medindo o seu valor, bem como o da tensão induzida no secundário.
- Faça um gráfico da tensão no secundário em função da tensão no primário. Ele é semelhante ao gráfico anterior? A relação de transformação se mantém constante? Explique este comportamento. Compare com o valor nominal.

- Nesta etapa a amplitude da tensão primária será mantida constante. Iremos averiguar a influência da sua freqüência. A freqüência do gerador deverá ser variada desde alguns hertz até alguns kHz. Para cada freqüência meça a amplitude das tensões no primário e no secundário. Aproveite também para observar a forma

de onda obtida no secundário. Para cada ponto medido calcule a relação entre as amplitudes (relação de transformação).

- Faça um gráfico da relação de transformação determinada experimentalmente em função da freqüência. A relação de transformação se mantém constante à medida que a freqüência aumenta? Em caso negativo, explique por quê. O que ocorre com a forma de onda da tensão induzida no secundário à medida que a freqüência aumenta?
- Varie a forma de onda da tensão aplicada. O que ocorre com a forma da tensão induzida no secundário?
- Utilizando sistemas de grande diferença entre o número de espiras no primário e no secundário, avalie as possibilidades de produzir altas correntes e altas tensões.
- Discuta sobre as potências no primário e no secundário dos transformadores.
- Por que o núcleo dos transformadores são feitos de chapas metálicas isoladas uma das outras, invés de maciços?

- Utilizando o sistema motor-gerador reversível, analise a forma de onda produzida, a questão de armazenamento de energia em um capacitor carregado pelo gerador e a utilização do gerador como motor e vice-versa. Discuta os princípios físicos que regem esses processos.

- Utilizando um motor elétrico simples, verifique o seu princípio de funcionamento.

# A.IV – Ciclo de Histerese em Materiais Ferromagnéticos. Representação no Osciloscópio.

## 1 INTRODUÇÃO:

Num material não magnetizado, os dipolos magnéticos elementares apresentam uma orientação aleatória no espaço, tal que o efeito magnético global é nulo. Quando este material é submetido a um campo magnético externo, seus dipolos tendem a se orientar de acordo com o campo. Há então uma superposição do campo magnético externo com o dos dipolos. Num material classificado como ferromagnético, este alinhamento ocorre de forma significativa, devido principalmente a um efeito quântico relacionado com a interação entre átomos vizinhos (acoplamento de troca).

Iremos considerar as grandezas: intensidade de campo magnético **H** (medida em ampère por metro no SI) e indução magnética **B** (medida em tesla no SI). Para materiais ferromagnéticos a relação entre **B** e **H** não é linear.

A Figura 1 mostra um gráfico da indução *B* em função da intensidade do campo magnético *H*, para um material ferromagnético. Nela observamos a curva de magnetização e um ciclo de histerese.

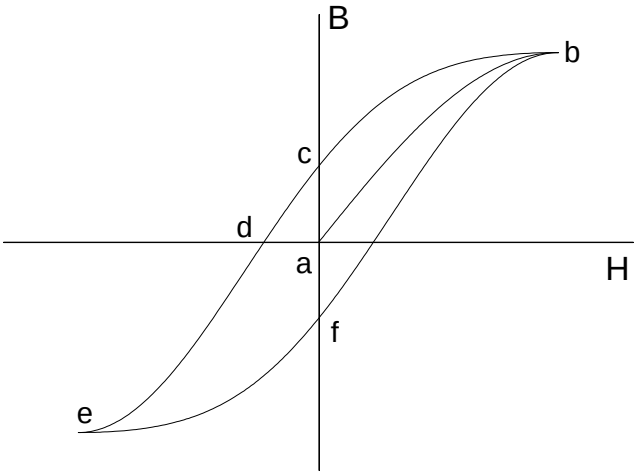



FIGURA 1 – Ciclo de histerese magnética

- No ponto “a” o material está desmagnetizado.
- Aumenta-se H até atingir o ponto “b”.
- Reduzindo-se H até o valor nulo (ponto “c”), o material ainda apresenta uma magnetização residual $B_r$.
- Inverte-se o sentido de H e aumenta-se o seu valor, passando pelo ponto “d” (este valor de H é chamado de campo coercitivo $H_c$), até atingir o ponto “e”.
- Reduzindo-se H até atingir o valor nulo (ponto “f”), o material também apresenta uma magnetização residual.
- Inverte-se novamente o sentido de H e aumenta-se o seu valor até atingir novamente o ponto “b”.

- Se este processo for realizado periodicamente e várias vezes por segundo, podemos visualizar o gráfico de forma estável na tela de um osciloscópio, usando-

o no modo XY, onde o canal horizontal estará relacionado com a intensidade de campo H e o canal vertical à indução B.

**2- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE:**

Iremos analisar o comportamento de um núcleo de transformador constituído de um material ferromagnético (chapas de aço-silício). Para isso deve ser montado o circuito da Figura 2:

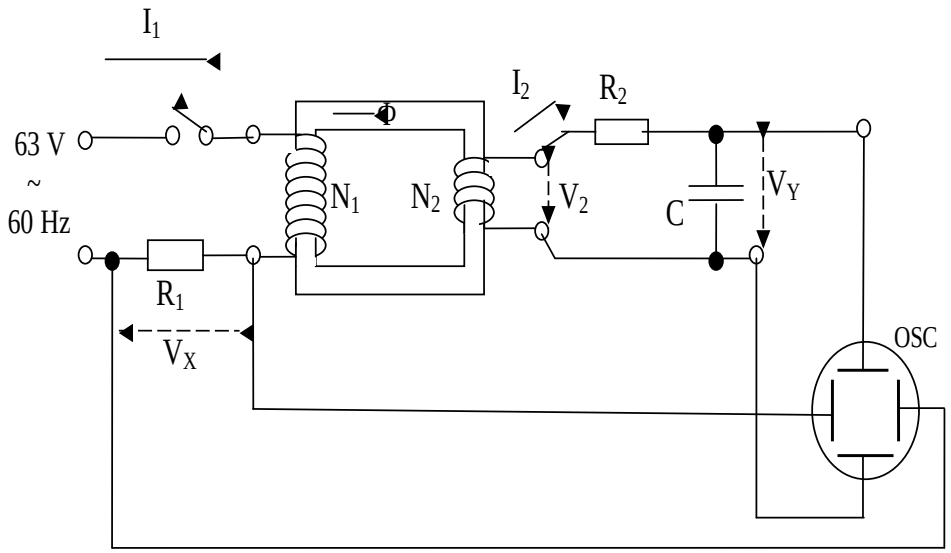



FIGURA 2 – Montagem utilizada para observar o ciclo de histerese no osciloscópio.

Podem ser usados os seguintes elementos, por exemplo:

$N_1$ = 600 espiras $N_2$ = 300 espiras $R_1$ = 16 a 300 Ω R = 10 kΩ C = 2 × 680 nF

- Determine a área da secção transversal do núcleo: S = _____

**ATENÇÃO:** Como estaremos alimentando o circuito a partir da rede de energia, não toque nos terminais ou modifique as conexões com a chave ligada. **Antes de ligar o interruptor certifique-se que as bobinas estejam colocadas adequadamente no núcleo e que este esteja montado na forma fechada, caso contrário a corrente será muito alta e provocará o aquecimento e a queima das bobinas.**

A bobina 1 cria um campo magnético com intensidade $H = \mu_0 N_1 I_1$ . O resistor $R_1$ é utilizado para fornecer uma diferença de potencial proporcional à corrente $I_1$. ($V_X = R_1 I_1$).

➔ *Mostre que* $V_X \propto H$ *e obtenha a constante de proporcionalidade* "A" *tal que* $V_X = A H$.

O fluxo magnético $\phi$ através do núcleo pode ser expresso por $\phi = B \cdot S$, onde S é a área da seção transversal do núcleo. Isto significa que se for possível medir $\phi$, e conhecendo-se a área S, teremos uma informação sobre a indução B.

A bobina 2 é usada como sensor. A f.e.m. nela induzida é proporcional à taxa de variação do fluxo magnético $\phi$. Conforme a lei de Faraday, $V_2 = -N_2 \, d\phi/dt$.
➔ *Obtenha a constante de proporcionalidade* "D" *para a relação* $V_2 = D \, dB/dt$.

Mas, para o eixo vertical, precisamos da indução B !! E só dispomos de dB/dt. Será necessário integrar este sinal elétrico antes de levá-lo ao osciloscópio.

O circuito ligado à bobina 2, ilustrado na Figura 3,

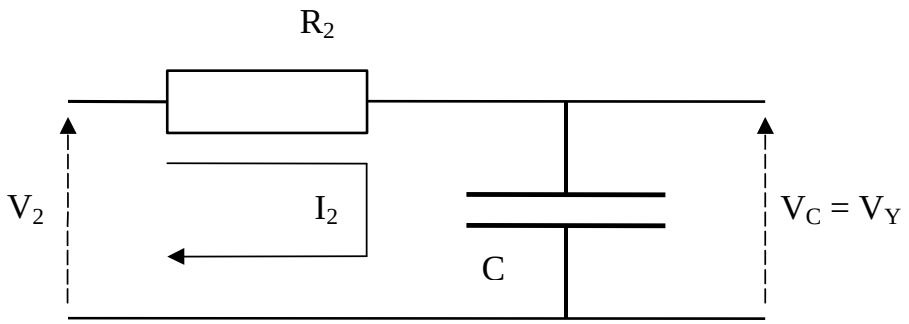



FIGURA 3 – Circuito RC atuando como integrador analógico.

atua como um integrador analógico. Supondo que o osciloscópio não absorva corrente, a corrente $I_2$ circula pelo resistor $R_2$ e pelo capacitor C. Temos ainda que $V_Y = V_C$ .
➔ *Considerando que* $I = dq/dt$ *e* $dq = C \, dV$ *no capacitor, integre e mostre que*

$V_C = (1/C) \int I_2 \, dt$.

➔ *Fazendo* $I_2 = V_2/R$, *mostre que* $V_Y \propto B$ *e determine a constante de proporcionalidade* "E" *tal que* $V_Y = E B$. Sugestão: use $V_2$ obtido nos passos anteriores.

Como conclusão temos: $V_X = A H$ e $V_Y = E B$, onde as constantes "A" e "E" são os fatores de escala.

**3 VERIFICAÇÃO:**

- Verifique a forma da curva de histerese para núcleos de materiais diferentes (diferentes fabricantes).
- Determine o valor da magnetização residual e da força coercitiva. Utilize os fatores de escala para converter as leituras no osciloscópio para as unidades adequadas.

## 4 APLICAÇÃO PRÁTICA:

Análise da qualidade de materiais ferromagnéticos.

A área no interior da curva de histerese está relacionada com a energia necessária para a magnetização do material. Quanto mais estreita for a curva, menor será a energia necessária e melhor será a qualidade do material.