

**TEXTOS DE LABORATÓRIO
FÍSICA 3 ELETRICIDADE E MAGNETISMO**

Ponta Grossa, Paraná

2013

CONTEÚDO

APRESENTAÇÃO	i
EXPERIMENTO 1: MEDIDAS ELÉTRICAS.....	1
EXPERIMENTO 2: ASSOCIAÇÃO DE RESISTORES E A LEI DE OHM.....	9
EXPERIMENTO 3: CIRCUITOS DE CORRENTE CONTÍNUA	17
EXPERIMENTO 4: SUPERFÍCIES EQUIPOTENCIAIS.....	22
EXPERIMENTO 5: CIRCUITO RC	29
EXPERIMENTO 6: OSCILOSCÓPIO DIGITAL – MEDIDAS ELÉTRICAS	39
EXPERIMENTO 7: OSCILOSCÓPIO DIGITAL – CIRCUITO RC	53
EXPERIMENTO 8: OSCILOSCÓPIO DIGITAL – FIGURAS DE LISSAJOUS..	60
EXPERIMENTO 9: OSCILOSCÓPIO DIGITAL – AUTO-INDUTÂNCIA E CIRCUITO RL.....	66
EXPERIMENTO 10: MEDIDAS DA COMPONENTE HORIZONTAL DO CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE.....	77
EXPERIMENTO 11: DEMONSTRAÇÕES SOBRE ELETROMAGNETISMO...	81
APÊNDICE A: TEORIA DOS ERROS.....	96
BIBLIOGRAFIA	112

APRESENTAÇÃO

Esta apostila é destinada para estudantes dos laboratórios dos Cursos de Física 3. Ela foi elaborada para que o aluno menos preparado possa, ao lê-la, assimilar o conteúdo das matérias e, conseqüentemente, provocar o interesse pelo curso. Nela estão incluídos os roteiros com uma breve descrição teórica dos experimentos a serem desenvolvidos durante o curso, folhas de dados para preenchimento de medidas e cálculos, além de uma introdução à Teoria dos Erros, na qual são apresentados conceitos básicos e essenciais desta teoria. Esta apostila tem como objetivo ensinar aos estudantes a prática e os métodos de medidas diretas e indiretas em Eletricidade e Magnetismo, dando-lhes segurança no que devem entender por medir grandezas físicas. Os experimentos aqui propostos não são todos originais (alguns retirados na íntegra de livros, manuais e apostilas), porém foram selecionados para maior compreensão de cada fenômeno físico envolvido nos experimentos. Para total compreensão do experimento realizado é de suma importância que o estudante recorra à bibliografia relacionada no final desta apostila.



Prof^a Dr^a Daniele Toniolo Dias – 10/2013

(danieletdias@utfpr.edu.br)

EXPERIMENTO 1: MEDIDAS ELÉTRICAS

1.1 OBJETIVOS

Familiarização com instrumentos de medidas e circuitos eléctricos.

Utilização do multímetro nas funções: voltímetro, amperímetro e ohmímetro.

Avaliação dos erros em medidas

1.2 INTRODUÇÃO

Quase todas as experiências de eletricidade, envolvem montagem de circuito e medidas de tensões e de correntes eléctricas. Por essa razão, é importante que familiarizemos com os aparatos que permitam medir estas grandezas eléctricas. Esses aparatos instrumentos são:

i. Matriz de pontos (Protoboard)

A Matriz de Pontos (nome genérico) ou Protoboard (marca registrada) consiste de pontos ligados internamente possibilitando a montagem de componentes e circuitos integrados sem que seja necessário usar solda.

Os barramentos verticais, em geral, são usados para alimentação (+Vcc, GND e -Vcc). Na Figura 1-1 se pode verificar como é a configuração das trilhas do Protoboard e os bornes para conexão da alimentação. Observe também que o borne de cor preta está conectado ao terra, ou seja, possui ligação com a carcaça.

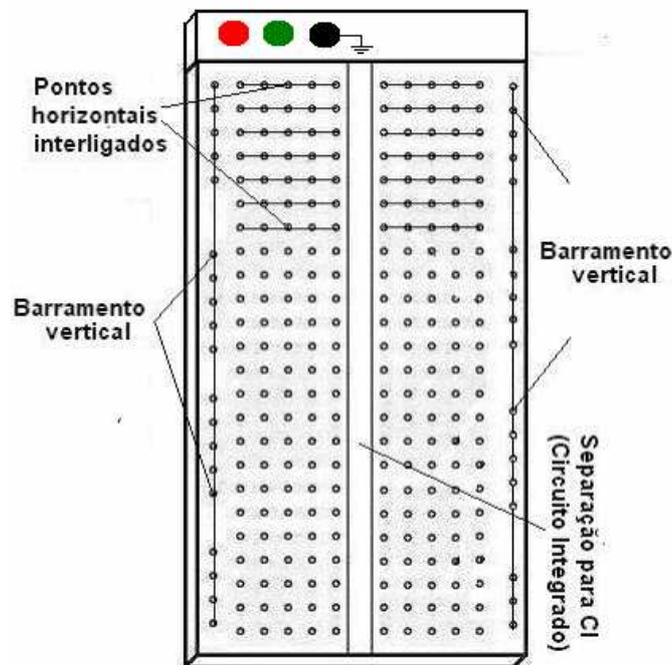


Figura 1-1: Matriz de Pontos (Protoboard)

ii. Multímetro

Os dispositivos que medem corrente, diferença de potencial e resistência são chamados de amperímetros, voltímetros e ohmímetros respectivamente. Muitas vezes os três medidores estão incluídos em um único instrumento denominado *multímetro* (Figura 1-2) que pode ser selecionado para ser usado como um ou como outro.

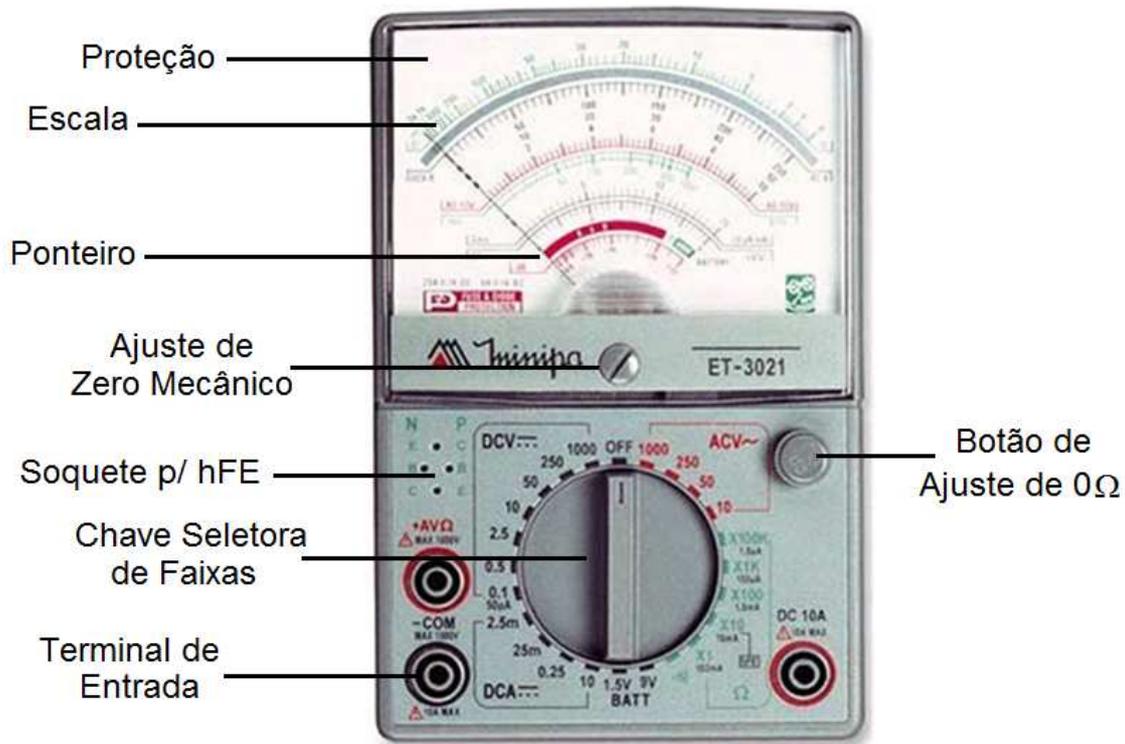


Figura 1-2 Multímetro analógico

Para usar um multímetro:

- Use a chave de seleção de função para escolher a escala e o tipo de grandeza (Tensão CC ou AC, Corrente CC, Resistência) a ser medida; tensão, corrente, resistência.
- Quando não estiver usando o multímetro deixe a chave na posição OFF (desligado).
- Em hipótese nenhuma ligue o instrumento a uma tensão quando a escala de corrente estiver selecionada.

Bornes de Entrada: São os terminais através dos quais conectamos o instrumento ao circuito ou componente. Existem três bornes no seu instrumento:

- COM: Terminal comum ou negativo (no caso de medida que tenha polaridade).
- AVΩ: Terminal para medir tensão, resistência, corrente. É o terminal positivo (no caso de medida de corrente e tensão).
- 10(A): Terminal para medir corrente CC até 10(A). É o terminal positivo.

ii.1. Multímetro – Função Amperímetro

Um amperímetro funciona baseado na indução magnética que a passagem de corrente ocasiona sobre determinado sensor, denominado galvanômetro.

Em amperímetros analógicos o galvanômetro pode ser implementado como uma bobina sob a influência de um ímã permanente. Deixando a bobina livre para girar em torno de um eixo, pode-se determinar a corrente que o atravessa, pela deflexão angular que ela sofre.

Em amperímetros digitais, o galvanômetro é um circuito eletrônico que compara o valor de corrente medido com um valor de corrente pré-determinado gerado pelo próprio aparelho.

A Figura 1-3(a) mostra a configuração básica de um amperímetro. A resistência R_A tem como função desviar a corrente que passa pelo galvanômetro. Isto porque os galvanômetros têm um limite de corrente máxima que quando ultrapassado os danificam e os tornam inutilizáveis. Desta maneira, para se medir valores de correntes cada vez mais elevadas o valor de R_A deve ser cada vez mais baixo. Ou seja, quanto menor a escala do amperímetro menor será o valor da resistência R_A , pois maior parcela da corrente poderá atravessar o galvanômetro. Com princípio de funcionamento em mente, para medir a corrente em um resistor em um circuito simples, você coloca um amperímetro em série com o resistor (**se colocado em paralelo introduzirá um curto-circuito**), para que a corrente seja a mesma no amperímetro e no resistor. A Figura 1-3(b) mostra a ligação correta de um amperímetro num circuito. Como o amperímetro tem uma resistência muito baixa (mas finita), a corrente no circuito diminui muito pouco quando o amperímetro é inserido. Idealmente, o amperímetro deveria ter uma resistência insignificante para que a corrente a ser medida fosse afetada de maneira desprezível.

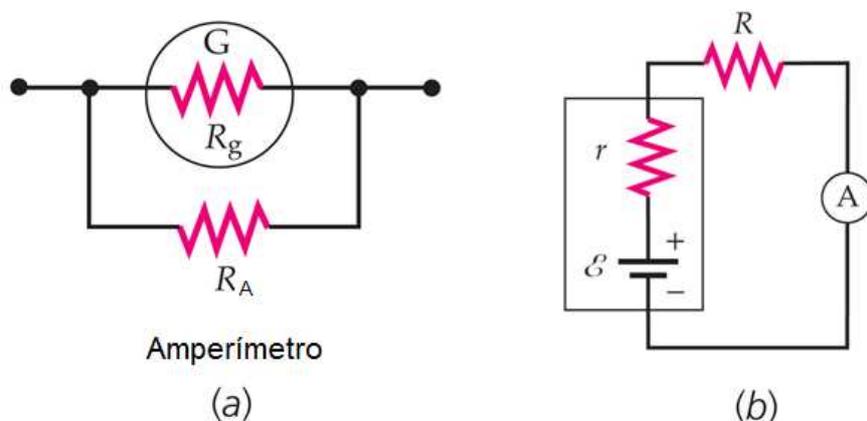


Figura 1-3: (a) Configuração básica de um amperímetro. (b) Para medir a corrente em um resistor R , um amperímetro A é colocado em série com o resistor.

ii.2. Multímetro – Função Voltímetro

A configuração básica de um voltímetro é mostrada na Figura 1-4(a). Sabendo-se a resistência equivalente desse circuito pode-se determinar qual é o valor da queda de tensão no mesmo. Quanto maior a tensão a ser medida maior será o valor de R_v .

A diferença de potencial em um resistor é medida colocando-se um voltímetro no resistor, em paralelo com ele, como mostrado na Figura 1-4(b), para que a queda de potencial seja a mesma no voltímetro e no resistor. O voltímetro reduz a resistência entre os pontos a e b, aumentando, assim, a corrente total no circuito e variando a queda de potencial no resistor. O voltímetro deve ter uma resistência extremamente elevada para que seu efeito na corrente do circuito seja desprezível.

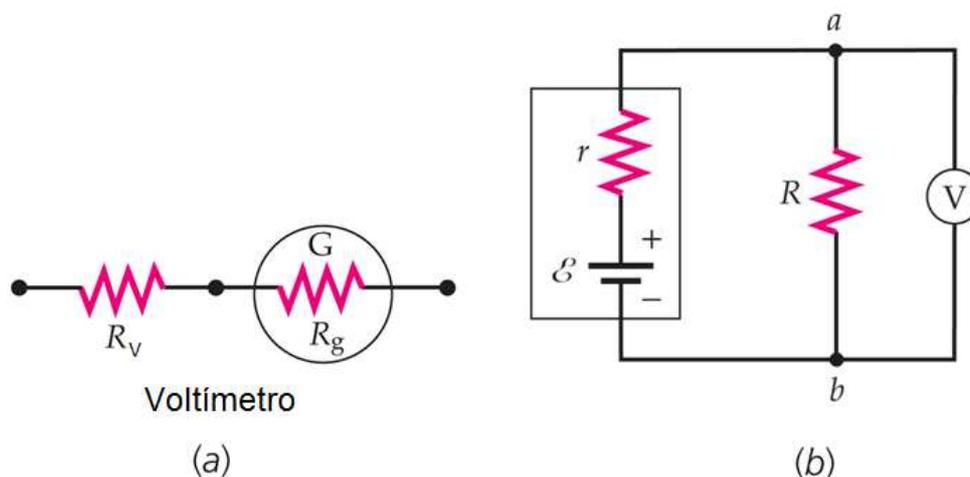


Figura 1-4: (a) Configuração básica de um voltímetro. (b) Para medir a queda de potencial em um resistor, um voltímetro V é colocado em paralelo com o resistor.

CUIDADOS NA MEDIÇÃO DE CORRENTE E TENSÃO

ATENÇÃO: LEIA ACIMA COMO INSERIR O AMPERÍMETRO E O VOLTÍMETRO NO CIRCUITO. A ESCALA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO OU CORRENTE DO MULTÍMETRO NÃO DEVE SER MENOR DO QUE A GRANDEZA A SER MEDIDA, POIS ISSO ACARRETARÁ EM DANOS AO GALVANÔMETRO DO APARELHO. ASSIM, DEVE-SE COMEÇAR A MEDIÇÃO COM A SELEÇÃO DA MAIOR ESCALA DE LEITURA POSSÍVEL E DIMINUI-LA À MEDIDA QUE O VALOR MEDIDO ASSIM O PERMITIR.

NÃO GIRE A CHAVÉ SELETORA DE FAIXAS DO MULTÍMETRO QUANDO O MESMO ESTIVER CONECTADO AO CIRCUITO, ENTRE MEDIDAS SEMPRE DESLIGUE A ALIMENTAÇÃO E O DESCONECTE.

ii.3. Multímetro – Função Ohmímetro.

O princípio de funcionamento de um ohmímetro é mostrado na Figura 1-5(a). A resistência eléctrica do elemento resistivo é determinada a partir da lei de ohm. Quanto maior a escala de resistência, maior é a tensão \mathcal{E}_i .

Para se efetuar medida com o ohmímetro, deve-se desconectar o elemento que se quer medir do restante do circuito, como mostra a Figura 1-5(b). Caso isto não seja feito, a resistência medida pode ser o resultado de uma associação de resistores e não do resistor que se deseja medir.

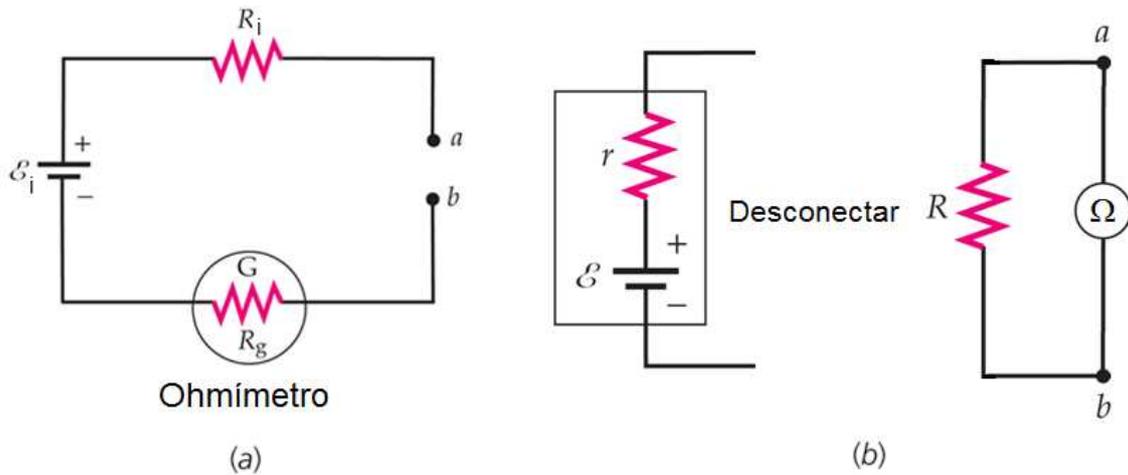


Figura 1-5: (a) Princípio de funcionamento do ohmímetro. (b) Para medir a resistência de um resistor deve-se desconectá-lo do circuito em questão.

Em ohmímetros analógicos, uma escala pode ser determinada conforme se segue. Se um curto-circuito for atribuído aos terminais do ohmímetro, a resistência R_i é escolhida de maneira que $R_{ab} = 0\Omega$, situação de corrente máxima, para ajuste do zero da escala. Isto se consegue juntando-se as pontas de provas e colocando o controle Ω ADJ até que o ponteiro fique exatamente sobre o zero da extrema direita (veja Figura 1-6). Se os terminais estiverem em circuito aberto, implicará que $R_{ab} = \infty$, e a corrente é nula. Representando estes valores extremos de resistência em uma escala, percebe-se que a mesma é inversa. Após o ajuste de zero da escala, colocam-se as pontas de provas aos terminais de um resistor o valor da resistência R é lido diretamente na escala, como mostrado na Figura 1-6, pois a corrente no galvanômetro depende de R . Exemplo: Se a chave seletora está na posição $\times 10$ e o ponteiro indica 10 na escala, como mostra a Figura 1-6, então o valor da resistência é de 100Ω .

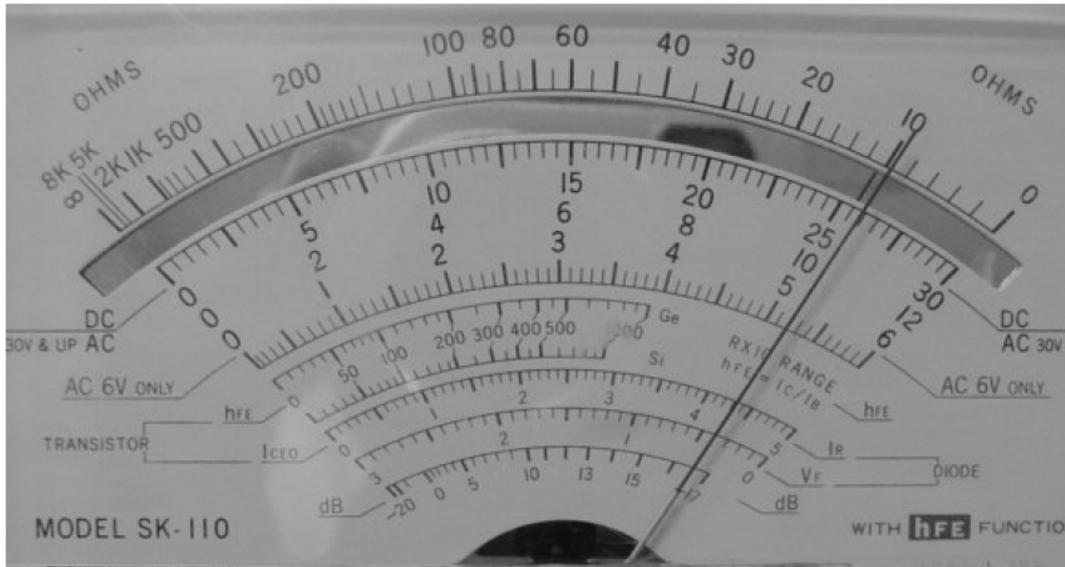


Figura 1-6: Multímetro na medida de resistência

CUIDADOS NA MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIAS

ATENÇÃO:

- A) UM OHMÍMETRO NUNCA DEVE SER USADO PARA A MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIAS ONDE EXISTE TENSÃO, OU SEJA, NO CASO DE MEDIR RESISTÊNCIAS QUE FAZEM PARTE DE UM CIRCUITO ESTE DEVE SER DESLIGADO E DESCARREGADO.
- B) O OHMÍMETRO TEM UMA FONTE DE TENSÃO NELE INCORPORADA, PORTANTO, É NECESSÁRIO CERTIFICAR-SE QUE ESTA TENSÃO NÃO DANIFICA O OBJETO QUE ESTÁ SENDO MEDIDO;
- C) DEVE-SE REALIZAR O AJUSTE DO ZERO DO OHMÍMETRO ANALÓGICO;
- D) NÃO SE DEVE TOCAR COM AS MÃOS OS TERMINAIS DO COMPONENTE PARA NÃO COLOCAR EM DERIVAÇÃO A RESISTÊNCIA DO PRÓPRIO CORPO.

1.3 MATERIAIS

- Protoboard
- Resistores com código de cores ($R_1= 3,6 \cdot 10^3 \Omega$, $R_2=82 \Omega$, $R_3=390 \Omega$)
- Multímetro Analógico (Ohmímetro, Amperímetro)
- Multímetro Digital (Voltímetro)
- Fonte de Alimentação de Corrente Contínua
- Cabos (2 banana/jacaré, 1 banana/banana verm.) e 2 Pontas de Prova

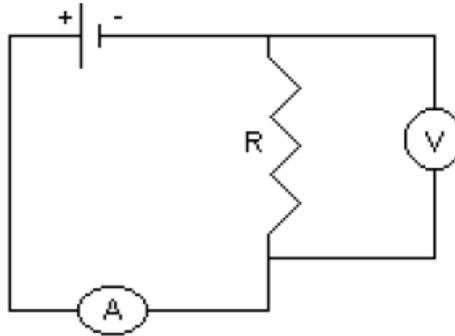
1.4 MEDIDAS

Procedimento 1 – Medida de resistência

1. Determine o valor da resistência $R_{\text{teórico}}$ de três resistores diferentes, através do código de cores (na bancada), preenchendo a tabela da folha de dados.
2. Com o auxílio do multímetro analógico meça a resistência utilizando o ohmímetro (Atenção aos cuidados básicos na utilização do medidor no subitem ii.3), através dos seguinte passos:
3. Conecte a ponta de prova vermelha no terminal $+AV\Omega$ e a ponta preta no terminal $-COM$.
4. Selecione a chave rotativa para a faixa de resistência desejada (faixas Ω verde), conforme o valor nominal das resistências. NOTA: Para se realizar melhor precisão nas medidas, a leitura deve ser realizada próxima do centro da escala (maior deflexão do ponteiro), sempre que possível.
5. Encoste uma ponta de prova na outra (se for cabo jacaré prenda um ao outro) e ajuste o ZERO à direita (na escala Ω verde, ver subitem ii.3). Efetue este procedimento sempre que selecionar nova faixa de medida de resistência.
6. Com os resistores fora de qualquer circuito de alimentação encoste as pontas de prova (ou prenda os jacarés) aos pontos a serem medidos.
7. Anote o valor mostrado na escala não linear Ω **verde**. Não se esqueça de multiplicar o valor lido pelo fator de multiplicação da escala.
8. FAÇA isso em pelo menos 2 faixas de medidas diferentes (R_{medida1} e R_{medida2}), respeitado o maior fundo de escala do ohmímetro que está sendo utilizado.
9. Transfira corretamente os valores lidos para a folha de dados: escala utilizada, algarismos significativos em cada escala, quantidade de dígitos após a vírgula em cada escala. Compare com os valores obtidos anteriormente: Os valores encontrados através do código de cores e os valores medidos com o ohmímetro (multímetro) estão dentro do intervalo de tolerância do resistor ($\Delta R/R_{\text{teórico}}$)?

Procedimento 2 – Medidas de tensão e corrente contínua

10. Monte agora o circuito da figura abaixo: (utilize o multímetro analógico como amperímetro e o digital como voltímetro). Atenção aos cuidados básicos na utilização dos medidores (subitens ii.1 e ii.2). **Sempre desligue ou desconecte a alimentação do circuito para conectar e desconectar o multímetro.**



11. O amperímetro deve estar conectado em série com a fonte de alimentação e o resistor de maior resistência, através dos terminais +AVΩ (vermelho) e –COM (preto). **Advertências: Nunca aplique tensão aos terminais de entrada do multímetro quando selecionar através da chave rotativa a faixa de corrente. Observe a polaridade do sinal, pois o ponteiro pode ser danificado se defletir no sentido contrário.** Selecione a chave rotativa para a faixa de corrente desejada em faixas DCA (Se a magnitude do sinal não é conhecida, selecione a maior faixa e então reduza até obter leitura satisfatória). Lembre-se para uma melhor precisão nas medidas a leitura deve ser realizada na metade superior da escala, sempre que possível.
12. Após conectar o amperímetro e o professor conferir, alimente o circuito com 2V na fonte de alimentação e faça a leitura do valor da corrente I, na escala linear DCV.A **preta**. Não se esqueça de usar os fatores de multiplicação ou divisão adequados para cada faixa de medida utilizada. Por exemplo, caso a faixa de medida de 2.5 mA DC seja utilizada, efetue a leitura na escala de 0~250 e divida o valor por 100 (para a escala ser de 0~2.5) e neste caso anote a unidade em mA (x10⁻³ A). Avalie o erro ΔI (conforme Apêndice A).
13. O voltímetro deve estar conectado em paralelo com o resistor indicado pelo professor, através dos terminais +VΩ (vermelho) e –COM (preto). **Advertência: Observe a polaridade do sinal para uma leitura positiva.** Selecione a chave rotativa para a faixa de tensão desejada em faixas V_ (Se a magnitude do sinal não é conhecida, selecione a maior faixa e então reduza até obter leitura satisfatória). Encoste as pontas de prova aos pontos a serem medidos. Avalie o erro ΔV.
14. Sabendo que, V=RI (onde V=tensão, R=resistência e I=corrente) calcule o valor da resistência R_{calculado} e através de propagação de erros o seu erro ΔR_{calculado}.

$$\Delta R_{calculado} = \left| \frac{dR}{dV} \right| \Delta V + \left| \frac{dR}{dI} \right| \Delta I$$

EXPERIMENTO 2: ASSOCIAÇÃO DE RESISTORES E A LEI DE OHM

2.1 OBJETIVOS

Ler o valor nominal de cada resistor através do código de cores.

Medir as resistências equivalentes das associações

Verificar a Lei de Ohm para resistores.

2.2 INTRODUÇÃO

A resistência elétrica de um circuito é a razão entre a diferença de potencial (d.d.p.), V , aplicada aos seus extremos e a corrente, I , que a percorre (Figura 2-1), então:

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

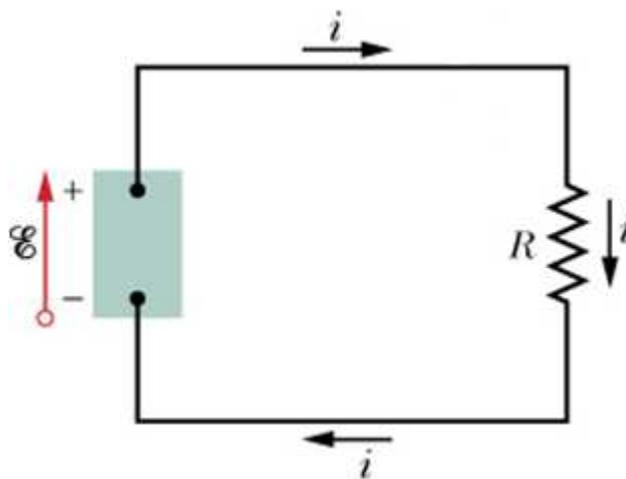


Figura 2-1: Um circuito elétrico simples, no qual uma fonte de força eletromotriz ε realiza trabalho sobre portadores de carga e mantém uma corrente constante i em um resistor de resistência R .

Para alguns materiais, o valor da sua resistência elétrica R , independe dos valores de V e I , isto é, para estes materiais V/I é uma constante. Esses materiais são denominados de ôhmicos e a representação gráfica da voltagem, V , versus a corrente, I , (ou $V \times I$) é uma função linear. Esta relação entre $V \times I$ é uma descoberta experimental e a curva característica é mostrada na Figura 2-2.

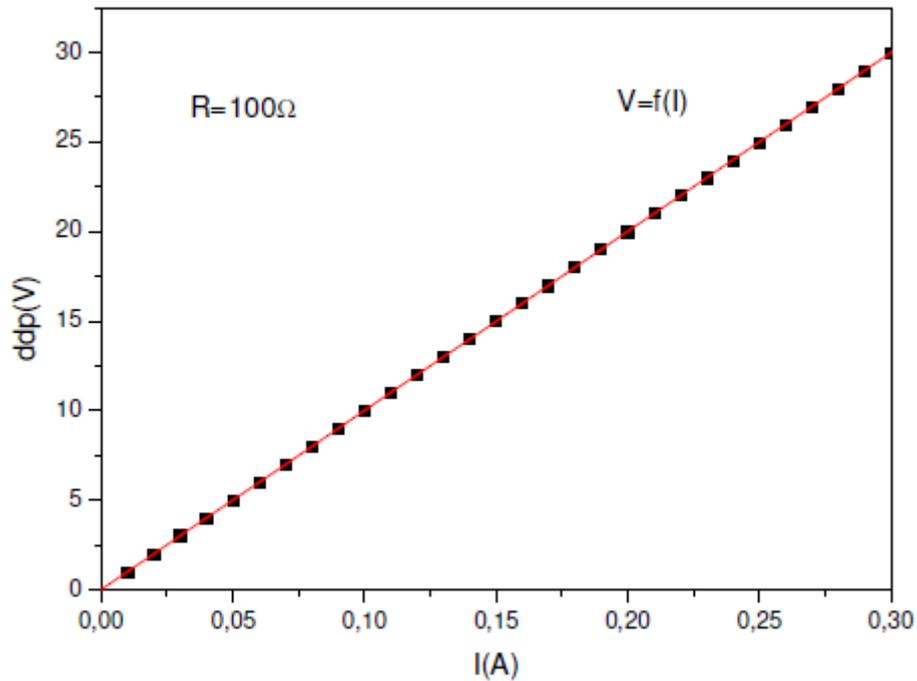


Figura 2-2: Curva característica do material ôhmico

i. Tipos de resistores fixos

Os resistores fixos são geralmente especificados por três parâmetros: o valor nominal da resistência elétrica; a tolerância, ou seja, a máxima variação em porcentagem do valor nominal, e a máxima potência elétrica dissipada. Dentre os tipos de resistores fixos, destacamos os de fio, de filme de carbono e de filme metálico.

Resistor de fio: Consiste basicamente de um tubo cerâmico que serve de suporte para o enrolamento de um determinado comprimento de fio de liga especial, para obter-se o valor de resistência desejado. Os terminais desse fio são conectados às braçadeiras presas ao tubo. Além desse, existem outros tipos construtivos esquematizados, conforme mostra a Figura 2-3.

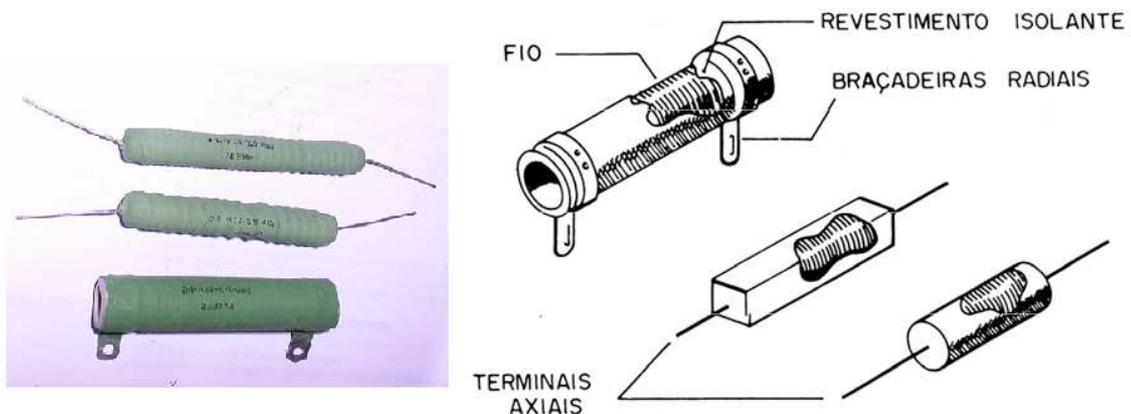


Figura 2-3: Resistores de Fio

Os resistores de fio são encontrados com valores de resistência de alguns ohms até alguns kilo-ohms, e são aplicados onde se exige altos valores de potência, acima de 5 W, sendo suas especificações impressas no próprio corpo do resistor.

Resistor de filme carbono: Consiste de um cilindro de porcelana recoberto por um filme (película) de carbono. O valor da resistência é obtido mediante a formação de um sulco, transformando a película em uma fita helicoidal. Este valor pode variar conforme a espessura do filme ou a largura da fita. Como revestimento, encontramos uma resina protetora sobre a qual será impresso um código de cores identificando seu valor nominal e sua tolerância.

Os resistores de filme de carbono são destinados ao uso geral e suas dimensões físicas determinam a máxima potência ($P=VI=RI^2$) que podem dissipar, conforme a Figura 2-4. Em regra geral, os resistores maiores podem suportar mais calor, sem se queimar, que os resistores menores.

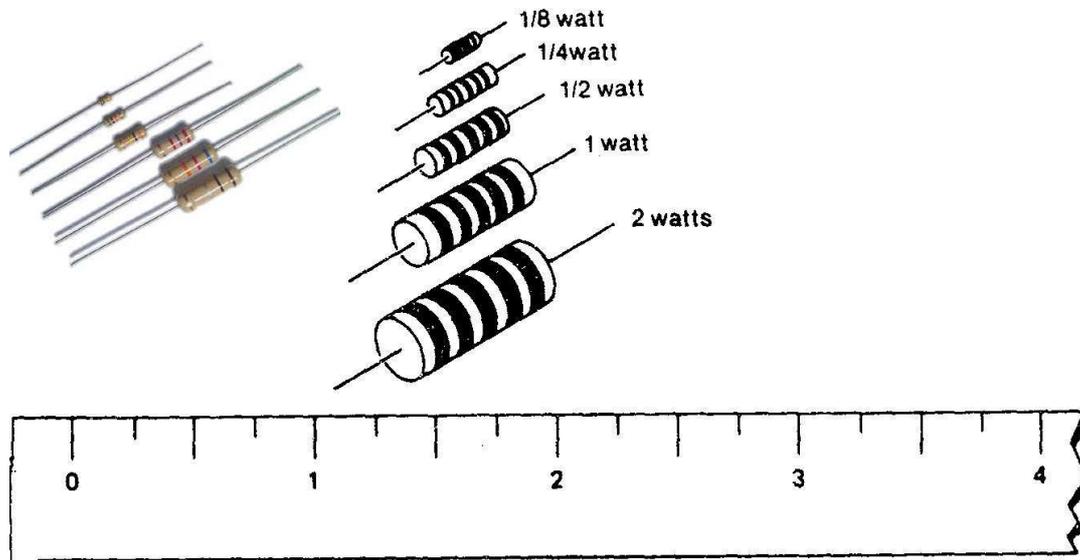


Figura 2-4: Resistores de carbono.

Resistor de filme metálico: Sua estrutura é idêntica ao do de filme de carbono, exceto que utiliza uma liga metálica (níquel-cromo) para formar a película, obtendo valores mais precisos de resistência, com tolerância de 1% e 2% (Figura 2-5).



Figura 2-5: Resistores de filme metálico.

ii. Associação de resistores

Existe uma tensão parcial em cada resistor, no caso de um circuito não ramificado. A soma de todas as tensões parciais é igual à tensão total. Como a intensidade de corrente num circuito não ramificado é a mesma em qualquer ponto do circuito, pode-se dividir a soma $V = V_1 + V_2 + \dots$, pela intensidade de corrente, I , existente em todos

os resistores: $\frac{V_1}{I_1} = \frac{V_2}{I_2} = \dots R_1 = R_2$ (se os resistores forem iguais, obviamente!)

Generalizando temos: $R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots$ como mostra a Figura 2-6.

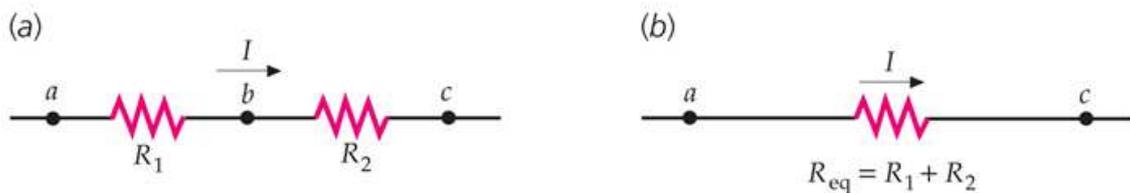


Figura 2-6: (a) Dois resistores conectados em série conduzindo a mesma corrente. (b) Os resistores da Fig. (a) podem ser substituídos por um único resistor equivalente que dá a mesma queda de potencial total quando estiver conduzindo a mesma corrente que na Fig. (a).

Fazendo-se uma análise para a associação em paralelo (Figura 2-7), veremos que a resistência equivalente será dada pela equação:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

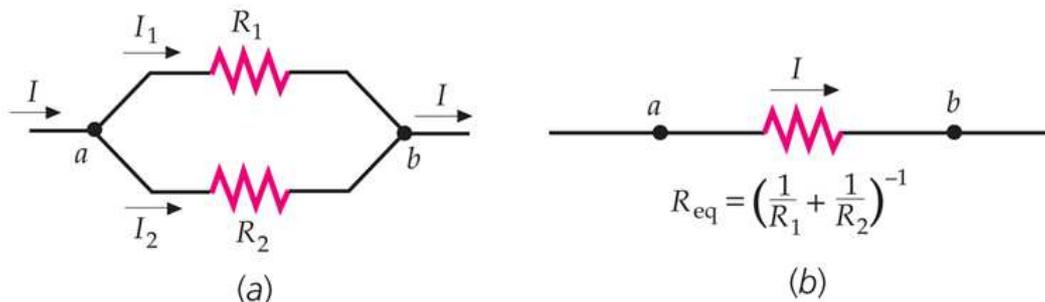


Figura 2-7: (a) Dois resistores estão em paralelo quando eles estão conectados em ambas as extremidades de maneira que a diferença de potencial seja a mesma em cada um. (b) Os dois resistores na Figura (a) podem ser substituídos por uma resistência equivalente R_{eq} que está relacionada à R_1 e R_2 por $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$.

A resistência equivalente de uma combinação de resistores em paralelo é menor que a resistência de qualquer dos resistores.

2.3 MATERIAIS

- Protoboard
- Resistores com código de cores ($R_1=24 \cdot 10^3 \Omega$, $R_2=5,6 \cdot 10^3 \Omega$, $R_3=3,6 \cdot 10^3 \Omega$)
- Multímetro Analógico (Voltímetro, Amperímetro e Ohmímetro)
- Fonte de Alimentação de Corrente Contínua
- Cabos (2 banana/banana, 2 banana/jacaré) e Fios

2.4 MEDIDAS

CONFORME O ROTEIRO “EXPERIMENTO 1: MEDIDAS ELÉTRICAS” TENHA ATENÇÃO AOS CUIDADOS BÁSICOS NA UTILIZAÇÃO DOS MEDIDORES. NÃO GIRE A CHAVE SELETORA DE FAIXAS DO MULTÍMETRO QUANDO O MESMO ESTIVER CONECTADO AO CIRCUITO, ENTRE MEDIDAS DESLIGUE A ALIMENTAÇÃO E O DESCONECTE. TENHA ATENÇÃO PARA ANOTAR CORRETAMENTE OS VALORES MEDIDOS NA FOLHA DE DADOS: A ESCALA UTILIZADA, ALGARISMOS SIGNIFICATIVOS E QUANTIDADE DE DÍGITOS APÓS A VÍRGULA EM CADA ESCALA.

NÃO LIGAR O CIRCUITO ANTES QUE O PROFESSOR CONFIRA AS LIGAÇÕES!

Procedimento 1 – Medição dos componentes

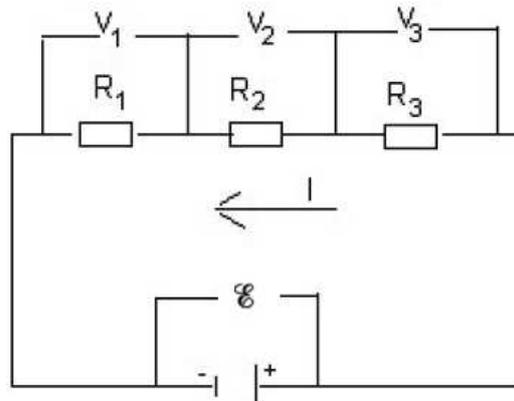
1. Verifique e anote o código de cores de cada resistor. Determine seu valor nominal R_{nominal} .

2. Meça o valor da resistência (R_{medido}) dos resistores utilizando diretamente o ohmímetro: Conecte o cabo banana/jacaré vermelho no terminal $+AV\Omega$ e o cabo banana/jacaré preto no terminal $-COM$. Selecione a faixa Ω verde desejada, conforme o valor da resistência e leitura precisa. Prenda um cabo jacaré ao outro e zere à direita sempre que trocar de faixa. Faça a leitura na escala não linear Ω verde. Anote o fator de multiplicação (escala). Não se esqueça de multiplicar o valor lido pelo fator de multiplicação da escala.

3. Anote o erro avaliado no aparelho ΔR_{medido} (menor divisão da escala dividido por 2). Atenção: por se tratar de uma escala não linear a metade da menor divisão da escala será diferente dependendo, portanto, da região de leitura de cada medida.

Procedimento 2 – Associação de resistores em série

1. Monte o circuito (série), conforme figura abaixo, na matriz de contato.



2. Antes de conectar a fonte de alimentação ao circuito (mesmo desligada) meça a resistência equivalente (R_{eq}) do circuito com o ohmímetro. Anote o valor e erro avaliado no aparelho (ΔR_{eq}). Calcule o valor teórico e compare.

3. Insira o voltímetro em paralelo com a fonte, prendendo os cabos jacarés nos pontos a serem medidos. Selecione a chave rotativa para a faixa de tensão desejada em faixas DCV preta (Se a magnitude do sinal não é conhecida, selecione a maior faixa e então reduza até obter leitura satisfatória). **Observe a polaridade do sinal, pois o ponteiro pode ser danificado se defletir no sentido contrário.** Após a conferência pelo professor, ligue a fonte de alimentação em 5 V. Faça a leitura na escala linear (DCV.A preta) e anote este valor medido da tensão fornecida pela fonte (\mathcal{E}). Anote a escala utilizada e o erro avaliado no aparelho ($\Delta \mathcal{E}$).

4. Obtenha também as medidas de tensão e seu erros com o voltímetro (faixas DCV, leitura na escala linear DCV.A preta) nos outros elementos do circuito ($V_{R1} \pm \Delta V_{R1}$, $V_{R2} \pm \Delta V_{R2}$, $V_{R3} \pm \Delta V_{R3}$).

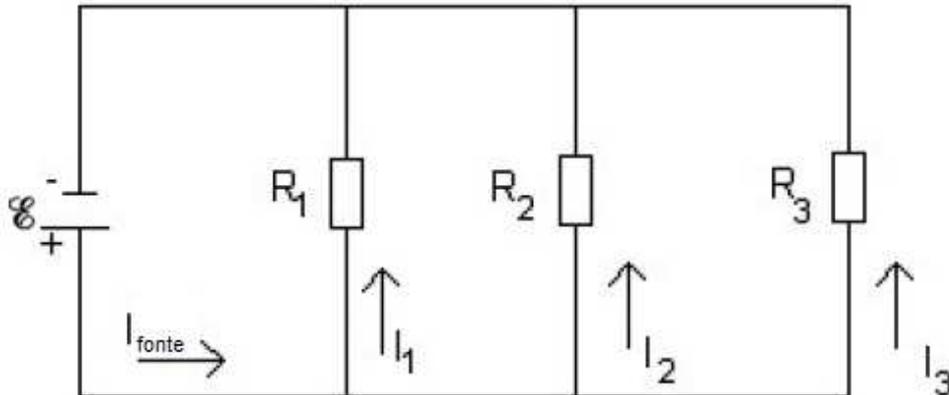
5. Desligue ou desconecte a fonte de alimentação (não zere a mesma) e desconecte o voltímetro para efetuar as medidas de corrente descritas no item 6. **Advertência: Nunca aplique tensão aos terminais de entrada do multímetro quando selecionar através da chave rotativa a faixa de corrente.**

6. Selecione a maior faixa DCA (0.25), insira o amperímetro em **série** entre os resistores ou entre a fonte e os resistores, dependendo do que se deseja medir. Para que a corrente circule pelo amperímetro será necessário abrir o circuito (desfazendo a conexão do elemento a ser medido do protoboard). Confira com o professor, ligue ou conecte a fonte e faça a leitura da corrente na escala linear (DCV.A preta) em cada elemento do circuito ($I_{R1} \pm \Delta I_{R1}$, $I_{R2} \pm \Delta I_{R2}$, $I_{R3} \pm \Delta I_{R3}$, $I_{\text{fonte}} \pm \Delta I_{\text{fonte}}$). **Reduza a faixa DCA até obter leitura satisfatória.**

7. Somente após as medidas de tensão e corrente você deverá variar a tensão da fonte, de 5 V até 0 V, de 1 V em 1 V. Para cada valor de tensão da fonte, repetir os passos 3-6 descritos acima. Ao final você deverá ter um conjunto de 6 medidas.

Procedimento 3 – Associação de resistores em paralelo

1. Com os mesmos resistores usados no Procedimento 1, monte o circuito (paralelo), conforme figura abaixo, na matriz de contato.



2. Antes de conectar a fonte de alimentação ao circuito (mesmo desligada) meça a resistência equivalente do circuito com o ohmímetro. Anote o valor. Calcule o valor teórico e compare.

3. Insira o voltímetro em paralelo com a fonte. Selecione a faixa de tensão desejada em faixas DCV preta (selecione a maior faixa e então reduza até obter leitura satisfatória). Após a conferência pelo professor, ligue a fonte de alimentação em 5 V. Faça a leitura na escala linear DCV.A preta e anote este valor medido da tensão fornecida pela fonte (\mathcal{E}). Anote a escala utilizada e o erro avaliado no aparelho ($\Delta \mathcal{E}$).

4. Obtenha as medidas de: tensão com o voltímetro (faixas DCV, leitura na escala linear DCV.A preta) nos outros elementos do circuito (V_{R1} , V_{R2} , V_{R3}). Desligue ou desconecte a fonte (não zere a mesma) para efetuar as medidas de corrente.

5. Selecione a maior faixa DCA (0.25), insira o amperímetro em **série** entre os elementos. Abra o circuito. Ligue ou conecte a fonte e faça a leitura da corrente na escala linear DCV.A preta em cada elemento do circuito ($I_{R1} \pm \Delta I_{R1}$, $I_{R2} \pm \Delta I_{R2}$, $I_{R3} \pm \Delta I_{R3}$, $I_{\text{fonte}} \pm \Delta I_{\text{fonte}}$). Reduza a faixa DCA até obter leitura satisfatória. **Desligue a fonte entre as medidas.**

6. Somente após as medidas de tensão e corrente você deverá variar a tensão da fonte, de 5 V até 0 V, de 1 V em 1 V. Para cada valor de tensão da fonte, repetir os passos 3-5 descritos acima. Ao final você deverá ter um conjunto de 6 medidas.

Instruções específicas para este relatório
(verificar também as instruções gerais, já divulgadas)

- Apresentar os valores de resistência em tabela: nominais (códigos de cores) e medidos (com a incerteza associada). Na discussão, verificar se o valor medido com o ohmímetro está dentro da tolerância especificada pelo código de cores.
- Calcular o valor da resistência equivalente nos dois casos (série e paralelo), utilizando os valores nominais. Comparar com o valor medido diretamente com o ohmímetro.
- Apresentar um esquema dos circuitos montados.
- Apresentar os valores da tensão da fonte, ddp e corrente em cada resistor para ambos os casos (série e paralelo) em duas tabelas distintas.
- Faça um gráfico $V=f(I)$ para cada um dos resistores. Qual é a curva esperada para os pontos obtidos? Quais os parâmetros importantes para a construção dessa curva? Como esses parâmetros se relacionam com a expressão da Lei de Ohm? Através dos gráficos, determine o valor experimental dos resistores R_1 , R_2 , R_3 e compare com o valor nominal (código de cores) e o valor medido. Explique a diferença entre a resistência determinada e a nominal.
- Construa um gráfico da ddp da fonte versus a corrente no circuito e obtenha o valor experimental da resistência equivalente. Compare com o valor calculado a partir dos valores nominais e com o valor medido com o ohmímetro.
- Apresentar o ajuste dos dados experimentais
- Discutir os resultados.

Os gráficos devem ser feitos em milimetrado em escala própria e a análise gráfica pode ser obtida conforme o Apêndice A: Teoria dos Erros.

Para o relatório, considere também a seguinte situação:

Suponha que vocês tenham que escolher 3 valores de resistores, distintos, para a prática de Lei de Ohm, circuitos série e paralelo, considerando que para os valores de potencial que serão utilizados (faixa de 0 a 5 V), o valor da corrente em qualquer ponto de ambos os circuitos não deve ultrapassar 200 mA. Discuta sobre a faixa dos valores possíveis.

EXPERIMENTO 3: CIRCUITOS DE CORRENTE CONTÍNUA

3.1 OBJETIVOS

Verificar experimentalmente as Leis de Kirchhoff

3.2 INTRODUÇÃO

Para a resolução de um circuito de corrente contínua (cc), com várias malhas, podemos aplicar dois princípios básicos de conservação. Esses princípios são traduzidos em uma forma mais prática através das leis de Kirchhoff: Lei das malhas e Lei dos nós.

As Leis de Kirchhoff envolvem conceitos básicos para a análise e resolução de circuitos elétricos. Basicamente, um circuito elétrico é formado pela interligação de componentes elétricos ou elementos de circuitos. Assim, os circuitos aqui estudados, serão formados pela conexão de resistores e fontes de tensão e/ou corrente. Portanto, é necessário conhecer algumas definições a respeito das partes que compõem um circuito elétrico, e que estão indicadas na Figura 3-1:

- NÓ: ponto onde dois ou mais elementos de circuitos têm uma conexão comum;
- RAMO: é um caminho único, contendo um elemento de circuito e que conecta um nó a outro nó qualquer;
- LAÇO: caminho fechado por onde possa fluir corrente;
- MALHA: é um laço que não contém internamente outro laço.

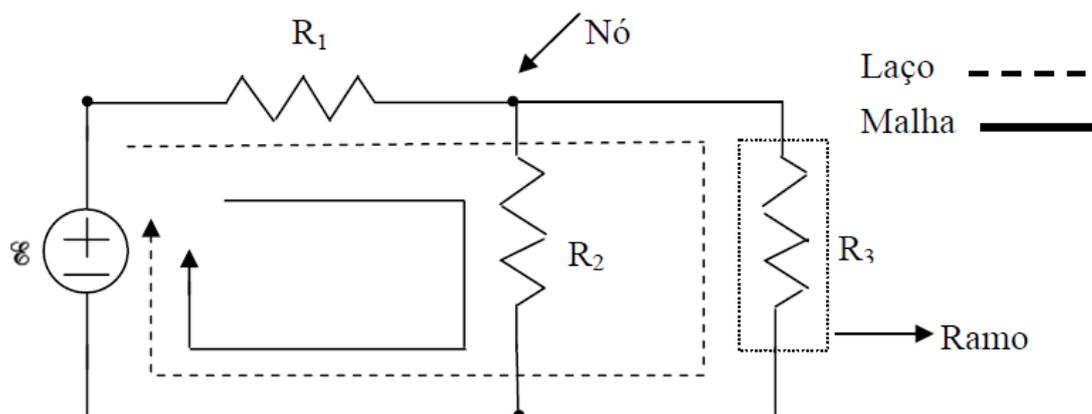


Figura 3-1: Partes que compõe um circuito.

i. Lei das malhas ou Lei das Tensões:

A soma das variações de potencial em um circuito fechado é nula.

Isso decorre do fato do potencial ser uma função de ponto, pois ao completar um circuito e voltar ao mesmo ponto o potencial é o mesmo. Note na Figura 3-2 que, partindo do ponto a com potencial \mathcal{E} e retornando ao mesmo ponto, devemos obter o mesmo potencial \mathcal{E} . Para o circuito da Figura 3-2, pode-se então, escrever a Lei de Kirchhoff das Tensões como:

$$(V_b - V_a) + (V_c - V_b) + (V_a - V_d) = 0 \quad (1)$$

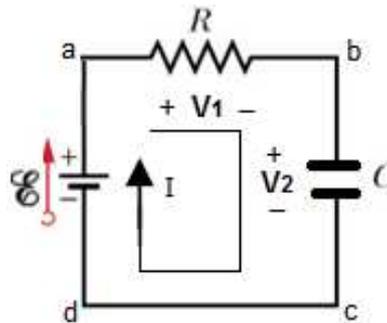


Figura 3-2: Polaridades.

Para o elemento força eletromotriz (fem) com sentido $d \rightarrow a$, temos então $V_a - V_d = +\mathcal{E}$, a corrente irá circular no sentido horário. Para o elemento resistência R, temos $V_b - V_a = -V_1$. O sinal negativo se deve ao fato de haver uma queda de potencial ao atravessar o resistor. Para o elemento capacitor temos $V_c - V_b = -V_2$. O sinal negativo indica que a placa superior será carregada positivamente enquanto que a inferior terá carga negativa. Assim, o potencial em c é menor que em b de modo que haverá uma queda de potencial. A equação (1) ficará:

$$\mathcal{E} - V_1 - V_2 = V - RI - \frac{q}{C} = 0 \quad (2)$$

$$\text{ou } \mathcal{E} = RI + \frac{q}{C} \quad (3)$$

Considerando-se que a tensão ou diferença de potencial (ddp) está relacionada à energia (J/C), e que energia é conservativa, multiplicamos por dq ambos os membros da equação, o lado esquerdo será a energia fornecida ao circuito, enquanto o lado direito será a energia dissipada no resistor somada com a energia acumulada no capacitor. Isto é justamente a lei de conservação de energia!

A lei de malhas exemplificada acima vale tanto para um circuito de uma única malha como para um circuito de várias malhas, lembrando-se que neste caso a lei deve ser aplicada para cada malha isoladamente.

ii. Lei dos nós ou Lei das Correntes:

É essencialmente a lei de conservação de cargas: a soma algébrica das correntes em um nó é igual à zero. De outra forma, a soma das correntes que chegam a um nó é igual à soma das correntes que saem do mesmo.

Para o circuito da Figura 3-3, pode-se então, escrever a Lei de Kirchhoff das correntes como:

$$I - I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad (4)$$

$$\text{ou } I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (5)$$

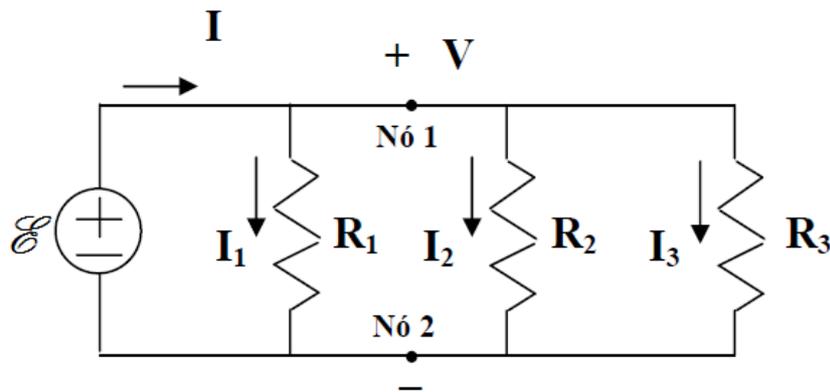


Figura 3-3: Circuito com um par de nós.

3.3 MATERIAIS

- Protoboard
- Resistores: 150Ω ; $1 \cdot 10^3 \Omega$; $3,6 \cdot 10^3 \Omega$; $5,6 \cdot 10^3 \Omega$ (1/2 W)
- Multímetro Analógico (Voltímetro, Amperímetro e Ohmímetro)
- Fonte de Alimentação de Corrente Contínua
- Cabos (2 banana/banana, 2 banana/jacaré) e Fios

3.4 MEDIDAS

CONFORME “EXPERIMENTO 1: MEDIDAS ELÉTRICAS” TENHA ATENÇÃO AOS CUIDADOS BÁSICOS NA UTILIZAÇÃO DOS MEDIDORES. NÃO GIRE A CHAVE SELETORA DE FAIXAS DO MULTÍMETRO QUANDO O MESMO ESTIVER CONECTADO AO CIRCUITO, ENTRE MEDIDAS DESLIGUE A ALIMENTAÇÃO E O DESCONECTE. TENHA ATENÇÃO PARA ANOTAR CORRETAMENTE OS VALORES MEDIDOS NA FOLHA DE DADOS: A ESCALA UTILIZADA, ALGARISMOS SIGNIFICATIVOS E QUANTIDADE DE DÍGITOS APÓS A VÍRGULA EM CADA ESCALA.

NÃO LIGAR O CIRCUITO ANTES QUE O PROFESSOR CONFIRA AS LIGAÇÕES!

Procedimento 1 – Medição dos Componentes

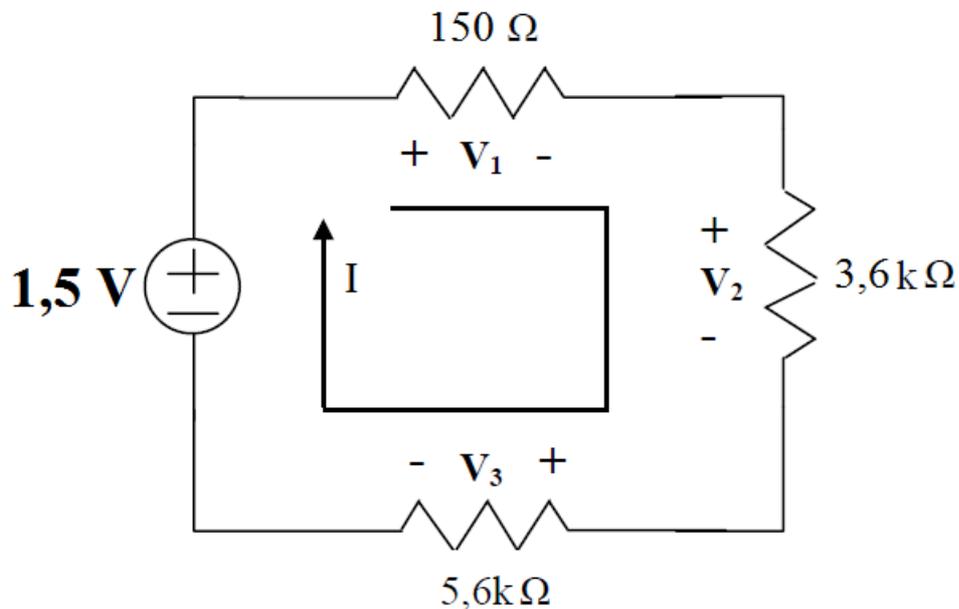
4. Identifique (R_{nominal}) e meça (R_{medida}) os resistores (desconectados) através do ohmímetro (selecione faixas multiplicadoras Ω verde, faça a leitura na escala não linear Ω verde), preenchendo a primeira tabela da Folha de Dados. Anote o erro avaliado no aparelho ΔR_{medida} (atenção para a escala não linear).

5. Calcule o erro relativo ($\Delta R_{\text{medida}} / R_{\text{medida}}$).

Procedimento 2 – Lei de Kirchhoff das malhas ou das tensões

7. Monte o circuito (série), conforme figura abaixo, na matriz de contato.

8. Após a conferência pelo professor, ligue a fonte ao circuito (1,5 V). Confira com o voltímetro (insira em paralelo, selecione faixas DCV, faça a leitura na escala linear DCV.A preta) a tensão (\mathcal{E}) fornecida pela fonte, anote o erro avaliado no aparelho ($\Delta \mathcal{E}$). Desligue a fonte de alimentação e desconecte o voltímetro.



9. Selecione a maior faixa DCA (0.25), insira o amperímetro em série (abra o circuito) ligue a fonte e reduza a faixa até leitura precisa na escala linear DCV.A preta da corrente que percorre o circuito (I). Anote na Folha de Dados. Desligue a fonte.

10. Selecione as faixas DCV, insira o voltímetro em paralelo com o elemento a ser medido, ligue a fonte e faça a leitura na escala linear DCV.A preta da ddp em cada um dos resistores e anote (V_1 , V_2 e V_3).

11. Verifique e anote o desvio avaliado no equipamento para as grandezas medidas “Erro (avaliado)”.

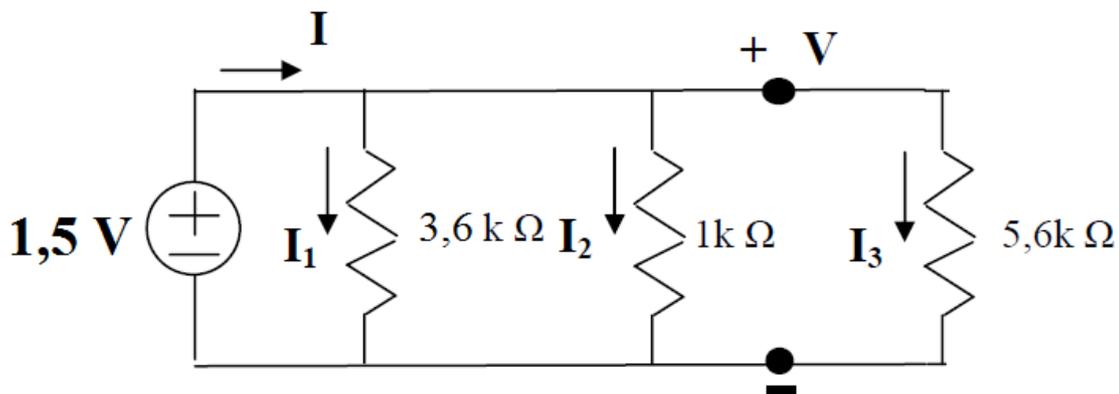
12. Usando a lei das malhas encontre teoricamente a corrente indicada no circuito acima (veja capítulo 3.2 subitem i).

13. Com os valores encontrados no item 6, as resistências nominais e através da lei de Ohm calcule teoricamente a ddp em cada resistor.

14. Através das equações formuladas nos itens 6 e 7 calcule e anote os desvios por propagação de erros para os valores teóricos “Erro (propagado)”.

Procedimento 3 – Lei de Kirchhoff dos nós ou das correntes

1. Monte o circuito (paralelo), conforme figura abaixo, na matriz de contato.



2. Após a conferência pelo professor, ligue a fonte ao circuito (1,5 V). Confira com o voltímetro (insira em paralelo com a fonte, selecione faixas DCV, faça a leitura na escala linear DCV.A preta) a tensão (\mathcal{E}) fornecida pela fonte, anote o erro avaliado no aparelho ($\Delta\mathcal{E}$). Desligue a fonte de alimentação e desconecte o voltímetro.

3. Selecione a maior faixa DCA (0.25), insira o amperímetro em série com o elemento a ser medido (abra o circuito) ligue a fonte e faça a leitura na escala linear DCV.A preta de todas as corrente que percorrem o circuito. Anote os valores na Folha de Dados (I , I_1 , I_2 e I_3). **Desligue a fonte entre as medidas.**

4. Verifique e anote o desvio avaliado no equipamento para as grandezas medidas “Erro (avaliado)”.

5. Usando a lei das malhas encontre teoricamente a corrente em cada malha (I_1 , I_2 , I_3). (veja capítulo 3.2, subitem i)

6. Usando a lei dos nós encontre a corrente I . (veja capítulo 3.2, subitem ii)

7. Através das equações formuladas nos itens 5 e 6 calcule e anote os desvios por propagação de erros para os valores teóricos “Erro (propagado)”.

EXPERIMENTO 4: SUPERFÍCIES EQUIPOTENCIAIS

4.1 OBJETIVOS

Fazer um mapeamento das linhas equipotenciais e das de força de um campo elétrico, através da simulação do caso eletrostático.

4.2 INTRODUÇÃO

Imaginemos um espaço vazio livre de qualquer influência elétrica. Se a este espaço trazemos agora uma carga elétrica, toda a região em volta é perturbada pela sua presença. A essa perturbação chamamos Campo Elétrico. Para detectar essa nova propriedade do espaço precisamos, entretanto, de outra carga.

Podemos então dizer: o Campo Elétrico se manifesta na região do espaço que envolve uma carga elétrica. Ao colocarmos outra carga, esta sofre a ação de uma força de atração ou de repulsão. Isso é apenas uma noção qualitativa do campo elétrico.

Para caracterizar matematicamente as propriedades adquiridas pela região do espaço na qual colocamos uma carga elétrica, ou seja, para caracterizar essa nova qualidade da região, consideraremos a seguinte situação: imaginemos uma carga elétrica Q . Ela modifica as propriedades elétricas de certa região do espaço, isto é, produz um campo elétrico ao seu redor. Coloquemos em um ponto qualquer desta região que envolve Q outra carga elétrica muito pequena, que chamaremos de “carga de prova” ou “carga de teste”, e que, por conveniência, será positiva. Essa segunda carga sofrerá a ação de uma força \vec{F} .

Definimos então o vetor campo elétrico no ponto onde colocamos a “carga de teste”, como sendo o vetor,

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1)$$

onde q indica a carga de prova, \vec{F} é a força que atua sobre ela e \vec{E} é o vetor campo elétrico no ponto onde se encontra a carga de prova.

A direção de um campo para qualquer ponto é definida como a direção da força sobre uma carga positiva colocada naquele ponto. A orientação do campo elétrico numa região pode ser representada graficamente por linhas de força. Uma linha de força de

um campo elétrico é uma linha traçada de tal modo que a tangente a ela em qualquer ponto indique a direção do campo elétrico naquele ponto.

A noção de potencial elétrico provém do conceito de trabalho e é, por definição, igual ao trabalho W necessário para trazer uma carga de prova q do infinito até a distância d da carga Q , dividido pela carga q :

$$V = \frac{W}{q} \quad (2)$$

Uma superfície escolhida de modo a que todos os pontos tenham o mesmo potencial é chamada SUPERFÍCIE EQUIPOTENCIAL. Uma linha de tal superfície é conhecida como LINHA EQUIPOTENCIAL. Superfícies equipotenciais são sempre perpendiculares às linhas de força. Com efeito, o trabalho da força eletrostática é definido como o produto escalar da força pelo deslocamento. Logo, o deslocamento de uma carga teste numa superfície equipotencial não envolve trabalho, uma vez que a força e , portanto, o campo elétrico é sempre perpendicular às equipotenciais.

Se em um sistema eletrostático as linhas equipotenciais podem ser desenhadas, as linhas de força podem ser imediatamente construídas, uma vez que elas são perpendiculares às linhas equipotenciais.

A Figura 4-1 mostra linhas de campo elétrico e seções retas de superfícies equipotenciais para os campos associados a um campo elétrico uniforme, uma carga elétrica pontual e um dipolo elétrico.

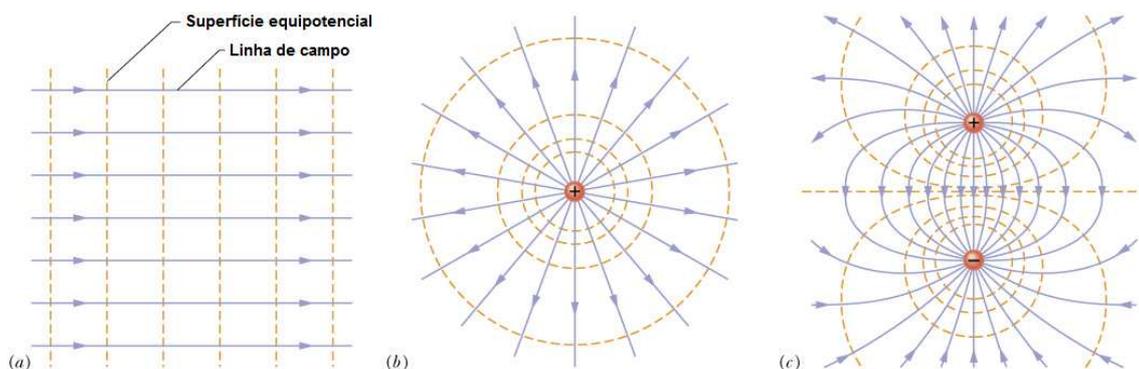


Figura 4-1: Linhas de campo elétrico (linhas cheias) e seções retas de superfícies equipotenciais (linhas tracejadas) (a) para um campo elétrico uniforme (b) para uma carga pontual (c) para um dipolo elétrico.

4.3 MATERIAIS

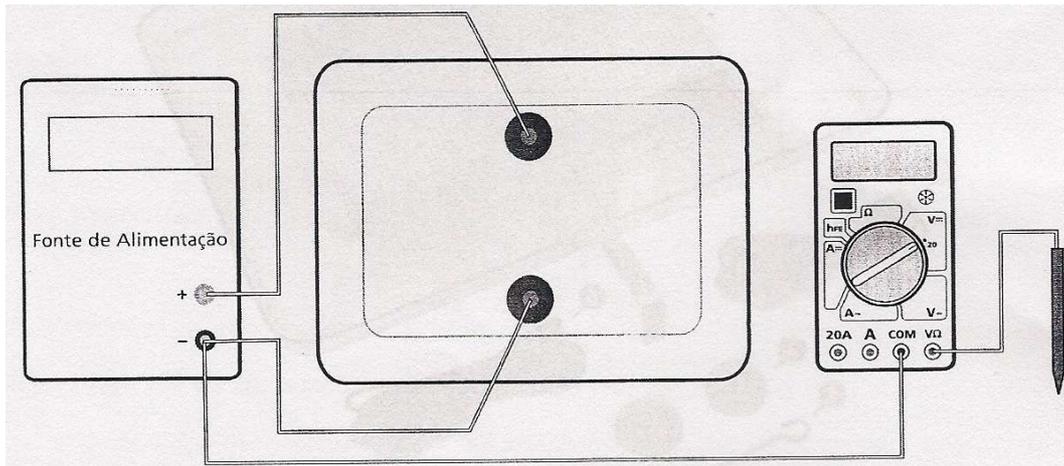
- Cuba Transparente 43x30 cm com 5 mm de líquido condutor (H_2O)
- Dois Eletrodos Barra
- Dois Eletrodos Disco
- Eletrodo Anel
- Ponteira de Metal para medição
- Cabos (4 banana/banana com derivação)
- Fonte de Alimentação de Corrente Contínua
- Multímetro Digital (Voltímetro)
- Cinco folhas de papel milimetrado

4.4 MEDIDAS

LEMBRE-SE QUE VOCÊS ESTÃO TRABALHANDO COM INSTRUMENTOS DELICADOS QUE DEVEM SER MANUSEADOS COM CUIDADO. NÃO FORCE A PONTA DE PROVA NA CUBA PARA NÃO RISCÁ-LA. NÃO DEIXE O MULTÍMETRO LIGADO DESNECESSARIAMENTE. SEMPRE AGIR COM DELICADEZA. OUTROS ESTUDANTES UTILIZARÃO ESTES MATERIAIS.

I. Superfície Equipotencial com Dois Eletrodos Cilíndricos.

1. Marcar em uma folha de papel milimetrado o formato dos eletrodos disco conforme as coordenadas preestabelecidas no papel milimetrado do fundo da cuba. Note que nesta configuração os eletrodos ficarão aproximadamente 10 cm um do outro (Configuração I).
2. Colocar aproximadamente 5 mm de água na cuba (medido a partir do fundo)
3. Montar o equipamento conforme a Configuração I e os itens 4-6. Sobreponha os eletrodos nas marcas circulares desenhadas na folha debaixo da cuba transparente. A outra folha de papel milimetrado fica ao lado para a marcação dos pontos.



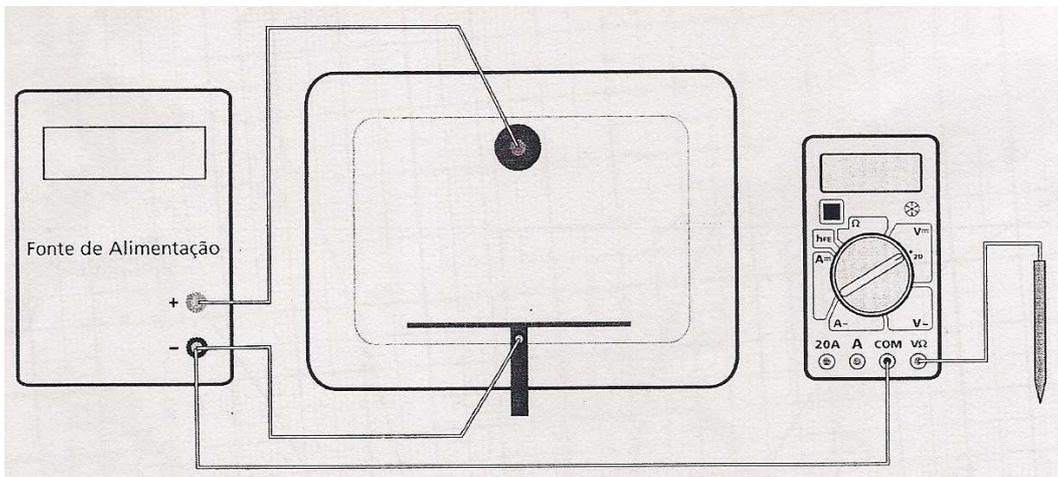
Configuração I: Mapeamento de linhas equipotenciais de dois eletrodos cilíndricos.

4. Com um cabo de ligação banana/banana (preto) ligar o terminal negativo do voltímetro ao terminal negativo da fonte.
5. Ligar os terminais (+ e -) da fonte aos eletrodos (no terminal negativo da fonte utilize a derivação axial do cabo de ligação banana/banana pré-conectado).
6. Ligar o terminal positivo do voltímetro na ponteira utilizando também um cabo de ligação banana/banana vermelho. Selecione a chave seletora na faixa V₋ recomendável (20).
7. Ligar a fonte e aplicar aos eletrodos uma tensão de 10 V DC. Cuidado para **não alterar** esta tensão durante todo o experimento.
8. Mergulhar a ponteira verticalmente na água e procurar os pontos em que o multímetro indicar 3,00 V. O ponto encontrado é transferido, através de suas coordenadas (x,y) para a folha de papel milimetrado idêntica a existente no fundo da cuba.
9. Procurar com a sonda móvel um número de pontos (simétricos e com valor 3,00 V) suficiente para traçar a curva equipotencial (7 pontos ou mais). Escolha estes pontos de maneira inteligente!
10. Ao terminar o mapeamento de uma linha a sonda móvel é deslocada para outra posição e todo o processo é então repetido, para se mapear uma nova linha. Por exemplo, repita os procedimentos acima para os pontos em que o multímetro indicar 4, 5, 6, 7 e 8 V.
11. Anote a polaridade dos eletrodos e desligue a fonte de alimentação.

II. Superfície Equipotencial com um Eletrodo Plano e um Eletrodo Cilíndrico.

1. Você irá montar a Configuração II. (Antes de mergulhar o eletrodo plano na

água marque em uma nova folha de papel milimetrado o formato do mesmo conforme as coordenadas preestabelecidas no papel milimetrado do fundo da cuba.)

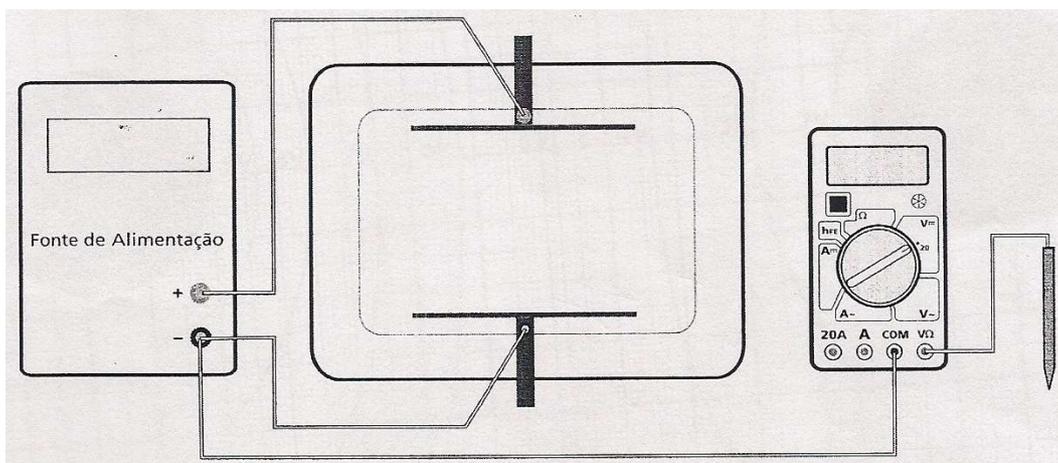


Configuração II: Mapeamento de linhas equipotenciais de um eletrodo plano e um eletrodo cilíndrico.

2. Ligue a fonte e para esta configuração mapear as linhas equipotenciais, por exemplo, para os pontos em que o multímetro indicar 2 V, 4 V, 6 V e 8 V.
3. Novamente, anote a polaridade da placa e do disco.

III. Superfície Equipotencial com dois eletrodos planos.

1. Desligue a fonte e marque em uma nova folha de papel milimetrado o formato dos eletrodos da Configuração III.



Configuração III: Mapeamento de linhas equipotenciais de dois eletrodos planos.

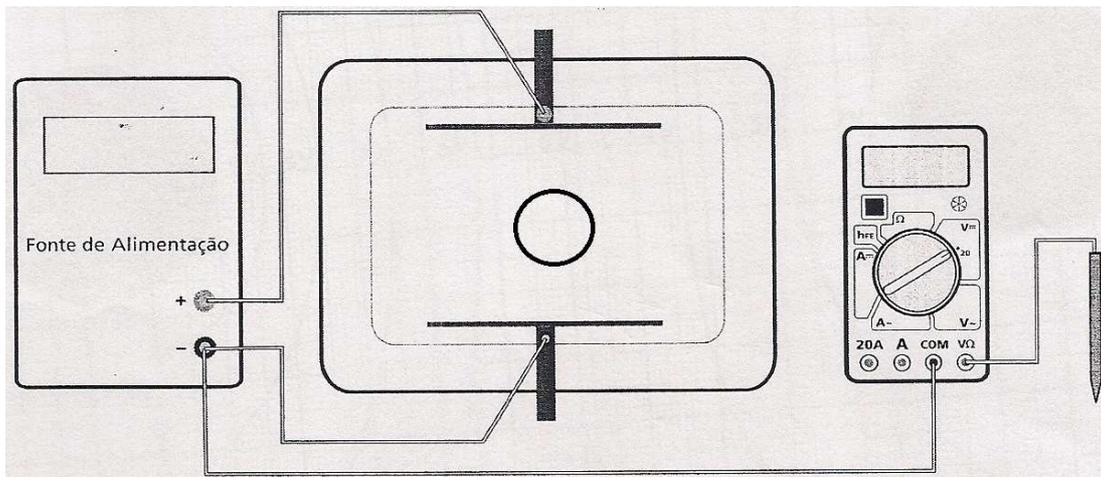
2. Para esta configuração mapear as linhas equipotenciais, por exemplo, para os

pontos em que o multímetro indicar 4 V, 6 V e 8 V.

3. Anote a polaridade dos eletrodos.

IV. Superfície Equipotencial com dois eletrodos planos e eletrodo anel.

1. Em uma nova folha de papel milimetrado marque o formato dos eletrodos planos e do eletrodo anel e insira este eletrodo no meio entre as placas (por sobre a marca), conforme a Configuração IV. Com a sonda móvel verifique a tensão no interior do anel. (Anote e explique em seu relatório).



Configuração IV: Mapeamento de linhas equipotenciais de dois eletrodos planos e o eletrodo anel inserido entre as placas.

2. Para esta nova configuração mapear as linhas equipotenciais, por exemplo, para os pontos em que o multímetro indicar 4 V, 6 V e 8 V.
3. Anote a polaridade dos eletrodos.

Instruções específicas para este relatório

(verificar também as instruções gerais, já divulgadas)

Este experimento, como, aliás, todos os outros, devem ser discutidos com base na teoria que você aprendeu na aula teórica e/ou no roteiro. Procure identificar e discutir todos os aspectos físicos importantes do experimento.

Como auxílio, a seguir há uma lista de possíveis aspectos que devem ser obrigatoriamente abordados em sua discussão.

- O que é medido ao se mergulhar a ponta de prova (sonda móvel) na água?
- Para as configurações, trace as linhas equipotenciais e algumas linhas de campo elétrico não esquecendo os sentidos das mesmas.
- Identifique a polaridade dos eletrodos para a configuração estudada.
- Explique por que os eletrodos também podem ser considerados como sendo equipotenciais.
- Tente analisar o que aconteceria no resultado do experimento se o fundo da cuba não fosse horizontal.
- Explique porque uma variação da profundidade da cuba resistiva é análoga a uma variação de dielétrico no caso eletrostático equivalente.
- Discuta ainda se for pertinente ao seu trabalho: Simetria das linhas equipotenciais e de corrente; Configuração das equipotenciais perto dos condutores; Linhas de corrente perto dos eletrodos; Regiões de campo mais intenso; Efeito de pontas; Estudo dos erros experimentais.

IMPORTANTE:

- Esta lista não é limitativa e nem pretende estabelecer nenhum tipo de sequência em sua discussão.

EXPERIMENTO 5: CIRCUITO RC

5.1 OBJETIVOS

Medir a constante de tempo de um circuito RC - série nas situações de carga e descarga do capacitor.

Determinar o comportamento da variável tempo de carga e descarga de um capacitor.

Determinar a resistência efetiva e a capacitância do circuito RC – série através da constante de tempo.

5.2 INTRODUÇÃO

Um capacitor é composto por duas placas metálicas, separadas por um material isolante chamado dielétrico (papel, cerâmica, plástico ou até mesmo o ar). Sua função é armazenar energia elétrica por um período determinado pelas características do circuito, até que este seja interrompido ou a fonte desligada.

Capacitância ou capacidade (C), medida em farads (F), é a propriedade que estes dispositivos têm de armazenar energia elétrica sob a forma de um campo eletrostático e está relacionada com a geometria das placas e a constante dielétrica do meio isolante usado entre as placas. É medida pela seguinte fórmula

$$C = \frac{q(t)}{V} \quad (1)$$

Onde q é a quantidade de carga armazenada em Coulomb (C) e V é a diferença de potencial ou tensão que existe entre as placas em volts.

Quando ligamos um circuito com uma resistência R a tensão se eleva instantaneamente ao seu valor máximo. Mas quando inserimos um capacitor neste circuito a tensão demora certo tempo para assumir seu valor máximo V_0 .

O circuito da Figura 5-1 contém uma fonte de cc, um resistor e um capacitor C, em série.

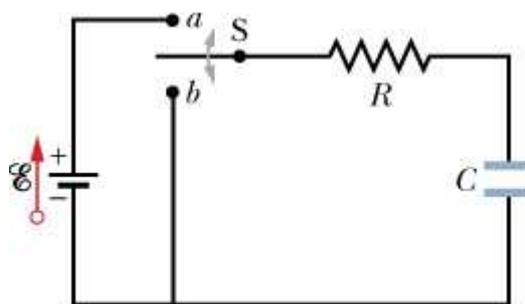


Figura 5-1: Esquema de carga e descarga de um capacitor.

Inicialmente, o capacitor está descarregado; ligamos o circuito no instante $t=0$, passando a chave S para o ponto a. Vamos ver agora que a carga q do capacitor não se estabelece de maneira instantânea.

A lei das malhas de Kirchoff aplicada ao circuito de carga nos fornece:

$$\varepsilon - iR - \frac{q(t)}{C} = 0 \quad (2)$$

Onde $\varepsilon = V_0$ e a corrente no resistor é devida à carga que sai do capacitor, ou seja:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (3)$$

Substituindo a equação (3) na equação (2) teremos:

$$V_0 - R \frac{dq(t)}{dt} - \frac{q(t)}{C} = 0 \quad (4)$$

Uma solução para esta equação diferencial é do tipo:

$$q(t) = CV_0(1 - e^{-t/RC}) \quad (5)$$

E para $t=RC$, temos:

$$q(t) = CV_0(1 - 1/e) = 63\% CV_0 = 63\% q_0 \quad (6)$$

onde q_0 é a carga máxima do capacitor.

A grandeza RC , que tem a dimensão de tempo, é chamada constante de tempo capacitiva. Ela representa o tempo necessário para que a carga ou a tensão atinja um valor igual a 63% do seu valor máximo.

O comportamento da tensão V é obtido a partir do comportamento de $q(t)$. Então:

$$V(t) = \frac{q(t)}{C} = V_0(1 - e^{-t/\tau}) \quad (7)$$

, onde $\tau=RC$.

O que podemos observar é que, no processo de carga de um circuito RC os comportamentos da tensão e corrente se invertem. Ao ligarmos um circuito RC a tensão demora algum tempo para atingir o seu valor máximo.

O circuito RC mais simples é aquele constituído por um capacitor inicialmente carregado com uma tensão V_0 descarregando sobre um resistor (chave S no ponto b da Figura 5-1). Todo o desenvolvimento mostrado para um capacitor se carregando vale também para um capacitor se descarregando.

A lei das malhas de Kirchoff aplicada ao circuito de descarga nos fornece:

$$iR + \frac{q(t)}{C} = 0 \quad (8)$$

ou:

$$\frac{dq(t)}{q(t)} = -\frac{1}{RC} dt \quad (9)$$

ou, definindo $RC=\tau$ e integrando:

$$\ln\left(\frac{q}{q_0}\right) = -\frac{t}{\tau} \quad (10)$$

Reescrevendo, teremos:

$$q(t) = q_0 e^{-t/\tau}, \text{ ou} \quad (12)$$

$$V(t) = V_0 e^{-t/\tau} \quad (13)$$

Quando descarregamos um capacitor sua carga não cai à zero instantaneamente, mas decai exponencialmente.

Neste experimento verificaremos a relação entre os processos de carga e descarga de um capacitor em um circuito RC e sua respectiva constante de tempo τ definida acima. Podemos mostrar que o tempo de descarga de um capacitor é igual ao tempo de carga desde que seja feito nas mesmas condições, ou seja, em um circuito com a mesma resistência R.

Na Figura 5-2 são apresentadas as curvas correspondentes às duas situações estudadas.

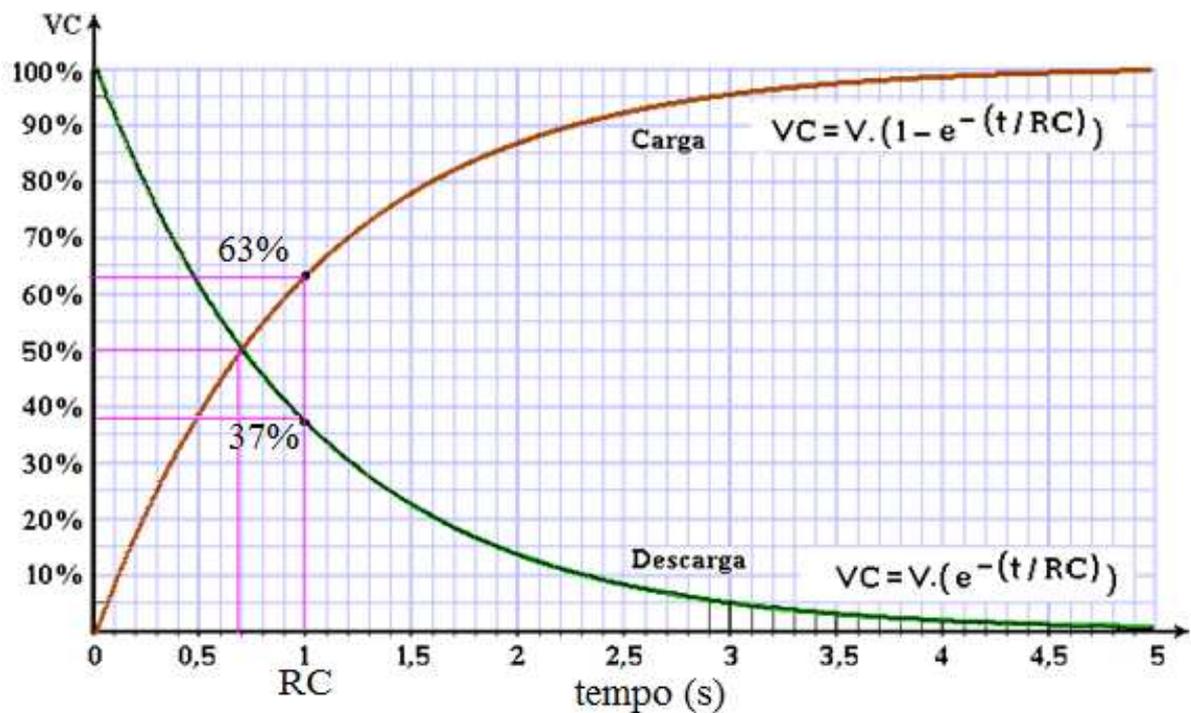


Figura 5-2: V vs t nas duas situações de carga e descarga do capacitor C.

Obs: A resolução da equação diferencial acima será vista em curso específico de equações diferenciais. Preocupe-se apenas em entender o processo que levou à obtenção da equação e sua solução final. Você fará uso dela no experimento. É importante ler livro texto para uma análise mais completa dos processos de carga e descarga em um circuito RC, bem como das equações que regem os mesmos.

Você fará medidas com um multímetro usado como voltímetro DC. Este voltímetro não é perfeito. A sua resistência não é infinita apesar de grande. Como ele interferirá em suas medidas?

Simbolizando o voltímetro pelo circuito equivalente mostrado na Figura 5-3.

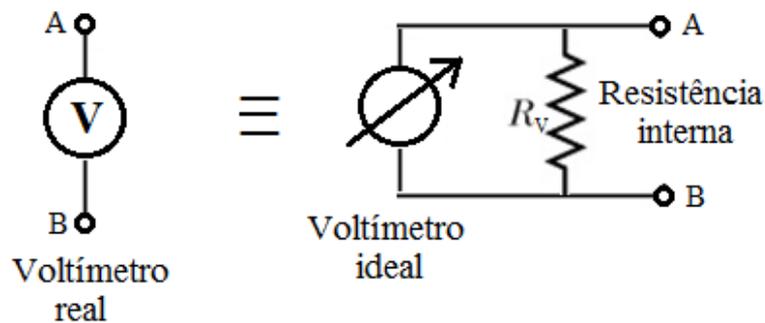


Figura 5-3: Voltímetro real

Para a descarga do capacitor na Figura 5-4, o capacitor se descarrega sobre o resistor R conhecido e sobre a resistência interna do medidor, associadas em paralelo:

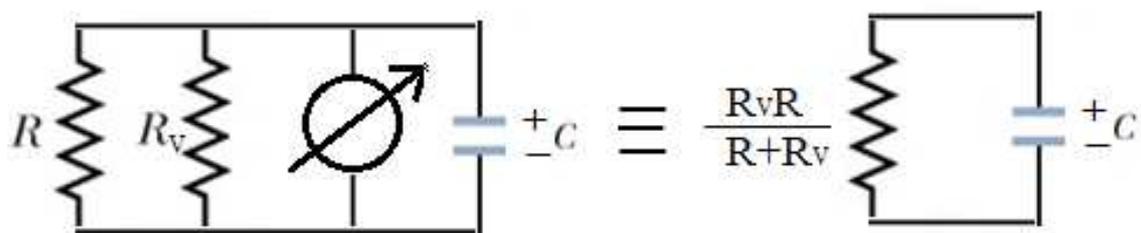


Figura 5-4: descarga em R e em R_v .

e neste caso a constante de tempo que obtemos é igual a:

$$\tau_{d1} = \frac{RR_v}{R + R_v} C \quad (14)$$

Para a carga do capacitor o circuito real é mostrado na Figura 5-5:

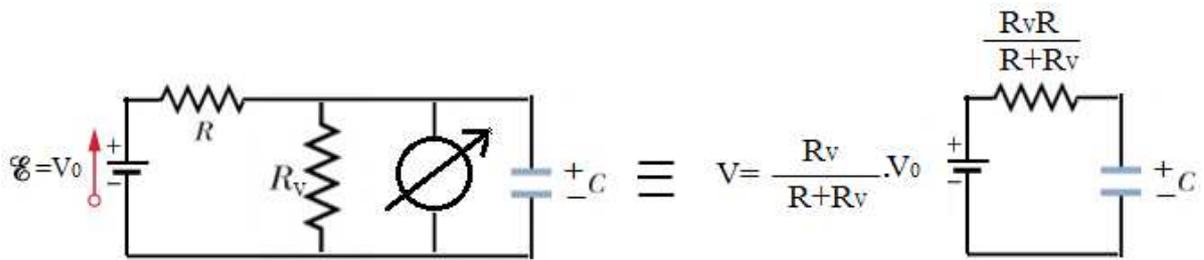


Figura 5-5: Carga

e, se a resistência interna da fonte é pequena ou seja, se ela é desprezível diante de R . Temos a constante de tempo τ_c igual a τ_{d1} , logo:

$$\tau_c = \frac{RR_v}{R + R_v} C \quad (15)$$

Para a descarga do capacitor na Figura 5-6, o capacitor se descarrega somente sobre a resistência R_v do medidor:

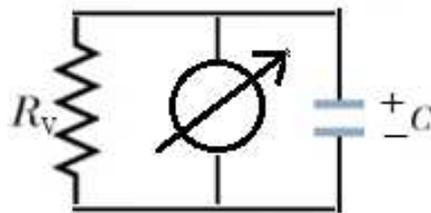


Figura 5-6: Descarga somente em R_v .

e a constante de tempo será:

$$\tau_{d2} = R_v C \quad (16)$$

5.3 MATERIAIS

- Protoboard
- Resistor de 1 M Ω e 10 Ω
- Capacitor 47 μ F
- Multímetro Digital (Voltímetro)
- Fonte de Alimentação de Corrente Contínua
- Interruptor com ação de cotovelo
- Cabos (4 banana/banana, 2 banana/jacaré) e Fios
- Cronômetro Digital

5.4 MEDIDAS

TENHA ATENÇÃO AOS CUIDADOS BÁSICOS NA UTILIZAÇÃO DOS MEDIDORES. NÃO GIRE A CHAVE SELETORA DE FAIXAS DO MULTÍMETRO QUANDO O MESMO ESTIVER CONECTADO AO CIRCUITO, ENTRE MEDIDAS DESLIGUE A ALIMENTAÇÃO E O DESCONECTE. CERTIFIQUE-SE DE QUE A SELEÇÃO DA ESCALA ESTEJA CORRETA, ISTO É: MEDIDA DE TENSÃO CONTÍNUA. TENHA ATENÇÃO PARA TRANSFERIR CORRETAMENTE OS VALORES LIDOS PARA A FOLHA DE DADOS: A ESCALA UTILIZADA, ALGARISMOS SIGNIFICATIVOS, QUANTIDADE DE DÍGITOS APÓS A VÍRGULA EM CADA ESCALA.

NÃO LIGAR O CIRCUITO ANTES QUE O PROFESSOR CONFIRA AS LIGAÇÕES!

Procedimento 1 – Identificação dos componentes

1. Reconheça os capacitores e anote: valores nominais (C), polarização, valores máximos de ddp (V_C). Nunca ultrapasse a tensão máxima indicada no corpo do capacitor, pois pode danificá-lo de maneira irreversível. Para medir a Capacitância com o multímetro e/ou com medidor RC digital, certifique-se que o capacitor a ser testado esteja descarregado. Para descarregar um capacitor, deve-se ligar um resistor de 100 ou 10 Ω entre os seus terminais (quando se coloca os seus terminais diretamente em curto-circuito, podem ocorrer danos ao dielétrico do mesmo). Utilize a função de medida de tensão DC do voltímetro para confirmar que o capacitor esteja descarregado.

2. Leia o valor nominal da resistência (código de cores) e anote.

3. Para $C=47 \mu\text{F}$ avalie e anote o produto $\tau=RC$. Considere que vocês terão que levantar um gráfico de valores de tensão sobre o capacitor para alguns valores de tempo de carga e descarga (Figura 5-2), tempo RC curto o que dificulta a aquisição de pontos suficientes para o gráfico. Para valores de capacitância em farad (F) e resistência em ohms (Ω) o produto RC é dado em segundos (s).

Procedimento 2 – Tempo capacitivo τ de carga e descarga

6. Armem o circuito cc da Figura 5-7 na matriz de contato, observando a polaridade do capacitor (inicialmente descarregado) e usando a resistência $R=1 \text{ M}\Omega$.

7. Use tensão máxima na fonte igual a 10 V (verifique se este valor se enquadra ao valor máximo de potencial suportado pelo capacitor)

8. Com a chave em 3, meça este valor entre os pontos E e D com o multímetro na função voltímetro (chave seletora na faixa V_ 20) e anote na folha de dados (V_{ED}).

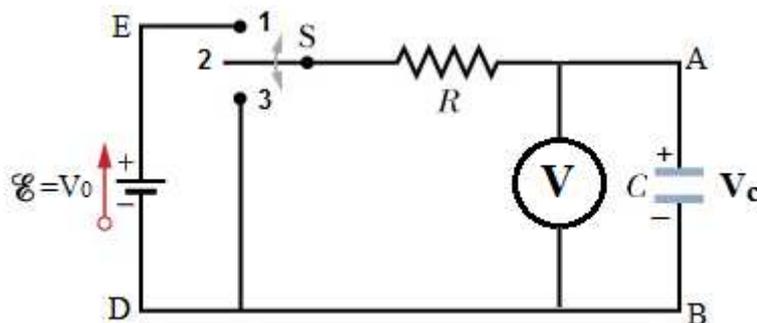


Figura 5-7: Carga e descarga

9. Com a chave em 1 e o voltímetro ligado entre os pontos A e B, meça o valor máximo da tensão entre esses pontos. Espere o tempo suficiente para a tensão se estabilizar, pois o capacitor está sendo carregado.

10. Anote a tensão máxima no capacitor $V_{AB}=V_C$ estabilizada.

11. Preparem-se para fazer a medida da constante de tempo de descarga τ_{d1} : um cronômetro deverá ser controlado e anotado o tempo para um valor de ddp específico. A tensão mudará de forma rápida e não gradativa. Para acionar o cronômetro pressione [MODE] até selecionar o modo cronômetro (Chrono). Pressione [START/STOP] para iniciar a contagem do cronômetro e novamente para pausar o cronômetro (Pause). Aperte [START/STOP] novamente para finalizar (End). Depois de

finalizada a cronometragem, pressione durante 2 segundos o botão [SPLIT/RESET] para excluir os dados (Clear all).

12. Meça então, com o cronômetro a constante de tempo de descarga τ_{d1} que é o tempo necessário para a tensão cair a 37% do valor máximo. Para isto, coloque rapidamente a chave em 3 (neste momento o capacitor começa a ser descarregado em R) e simultaneamente, acione o cronômetro.

13. Ao terminar esta medida, deixe o capacitor descarregando por um tempo maior que $5\tau_{d1}$ ou descarregue-o com a resistência de 10Ω .

14. Com a chave novamente em 1, conjuntamente acione o cronômetro para medir a constante de tempo de carga τ_c , que é o tempo necessário para a tensão se elevar até 63% do seu valor máximo. Em seu relatório compare com o valor de τ_{d1} . Após esta medida, deixe o capacitor carregar-se totalmente.

15. Meça agora com o cronômetro a constante de tempo de descarga τ_{d2} necessária para que o capacitor descarregue a 37% de seu valor máximo sobre a resistência interna R_V do medidor. Para isto, coloque a chave em 2 (chave aberta) e dispare simultaneamente o cronômetro. Em seu relatório compare com o valor encontrado para τ_{d1} , justifique a diferença encontrada.

Procedimento 3 – Carga do capacitor

15. Preparem-se para fazer a medida: alguém terá que, simultaneamente, monitorar o multímetro e controlar o cronômetro para certificar que se faça a medida de tempo em intervalos de ddp regulares. O cronometro utilizado tem opção de armazenar dados de cronometragem. Para isto: inicie a cronometragem pressionando [START/STOP] e para cada ddp específica pressione o botão [SPLIT/RESET]. O tempo para cada ddp específica será gravado e aparecerá no display durante 2 segundos, enquanto o tempo continua a correr. Para finalizar aperte duas vezes [START/STOP] (Pause) (End) e para salvar os dados pressione por 2 segundos o botão [START/STOP] (Store data). Outra opção é filmar simultaneamente a cronometragem e o voltímetro com o celular na função câmera filmadora, desde que este tenha a opção de assistir ao vídeo e pausar, assim os valores serão anotados na folha de dados até o final do experimento.

16. Certifique-se que o capacitor está descarregado antes de colocar a chave em 1 e obtenha medidas de tempo de carga para valores de ddp em 0,50 em 0,50 V até o capacitor atingir 8,50 V. (coloque a chave em 1 e conjuntamente acione o cronômetro).

17. Para anotar os dados armazenados no cronometro: pressione [MODE] até selecionar o modo Registros de Cronometragem (Chrono Data). Pressione [SPLIT/RESET] para selecionar o número do registro (Run 01). Pressione [START/STOP] para visualizar os dados do registro selecionado. Pressione [START/STOP] para ver as estatísticas do registro selecionado, uma por uma, na seguinte ordem: tempo de cada uma das voltas (Lap-001, Lap-002,...), tempo total percorrido, volta mais rápida e tempo médio das voltas. Anote na folha de dados o tempo de cada uma das voltas para cada ddp específica. Some para obter os tempos parciais para cada ddp.

18. Pressione o botão [SPLIT/RESET] durante 2 segundos para apagar o registro selecionado.

Procedimento 4 – Descarga do capacitor

1. Certifique-se que o capacitor está carregado (espere tempo suficiente para a tensão se estabilizar).

2. Preparem-se para fazer as medidas, coloque a chave em 3 para que o capacitor se descarregue sobre a resistência R e em R_V , com o voltímetro medindo a ddp sobre o capacitor meça agora medidas de tempo de descarga para valores de ddp em 0,50 em 0,50 V até o capacitor atingir 0,50 V (simultaneamente, coloque a chave em 3 e acione o cronômetro).

3. Anote na folha de dados o tempo total percorrido para cada ddp específica.

Instruções específicas para este relatório

(verificar também as instruções gerais, já divulgadas)

- Apresentar o valor nominal do capacitor, especificando também o valor da ddp máxima a que ele pode ser submetido.
- Apresentar a dedução do comportamento de carga e descarga do capacitor num circuito RC (regime DC).
- Esquematizar os circuitos (carga e descarga) indicando os pontos de medida em cada caso. Explique como foi feito o processo de carga do capacitor antes da descarga.
- A partir das medidas de tensão entre A e B e entre E e D calcule o valor da resistência interna R_V do multímetro.
- Das medidas das constantes de tempo τ_{d1} e τ_{d2} calcule o valor de R_V . Compare com o valor calculado de R_V do item anterior.
- Trace os gráficos de ddp vs tempo, em papel milimetrado para a carga e descarga. Construa de tal modo que as duas curvas sejam colocadas no mesmo gráfico. Discuta os comportamentos encontrados e determine o valor experimental da constante de tempo RC (ver Figura 5-2).
- Trace o gráfico ddp vs tempo em papel monolog para a descarga. A partir deste gráfico calcule o valor experimental da capacitância C. Levando em consideração que o valor de R_V (resistência interna do voltímetro), na escala de 20 volts cc para o multímetro utilizado é de $10\text{ M}\Omega$ (ou utilize o valor calculado anteriormente). Compare C com o indicado no próprio capacitor e o medido com o multímetro e/ou medidor RC digital.
- Os dados colocados no gráfico devem ser também apresentados em tabela
- Discutir os resultados.
- Discuta e avalie os erros sobre todas as medidas e cálculos efetuados.

EXPERIMENTO 6: OSCILOSCÓPIO DIGITAL – MEDIDAS ELÉTRICAS

Nesse experimento você aprenderá os princípios básicos de funcionamento e manuseio de um osciloscópio digital e realizará medidas simples de sinais de tensão elétrica (d.d.p.).

6.1 OBJETIVOS

Familiarização com o osciloscópio, equipamento de importância fundamental em medidas físicas.

6.2 OSCILOSCÓPIO

O osciloscópio é um instrumento de medida que torna possível visualizar uma diferença de potencial elétrico (sinal de tensão, sinal ou tensão) em uma tela ou anteparo através do deslocamento de um ponto luminoso. Esse deslocamento do ponto luminoso na tela é diretamente proporcional à diferença de potencial aplicada entre os terminais ou conectores na entrada desse instrumento. O ponto luminoso pode deslocar-se tanto na vertical quanto na horizontal de modo independente, sendo possível também o deslocamento simultâneo (composição de movimentos).

O osciloscópio possui duas entradas de sinais que podem ser configuradas como uma entrada vertical e uma entrada horizontal; cada entrada é composta por dois terminais. Para uma d.d.p. nula nas entradas podemos ajustar o osciloscópio para que o ponto luminoso fique centralizado na tela (origem de um sistema cartesiano). Se em seguida alterarmos a d.d.p. para um valor diferente de zero e constante no tempo, em qualquer das duas entradas, observaremos que o ponto luminoso se deslocará do centro de acordo com o valor da d.d.p. e da entrada utilizada. Por exemplo, uma d.d.p. positiva de valor 3 volts aplicada à entrada vertical produzirá um deslocamento para cima no ponto luminoso. Se duplicarmos a d.d.p. para 6 volts observaremos o dobro do deslocamento para cima. Valores negativos de d.d.p., nessa mesma entrada, produzirão o deslocamento para baixo. De modo semelhante, valores positivos aplicados à entrada horizontal produzirão o deslocamento para a direita enquanto que valores negativos produzirão deslocamento para a esquerda. Em resumo, as diferenças de potenciais aplicadas às entradas funcionam como as coordenadas cartesianas do ponto luminoso na tela do osciloscópio.

Como vimos, sinais (d.d.p.) constantes no tempo produzirão deslocamentos também constantes. Caso os sinais variem no tempo, observaremos o ponto luminoso movimentando-se na tela e se essa variação for lenta conseguiremos acompanhar o

movimento do ponto luminoso com os olhos. Se a variação for muito rápida teremos a sensação de um risco ou uma linha na tela devido a persistência do material da tela e da retina (sistema visual).

Sinais variáveis no tempo aplicados simultaneamente nas duas entradas (vertical e horizontal) aparecerão na tela formando figuras. A visualização as medidas e a análise dessas figuras é que fazem do osciloscópio um instrumento de extrema utilidade e importância.

6.3 MATERIAIS

- Osciloscópio Digital
- Multímetro (Voltímetro)
- Gerador de Funções Digital
- Fonte de Alimentação de Corrente Contínua
- Ponta de Prova e Cabos (BNC/jacarés, 2 banana/banana)

I. OSCILOSCÓPIO

Características

O osciloscópio Tektronix Série TDS 1001B possui faixa de frequência DC - 40 MHz, com máxima sensibilidade de 2 mV a 5 V/DIV e máximo tempo de varredura de 10 ns/DIV. A tensão de entrada (sinal elétrico/analógico) é digitalizada (convertido para números) por um conversor analógico-digital, veja esquema da Figura 6-1. O sinal digital é agora utilizado para criar um conjunto de informações que é armazenado na memória de um microprocessador. O conjunto de informações é processado e então enviado para a tela. Nos osciloscópios analógicos, isto se dá através de um tubo de raios catódicos; porém, nos osciloscópios digitais é através de uma tela LCD.

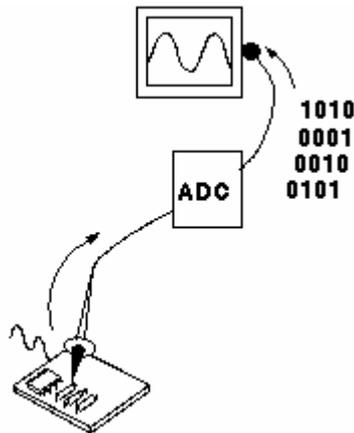


Figura 6-1: Esquema de funcionamento osciloscópio digital

O Tektronix TDS 1001B apresenta dois canais, isto é, pode-se observar até dois sinais distintos simultaneamente. Para isso, possui duas entradas verticais (cana 1 e canal 2) separadas com os respectivos ajustes de ganho dos amplificadores (sensibilidade). Essas duas entradas também podem ser utilizadas como entrada horizontal e vertical (X-Y), sendo necessário acionar a função que comuta para esse tipo de operação (no MENU do botão DISPLAY). Utilizaremos apenas os recursos básicos, portanto não se assuste com a quantidade de botões que ele apresenta. Cada um tem uma finalidade específica, mas nem todos serão utilizados. Durante a realização das medidas você aprenderá a usá-los.

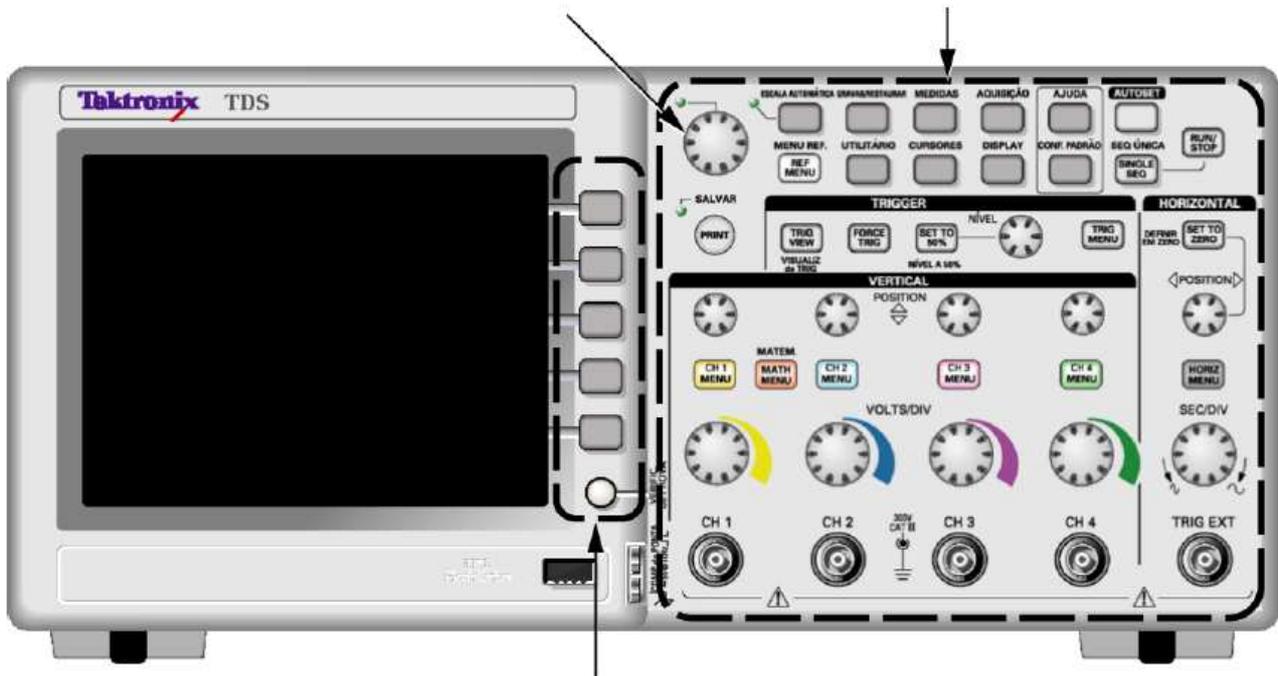
OBS: O OSCILOSCÓPIO É UM INSTRUMENTO DELICADO QUE DEVE SER MANUSEADO COM CUIDADO. NÃO ENCOSTE A PONTA DO LÁPIS OU DA CANETA NA TELA PARA NÃO RISCÁ-LA. NÃO FORCE OS BOTÕES DE CONTROLE ALÉM DA POSIÇÃO MÁXIMA E, PARA EVITAR O DESGASTE PREMATURO, NÃO ACIONE OS CONTROLES SEM NECESSIDADE. PENSE SEMPRE NO QUE É NECESSÁRIO AJUSTAR ANTES DE FAZÊ-LO. EM TODO CASO, VOCÊ DEVE AGIR COM DELICADEZA. ISTO TAMBÉM VALE PARA A PONTA DE PROVA.

A Figura 6-2 mostra o painel frontal do equipamento modelo de quatro canais. Este painel está dividido em áreas funcionais com diversos controles. Não há necessidade de memorizá-los, o uso tornará isso uma coisa automática, mas procure compreender o que faz cada controle.

A seguir são apresentadas, com mais detalhes, algumas das áreas do painel frontal:

Botão giratório com múltiplas funções

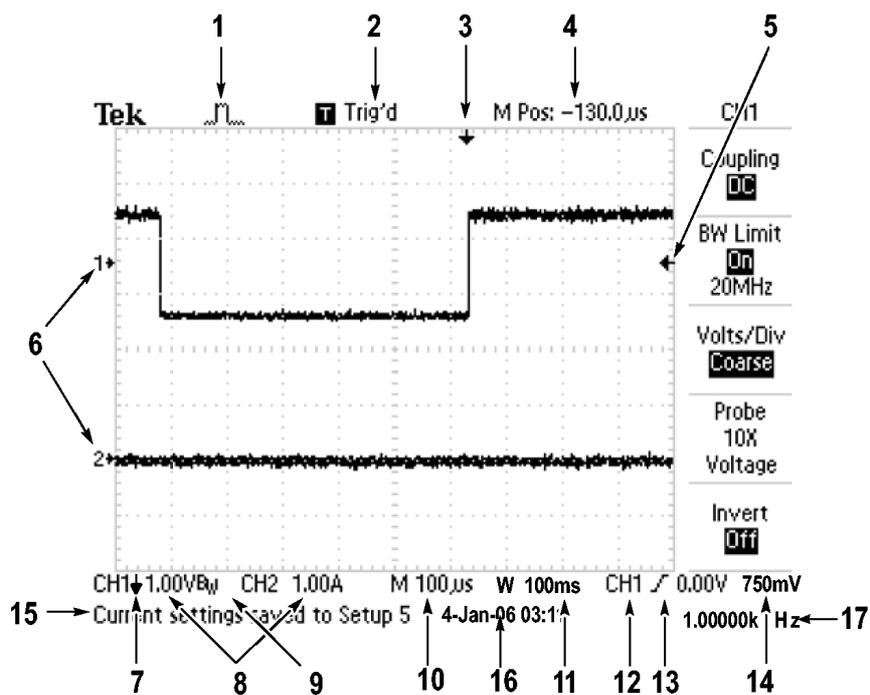
Botões do painel frontal e rótulos dos botões — todos em letras maiúsculas



Botões de opção — aparecem com a primeira letra de cada palavra na tela em maiúscula

Figura 6-2: Painel frontal do osciloscópio Tektronix Série TDS (o modelo do laboratório possui 2 canais).

ÁREA DE DISPLAY



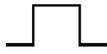
1. O ícone do display exibe o modo de aquisição:



Modo Amostra



Modo Detecção de Pico



Modo Média

2. O status do trigger indica o seguinte:



Armed O osciloscópio está adquirindo dados de pré-trigger. Todos os triggers são ignorados nesse estado.



Ready. Todos os dados do pré-trigger foram adquiridos e o osciloscópio está pronto para aceitar um trigger.



Trig'd. O osciloscópio identificou um trigger e está adquirindo dados pós-trigger.



Stop. O osciloscópio parou de adquirir os dados da forma de onda.



Acq. Complete O osciloscópio completou uma aquisição de Sequencia Única.



Auto. O osciloscópio está no modo auto e está adquirindo as formas de onda na ausência de triggers.



Scan. O osciloscópio está adquirindo e exibindo continuamente os dados da forma de onda no Modo de digitalização.

3. O marcador exibe a posição do trigger horizontal. Para ajustar a posição do marcador, gire o botão HORIZONTAL POSITION.

4. A leitura mostra o tempo na graticula central. O tempo do trigger é zero.

5. O marcador mostra o nível do trigger Borda ou Largura de Pulso.

6. Os marcadores na tela exibem os pontos de referência do terra das formas de onda exibidas. Se não houver marcador, o canal não será exibido.

7. Um ícone de seta indica que a forma de onda é inversa.

8. A leitura mostra os fatores da escala vertical dos canais.

9. O ícone A BW indica que o canal é limitado por largura de banda.

10. A leitura mostra a configuração da base de tempo principal.

11. A leitura mostra a configuração da base de tempo da janela, se estiver em uso.

12. A leitura mostra a origem do trigger usada para execução do trigger.

13. O ícone mostra o tipo de trigger selecionado da seguinte maneira:



Trigger de Borda para a borda de subida.

Trigger de Borda para a borda de descida.

Trigger de vídeo para o sincronismo de linha.

Trigger de vídeo para o sincronização de campo.

Trigger de largura de pulso, polaridade positiva.

Trigger de largura de pulso, polaridade negativa.

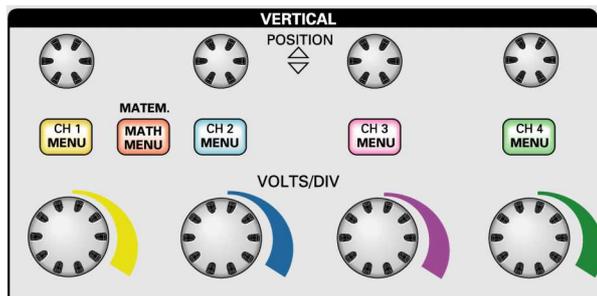
14. A leitura mostra o nível de trigger Borda ou Largura de Pulso.

15. A área do display mostra mensagens úteis; algumas delas são exibidas somente durante três segundos. Se você recuperar uma forma de onda salva, a leitura exibirá informações sobre a forma de onda de referência, como RefA 1,00V 500µs.

16. A leitura mostra data e hora.

17. A leitura exibe a frequência do trigger.

CONTROLES VERTICAIS



(Todos os modelos, quatro canais mostrados)

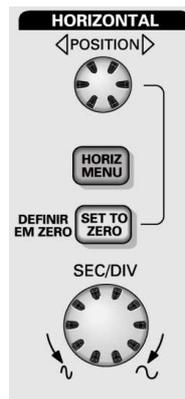
POSITION (CH1, CH 2, CH 3 & CH 4). Posiciona uma forma de onda verticalmente.

CH 1, CH2, CH 3 & CH 4 MENU. Exibe as seleções verticais do menu e alterna a exibição da forma de onda do canal entre ativada e desativada.

VOLTS/DIV (CH 1, CH 2, CH 3 & CH 4). Seleciona fatores de escala verticais.

MATEM. Exibe o menu de operações matemáticas de forma de onda e alterna a exibição da forma de onda matemática entre ativada e desativada.

CONTROLES HORIZONTAIS



(Modelo de dois canais)

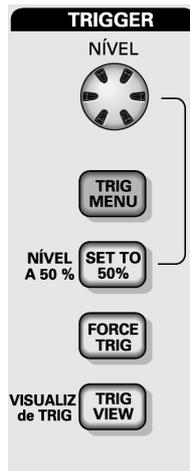
POSIÇÃO. Ajusta a posição horizontal de todas as formas de onda matemáticas e de canal. A resolução deste controle varia com a configuração da base de tempo.

HORIZ MENU. Exibe o Menu Horizontal.

DEFINIR EM ZERO. Define a posição horizontal para zero.

SEC/DIV. Seleciona o tempo/divisão horizontal (fator de escala) para a base de tempo principal ou da janela. Quando a Área da Janela estiver ativada, ela altera a largura da área da janela ao mudar a base de tempo da janela.

CONTROLES DE TRIGGER



NÍVEL. Quando você usa um trigger Borda ou Pulso, o botão NÍVEL define qual nível de amplitude o sinal deve cruzar para adquirir uma forma de onda.

TRIG MENU. Exibe o Menu Trigger.

DEFINIR EM 50%. O nível de trigger é definido como o ponto médio vertical entre os picos do sinal de trigger.

FORCE TRIG. Completa uma aquisição, independentemente de um sinal de trigger adequado. Esse botão não tem efeito se a aquisição já estiver parada.

VISUALIZ de TRIG. Exibe a forma de onda do trigger em vez da forma de onda do canal enquanto você pressiona e mantém o botão VISUALIZ de TRIG pressionado. Essa visualização mostra como as configurações de trigger afetam o sinal de trigger, como o acoplamento de trigger.

BOTÕES DE MENU E DE CONTROLE

Botão giratório com múltiplas funções



Botão giratório com múltiplas funções. A função é determinada pelo menu exibido ou pela opção de menu selecionada. Quando ativo, o LED adjacente acende.

AUTORANGING. Exibe o menu Autorange e ativa ou desativa a função de Autoranging. Quando a Autoranging está ativa, o LED adjacente acende.

SALVAR/RECUPERAR. Exibe o Menu Salvar/Recuperar para configurações e formas de onda.

MEDIDAS. Exibe o menu de medições automatizadas.

AQUISIÇÃO. Exibe o Menu Aquisição.

MENU REF. Exibe o Menu Ref para mostrar ou ocultar rapidamente formas de onda de referência armazenadas na memória não volátil do osciloscópio.

UTILITÁRIO. Exibe o menu Utilitário.

CURSOR. Exibe o Menu Cursores. Os cursores permanecem visíveis (a menos que a opção Tipo esteja definida para Deslig.) após sair do menu Cursores, mas não são ajustáveis.

DISPLAY. Exibe o Menu Display.

AJUDA. Exibe o menu Ajuda.

CONFIG. PADRÃO. Restaura a configuração de fábrica.

AUTOSET. Ajusta automaticamente os controles do osciloscópio de modo que produzam uma exibição utilizável dos sinais de entrada.

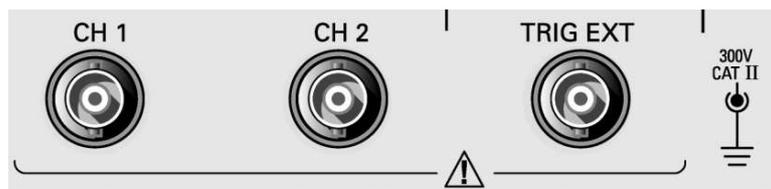
SEQ ÚNICA. Adquire uma forma de onda única e pára.

RUN/STOP. Adquire continuamente formas de onda ou interrompe a aquisição.

PRINT. Inicia a operação de impressão em uma impressora PictBridge compatível ou executa a função SALVAR na USB flash drive.

SALVAR. Um LED indica quando o botão PRINT está configurado para gravar dados na USB flash drive.

CONECTORES DE ENTRADA



CH 1, CH 2, CH 3 & CH 4. Conectores de entrada para exibição de forma de onda.

TRIG EXT. Conector de entrada de uma origem de trigger externo.

Utilize o menu Trigger para selecionar a origem do trigger Ext ou Ext/5. Pressione e mantenha pressionado o botão VISUALIZ TRIG para ver como as configurações de trigger afetam o sinal de trigger como, por exemplo, o acoplamento de trigger.

II. GERADOR DE FUNÇÕES

O gerador é um equipamento capaz de produzir uma d.d.p., variável no tempo na forma de uma função periódica que pode ser escolhida entre uma função senoidal, uma função triangular e uma função retangular (pulsos). A Figura 6-3 mostra o aspecto do painel frontal do gerador. A seleção da função se faz pela utilização das chaves FUNCTION (4) na parte inferior do painel do instrumento. As formas de onda de saída são: senoidal, triangular ou quadrada. A faixa de frequência é selecionada através das chaves FREQUENCY RANGE (3) e a frequência de saída é controlada pelo dial FREQUENCY (7).

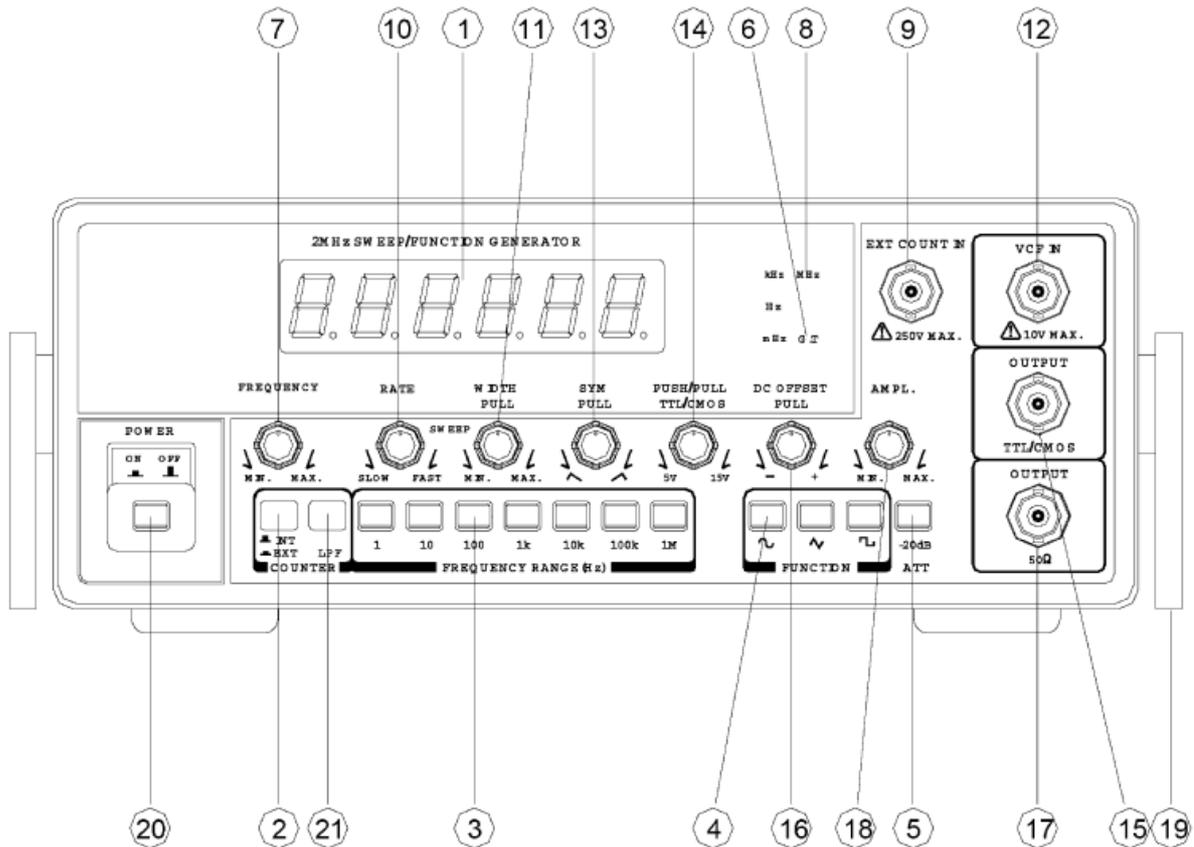


Figura 6-3: Painel frontal do gerador de função digital utilizado.

De modo bastante simplificado, um gerador é constituído por um oscilador de frequência ajustável, seguido de um amplificador de ganho variável. Assim consegue-se um sinal de saída onde se pode variar à vontade a frequência e a amplitude.

6.4 MEDIDAS

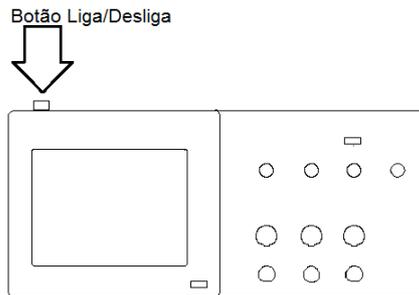
Agora você aprenderá a manusear o osciloscópio e a efetuar medidas elétricas. Anote todos os ajustes em folha de dados apropriada.

O painel do osciloscópio está dividido em duas colunas maiores. A esquerda está a tela e os botões de opção de MENU. Na coluna da direita encontram-se os botões do painel frontal: os primeiros são botões de Menu e de CONTROLE, logo abaixo dele situam-se os botões TRIGGER (controles de gatilhamento e sincronismo) e abaixo do TRIGGER encontram os botões denominados VERTICAL (controles dos canais 1 e 2) e à direita deles os botões HORIZONTAL (controles de varredura).

I) PRIMEIROS AJUSTES

A finalidade desse item é ajustar o osciloscópio para que o ponto luminoso apareça

posicionado no centro da tela. Ligue o osciloscópio, se já não estiver ligado, e espere um minuto.



Siga as instruções para o preparo de primeiros ajustes das entradas verticais CH1 e CH2. Nos botões de menu e de controle clique em **AUTOSET** (automático) clique em **CH1MENU** e nos botões de menu clique em “**Acoplam**” na tela e altere entre “**CC**”, “**CA**” e “**Terra**” para selecionar “**Terra**”. Faça o mesmo para o **CH2MENU**. Desta forma a ddp será nula nas entradas dos dois canais. Ajuste o botão giratório tempo de varredura (**SEC/DIV**) em 1,0 ms/divisão (verifique o valor no meio inferior da tela). Deverão aparecer um ou dois traços horizontais na tela. Para distinguir os traços você pode posicioná-los na tela girando os botões de posicionamento VERTICAL (**POSITION**). Caso não apareçam os traços e os números 1 e/ou 2 no lado esquerdo da tela clique mais uma vez nos botões **CH1MENU** e/ou **CH2MENU** respectivamente, confira novamente os passos anteriores, se necessário chame o professor.

Cada traço desses corresponde à varredura de um canal. Ela é muito rápida, por isso você não consegue ver o ponto se movimentando na tela.

Agora, altere o tempo de varredura (**SEC/DIV** ~5,00 s), girando no sentido anti-horário, aos poucos, até que você possa perceber o ponto se movimentando na tela. Você agora deverá conseguir acompanhar a varredura da esquerda para a direita com velocidade constante.

Para facilitar o estudo vamos trabalhar, por enquanto, apenas com o canal 2. Para isso, clique duas vezes em **CH1MENU**, deverá ficar apenas o movimento correspondente ao canal 2 (CH2). Posicione esse movimento na metade vertical. Nos botões de menu aperte a tecla **DISPLAY** e selecione na tela **Formato** ⇒ **XY** (correspondente ao tempo de varredura). O ponto deverá parar.

Nessa configuração, a entrada do canal 1 (CH1) será correspondente ao eixo x e a entrada do canal 2 (CH2) será correspondente ao eixo y.

Posicione o ponto no centro da tela, utilizando os controles **POSITION** do canal 2 e **POSITION** do canal 1.

II) OBSERVAÇÃO DO DESLOCAMENTO DO PONTO LUMINOSO COM A D.D.P. APLICADA

Ajuste o botão giratório da sensibilidade vertical (**VOLTS/DIV**) do canal 2 para 1 volt/divisão. Configure a ponta de prova P2220 (cabo coaxial) para 10X e com cuidado conecte-a ao canal 2 no osciloscópio: para isto, alinhe o conector BNC da ponta de prova com o BNC do CH 2, pressione para conectar e atarraxe para a direita para travar a sonda no lugar. Através dos cabos de ligação (ou protoboard, se for o caso), conecte a entrada desse canal à fonte de alimentação. Positivo da fonte na ponta da sonda e negativo da fonte no fio de referência (jacaré - Terra). Neste momento o canal 1 deverá estar aterrado (**MENUCH1** ⇒ **Acoplam** ⇒ **Terra**). Pressione **CH2MENU** ⇒ **Sonda** ⇒ **Voltagem** ⇒ **Atenuação** ⇒ **10x**. Coloque 3 V na fonte de alimentação. Verifique no menu do canal se o **Inverter** está desligado (**DESL**). Desligue o terra do canal 2 apertando **CH2MENU** ⇒ **Acoplam** ⇒ **CC** (desta forma você estará inserindo uma ddp positiva no valor de 3 V à entrada deste canal). O ponto luminoso deverá se deslocar algumas divisões na tela. Anote, na folha de dados, quantas divisões (DIV) ele se deslocou e em que direção. Note que a tela é dividida em 8 divisões na vertical e 10 na horizontal e cada divisão por sua vez equivale a 5 subdivisões. Qual é o erro avaliado nesta medida, $(DIV \pm \Delta DIV)$?

Inverta a polaridade da fonte (troque as posições dos fios) e observe o deslocamento do ponto luminoso. Anote o observado. Ao terminar, leve a chave de entrada desse canal, de volta para **Terra**.

Repita os mesmos passos utilizando agora o canal 1 como entrada do sinal (1 VOLTS/DIV) que estará atuando como eixo x. Observe o deslocamento na horizontal. Ao terminar, leve a chave de entrada desse canal de volta para **Terra**.

III) OBSERVAÇÃO DOS SINAIS FORNECIDOS PELO GERADOR DE FUNÇÃO

Ligue o gerador de função, nos botões 4 (Figura 6-3) selecione a função senoidal, ajuste a frequência (7) em qualquer valor entre 0,5 e 1 Hz (altere as teclas (3), se necessário) e gire o controle de amplitude (18) para a metade do valor máximo.

Verifique se o ponto luminoso está no centro da tela, corrigindo se for necessário. Através de cabo BNC/jacaré conecte o gerador OUTPUT 50 Ω (17) à entrada do canal 2 (eixo y) e selecione no menu desse canal o acoplamento **CC** (desliga-se o **Terra**).

Ajuste a sensibilidade vertical **VOLTS/DIV** para que o deslocamento do ponto luminoso não ultrapasse os limites da tela. Observe atentamente o movimento do

ponto. Você consegue perceber que o deslocamento é função senoidal do tempo e em que região a velocidade é máxima? Observe as inversões de movimento nos extremos. Anote o observado.

Mude para a função triangular (4) no gerador. Observe o movimento. Você consegue perceber que a velocidade é constante (função linear) até atingir os extremos? Observe as inversões de movimento e compare com o caso senoidal (diminua a frequência se for necessário).

Mude para a função quadrada e observe. Ao terminar mude **CH2MENU** ⇒ **Acoplam** ⇒ **Terra**.

Vamos agora sair do modo X-Y e voltar ao modo de varredura automática. Em **DISPLAY** selecione **Formato** ⇒ **YT** e ajuste o tempo de varredura (**SEC/DIV**) em ≈100 ms/divisão.

Desative o canal 2 se estiver ativado (coloque em **Terra**). Conecte a sonda (com o sinal do gerador de função) à entrada do canal 1, com os mesmos ajustes de frequência e amplitude do modo senoidal anterior e pressione **CH1MENU** ⇒ **Sonda** ⇒ **Voltagem** ⇒ **Atenuação** ⇒ **10x** selecione o menu desse canal para a posição **CC** para que possamos utilizá-lo como eixo y. Ajuste a sensibilidade vertical para que a senóide resultante não ultrapasse os limites da tela na vertical e a taxa de varredura para observar alguns períodos da senóide na tela.

Como a frequência é muito baixa, a figura poderá estar se movendo na tela, devido a uma possível falta de sincronismo automático que ocorre para frequências muito baixas.

Para facilitar a visualização aumente bastante a frequência (faixa do kHz) do gerador ao mesmo tempo em ajusta o tempo de varredura para manter a senóide visível e estável.

Observe as outras funções do gerador (triangular e quadrada) e volte para a função senoidal em seguida.

IV) MEDIDA DE FREQUENCIA

Ajuste o gerador para 2,0 kHz e o tempo de varredura de modo a observar 1 ou 2 períodos na tela. Meçam na tela quantas divisões (DIV) ocupa um período (1 divisão=5 subdivisões). Observe (Figura 6-4) que é melhor medir o período entre os pontos A e B que entre C e D em virtude dos pontos serem mais bem definidos, uma vez que correspondem à interseção com o eixo e não um ponto de tangência. A medida deve ser efetuada estimando-se um erro igual à metade da subdivisão.

Note que para uma melhor definição dos pontos A e B, aumente a sensibilidade vertical para obter uma figura de grande amplitude na tela do osciloscópio.

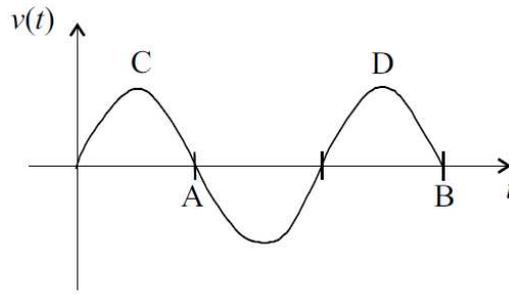


Figura 6-4: Sinal alternado para a medida da frequência.

Anote o tempo de varredura (SEC/DIV) que se encontra no meio inferior da área do display. Para o relatório: multiplique o número de divisões do período pelo tempo de varredura para obter o período temporal T. Calcule também o seu erro propagado (ΔT). Calcule a frequência (em kHz) e o seu erro propagado (Δf). Anote o valor da frequência indicada no display do gerador (para comparar com o valor calculado) lembrando-se que este também não é perfeito. Não desligue o gerador.

V) MEDIDA DE AMPLITUDE DOS SINAIS SENOIDAL E QUADRADO

Ajuste a amplitude do sinal do gerador em direção de amplitude máxima (mas que não produza distorção no sinal) e a sensibilidade vertical do osciloscópio para obter a maior senóide possível, sem ultrapassar os limites da tela. Desloque a senóide para baixo (**POSITION**) até que sua parte mais baixa tangencie a linha inferior da graduação da tela. Desloque agora na horizontal (**POSITION**) de modo que a crista corte o eixo vertical central subdividido. Meça o valor pico a pico do sinal (do pico inferior ao pico superior na **vertical!**) em termos de divisões na tela, estimando o erro de metade da subdivisão. Anote a sensibilidade **VOLTS/DIV** (canto esquerdo inferior Área do display (8)). Para o relatório: multiplique o número de divisões pela sensibilidade para obter o valor de tensão pico a pico e calcule o erro ($V_{pp} \pm \Delta V_{pp}$). A amplitude vale metade desse valor. Calcule o valor eficaz $V_{ef} = \frac{V_{pp}}{\sqrt{2}}$ e seu erro $\pm \Delta V_{ef}$.

Selecione no gerador a função quadrada e refaça essas mesmas medidas (nesse caso $V_{ef} = \frac{V_{pp}}{2}$). Por quê? Desligue e desconecte o gerador. Aterre o acoplamento do canal 1.

VI) MEDIDA DE TENSÃO CONTÍNUA

Você agora irá medir novamente a tensão da fonte (3 V), mas a partir do deslocamento vertical do traço da varredura. Por que é melhor utilizar o traço ao invés do ponto?

Conecte a fonte à entrada do canal 1 (positivo da fonte na ponta da sonda e negativo da fonte no fio de referência). Certifique-se que o acoplamento do canal 1 está em “**Terra**” e posicione o traço na linha inferior da graduação da tela. Ajuste a sensibilidade vertical para 5 volts/divisão e leve a tecla de entrada para a posição **CC**. O traço se deslocará um pouco, como você observará. Aumente a precisão, ou seja, altere a sensibilidade de forma a obter o máximo deslocamento dentro dos limites da tela. Com acoplamento em “**Terra**” no menu deste canal, verifique se o traço ainda permanece na linha inferior. Caso contrário, reposicione-o.

Volte então o canal à posição **CC** e meça o deslocamento em termos de divisões com a respectiva estimativa de erro ($DIV \pm \Delta DIV$). Calcule então a tensão da fonte ($V_{\text{fonte-osc}}$) e o seu erro ($\Delta V_{\text{fonte-osc}}$). Aterre o acoplamento do canal 1.

Desconecte a fonte, desligue o osciloscópio e meça agora a tensão da fonte com um multímetro ($V_{\text{fonte-mult}}$) na função voltímetro ajustado para DCV (tensão DC ou contínua).

Não se esqueça do erro da medida ($\Delta V_{\text{fonte-mult}}$).

Apesar dos erros serem da mesma ordem qual aparelho é o mais preciso? Por quê? (Dica: a resistência interna da entrada do osciloscópio é muito alta comparada a do multímetro).

EXPERIMENTO 7: OSCILOSCÓPIO DIGITAL – CIRCUITO RC

Nesse experimento você utilizará o osciloscópio como uma ferramenta para observar os sinais de tensão elétrica em um circuito contendo um resistor e um capacitor conectados em série.

7.1 OBJETIVOS

Utilização do osciloscópio como instrumento de medida. Aplicação no estudo de circuitos RC.

7.2 INTRODUÇÃO

Os circuitos formados pela associação em série de um resistor com um capacitor ou um resistor com um indutor podem ser estudados no regime transitório ou no regime permanente. A operação no regime transitório é aquela em que a associação desses elementos de circuito é excitada por uma fonte de tensão ou então por uma fonte de corrente não repetitiva ou cujo intervalo de repetição seja muito longo quando comparado com as constantes de tempo do circuito. O comportamento transitório decorre do ato de ligar ou desligar as fontes e corresponde a um intervalo de tempo em que as tensões e as correntes levam para se adequar às novas condições de excitação do circuito. Isso é estudado na disciplina Física 3 onde é mostrado que o comportamento transitório está associado à funções exponenciais reais do tempo. O comportamento permanente dessas mesmas associações de elementos de circuito decorre da utilização de fontes alternadas, normalmente senoidais, após terem sido ligadas por um longo tempo quando comparado com as constantes de tempo do circuito.

7.3 MATERIAIS

- Osciloscópio Digital
- Matriz de pontos (protoboard)
- Gerador de Funções Digital
- Cabo de ligação (BNC/jacarés)
- Duas Pontas de Prova

- Resistor ($R = 1.10^3 \Omega$)
- Capacitor ($C = 1 \mu\text{F}$)

7.4 MEDIDAS

Agora você aprenderá a utilizar o osciloscópio para observar sinais e efetuar medidas elétricas mais complexas. Se for interromper o experimento anote todos os ajustes.

VII) CIRCUITO RC EM REGIME TRANSITÓRIO

Nosso objetivo é mostrar a resposta transitória em um circuito formado pela associação em série de um resistor com um capacitor excitado por um sinal de tensão periódico e quadrado como mostrado na Figura 7-1. Observaremos a tensão no capacitor e mediremos a constante de tempo de carga e descarga.

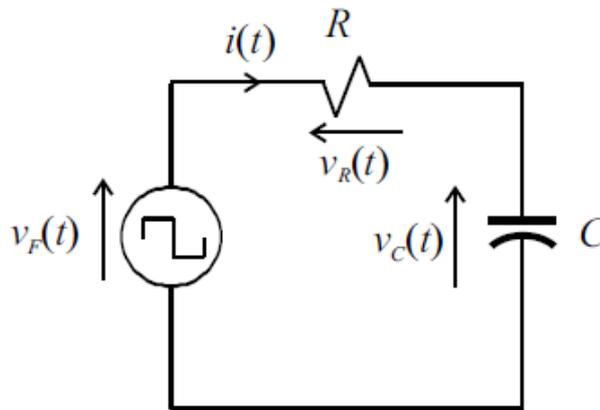


Figura 7-1: Circuito RC excitado por um sinal de tensão quadrado.

O sinal quadrado do gerador de tensão é um sinal de tensão que permanece constante com amplitude V_0 durante metade do período de oscilação, $(T_0/2)$ e inverte permanecendo constante com amplitude $-V_0$ durante a outra metade do período. Consideraremos que o período seja bastante longo de modo que o capacitor tenha tempo suficiente para carregar-se quase completamente tanto no semi-ciclo positivo quanto no semi-ciclo negativo do gerador de tensão. Nessa condição, a tensão do capacitor oscila entre $-V_0$ e V_0 .

A constante de tempo é o tempo necessário para que o capacitor carregue-se a 63% de $2V_0$ partindo de $-V_0$.

Monte o circuito da Figura 7-2 utilizando a placa de ligações, os componentes disponíveis e anote os valores de R e C em uso. Conecte o canal 1 do osciloscópio ao gerador e o canal 2 ao capacitor utilizando o mesmo ponto de referência ou "terra" (os

dois jacarés das entradas do osciloscópio devem estar conectados ao mesmo ponto na parte inferior no diagrama que corresponde à conexão entre o gerador e o negativo do capacitor, veja a Figura 7-2). Anote os valores dos componentes na folha de dados. Ajuste o gerador de função para fornecer um sinal quadrado com uma frequência de 115 Hz com amplitude na metade de seu valor máximo.

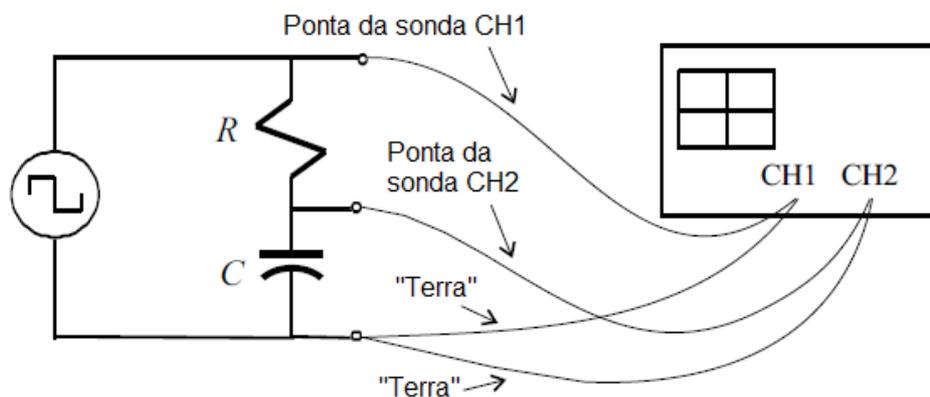


Figura 7-2: Conexão do circuito RC ao osciloscópio.

Ligue o osciloscópio se não estiver ligado e aguarde 1 minuto. Ajuste a varredura para um tempo de varredura de 2,5 ms / div e a entrada dos dois canais em “Terra” (menu CH1 e CH2). Para operar os dois canais simultaneamente pressione a tecla **DISPLAY** e selecione na tela **Formato** ⇒ **YT**. Ajuste as posições verticais para que você veja os dois traços correspondentes às duas varreduras na tela. Verifique se a entrada dos dois canais está com **Inverter** ⇒ **DESL**. Altere a entrada dos dois canais para a posição “**CC**” (menu CH1 e CH2) e ajuste as escalas de voltagem e tempo para poder visualizar uma onda completa. Você deverá visualizar os dois sinais, talvez seja preciso ajustar a frequência no gerador de onda, bem como o gatilhamento (botão **level** do trigger) no osciloscópio. Faça um desenho no quadrado da Folha de Dados descrevendo as duas ondas vistas no osciloscópio. Coloque na metade superior a onda do canal 1 e na metade inferior a onda do canal 2, identifique-as ao lado da figura. Identifique a parte da onda que corresponde à carga do capacitor e à descarga do mesmo.

Vamos agora superpor os dois sinais para melhor compará-los. Coloque a entrada dos dois canais em “Terra” e posicione os dois traços de modo a coincidir exatamente com o eixo horizontal. Altere a entrada dos dois canais para a posição “**CC**”. Veja se a tensão no capacitor consegue alcançar o valor constante do sinal quadrado. Ajuste a taxa de varredura e a frequência do gerador (se for necessário) de modo que fique visível um período da oscilação e que a tensão no capacitor alcance o valor constante.

Nessa condição, a excursão da tensão no capacitor vai de $-V_o$ a V_o , ou seja, varia de $2V_o$.

Vamos agora nos concentrar na medida da constante de tempo. Para isso podemos utilizar tanto a subida quanto a descida do sinal, utilizemos inicialmente a subida. Clique sobre **CH1menu** para visualizar apenas o sinal do canal 2. Ajuste a taxa de varredura para visualizar a subida do sinal na maior parte da tela. Ajuste a amplitude do gerador para que o sinal ocupe o máximo da tela no sentido vertical. Posicione horizontalmente o sinal de modo a começar a subida no canto inferior esquerdo da tela ou utilize os menus dos canais, se necessário, para escolher a inclinação positiva do sinal para o disparo da varredura (na tela **Inverter** \Rightarrow **lig**).

Reproduza o desenho da voltagem V_c em função do tempo t , observado na tela do osciloscópio. Não se esqueça de colocar a escala de tempo utilizada. Meça o tempo necessário para o sinal atingir 63% do total de divisões verticais da tela preenchidas pelo gráfico de carga do capacitor ($\tau = \text{número de divisões} \times \text{taxa de varredura}$).

Utilize agora a descida do sinal posicionando o início da queda no canto superior esquerdo.

Para isso desloque o sinal horizontalmente ou inverta a inclinação do sinal para o disparo da varredura. Meça então o tempo necessário para o sinal cair até 37% do total de divisões correspondente ao gráfico de descarga do capacitor (divisões verticais contadas de baixo para cima). Veja que cair até 37% corresponde a cair de 63%. Esses dois tempos deverão ser aproximadamente iguais se você proceder corretamente.

Avalie o erro ou desvio das duas medidas. Compare os tempos medidos com o valor teórico ($\tau = RC$) da constante de tempo.

VIII) CIRCUITO RC EM REGIME PERMANENTE

Nosso objetivo agora é mostrar e medir a diferença de fase entre a tensão e a corrente em um circuito RC em regime estacionário ou permanente (excitação e resposta senoidais) em função da frequência.

Utilizaremos uma medida direta da diferença de fase entre duas senóides na tela. Essa medida só pode ser realizada porque dispomos de um osciloscópio de dois canais.

No circuito RC para este procedimento troca-se o capacitor pelo resistor no circuito anterior conforme Figura 7-3. Desejamos medir a diferença de fase entre a tensão da

fonte $V_F(t)$ e a corrente $i(t)$ tomando a referência na corrente, ou seja, a tensão é que estará defasada.

O osciloscópio não mede corrente, só mede tensão, de forma que não podemos visualizar diretamente a corrente. Contudo, sabemos que num resistor a corrente é proporcional á tensão e estão em fase; então, se observarmos a tensão $V_R(t)$ no resistor, estaremos, no fundo, observando a corrente, a menos de uma constante multiplicativa (a resistência R).

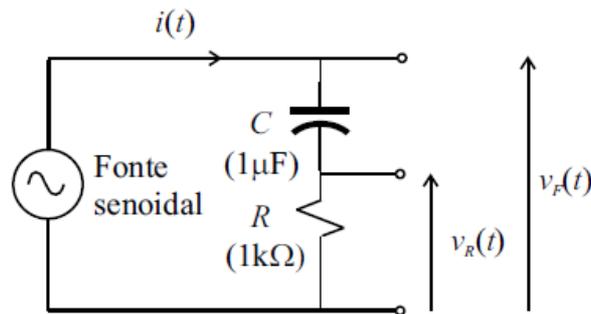
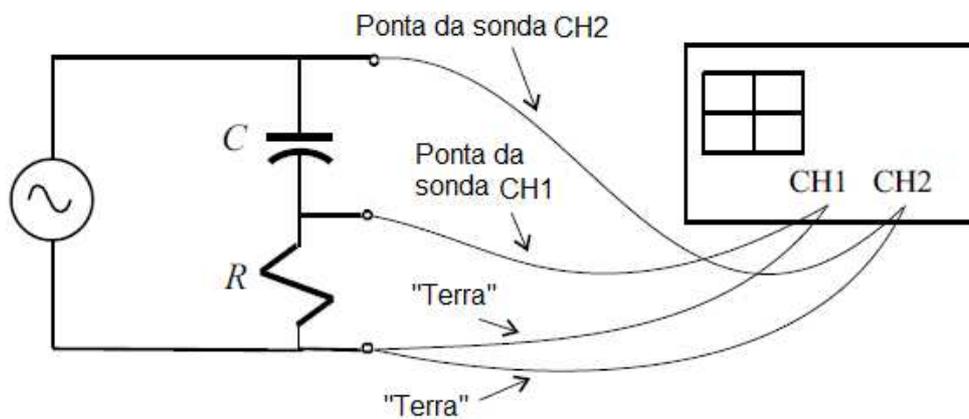


Figura 7-3: Circuito RC com excitação senoidal.

Desconecte o osciloscópio se ainda estiver conectado. O gerador de função deverá ser ajustado para fornecer uma tensão senoidal. Conecte os terminais do resistor á entrada do canal 1 tomando o cuidado de ligar o extremo inferior do resistor ao fio terra uma vez que as duas tensões serão medidas com relação a esse ponto comum. Conecte o terminal da placa ligado simultaneamente ao gerador e ao capacitor á entrada do canal 2 (ponta da sonda). O fio "terra" dessa entrada deve ser ligado ao outro fio "terra" com a finalidade de diminuir a entrada de ruído, que pode existir. Veja a Figura 7-4 seguinte.



Tensão $v_R(t)$ no canal 1

Tensão $v_F(t)$ no canal 2

Figura 7-4: Circuito RC com excitação senoidal conectado ao osciloscópio.

Ajuste o gerador para função senoidal, amplitude média e frequência ≈ 100 Hz. Anote o valor.

Os dois canais devem estar operando simultaneamente (**DISPLAY** \Rightarrow **Formato** \Rightarrow **YT**) e aterrados (menu CH1 e CH2). Posicione os dois traços de modo a coincidirem com o eixo horizontal central. Os traços devem ficar perfeitamente superpostos.

Certifique-se que a tecla **TRIG Menu** (fonte de sincronismo) esteja em **Origem** \Rightarrow **CH1** para que a varredura seja disparada sob comando do canal 1 (onde está a tensão $V_R(t)$) e que no menu dos dois canais esteja na tela **Inverter** \Rightarrow **lig** (disparo da varredura quando a inclinação do sinal for positiva).

Mude a entrada do canal 1 para a posição CA e ajuste a sensibilidade vertical e a taxa de varredura (se for necessário) para observar a senóide nos limites da tela.

Coloque um período, apenas, da senóide ocupando toda a tela (10 divisões), ajustando a taxa de varredura e o posicionamento horizontal, POSITION. A senóide deve iniciar o ciclo no lado esquerdo da tela.

Uma vez ajustada a senóide do canal 1, mude a entrada do canal 2 para a posição AC e ajuste a sensibilidade vertical deste canal para poder observar a outra senóide nos limites verticais da tela. Não importa se esta senóide é maior ou menor que a outra na tela, seu valor de tensão será sempre maior.

Você deverá estar observando duas senóides defasadas; a senóide do canal 2 deverá estar à direita da senóide do canal 1, ou seja, está atrasada (se não for isto o observado verifique as ligações conforme Figura 7-4). Vamos medir esse atraso.

Meça a distância d entre as senóides no ponto de cruzamento com o eixo horizontal.

Veja a Figura 7-5.

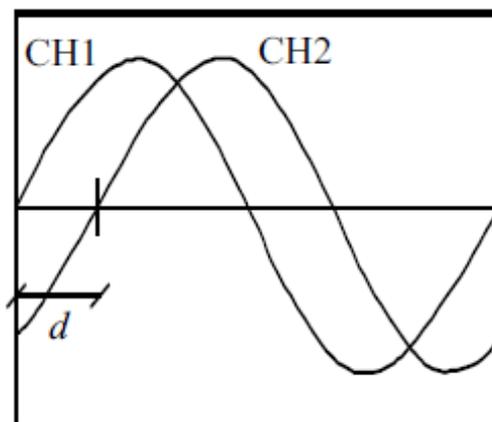


Figura 7-5: Senóides defasadas. Sinal do canal 2 atrasado com relação ao sinal do canal 1.

A diferença de fase em radianos, negativa, pois está atrasada, será calculada pela seguinte “regra de três”:

$$10 \text{ divisões} \rightarrow 2\pi$$

$$d \text{ divisões} \rightarrow -\phi$$

Estime o erro e repita o processo para $f \approx 400 \text{ Hz}$ e $f \approx 1000 \text{ Hz}$, anotando as medidas. Não se esqueça de ajustar a senoide do canal 1 em toda a tela para cada valor da frequência! Se isto não for possível altere o número de divisões, equivalentes a 1 período, na regra de três acima.

Compare os resultados obtidos com os valores teóricos dados por

$$\phi = -\tan^{-1} \frac{1}{\omega RC}, \quad \omega = 2\pi f, \quad R \text{ em ohms, } C \text{ em farads:}$$

Considere:

$$\frac{\Delta f}{f} = 5\%, \quad \frac{\Delta R}{R} = 5\%, \quad \frac{\Delta C}{C} = 20\%$$

para avaliar o erro em ϕ .

Coloque a entrada dos dois canais para “**Terra**”, desconecte o osciloscópio e desmonte o circuito.

EXPERIMENTO 8: OSCILOSCÓPIO DIGITAL – FIGURAS DE LISSAJOUS

Nesse experimento você utilizará o osciloscópio como uma ferramenta para observar a composição de sinais senoidais em eixos perpendiculares.

8.1 OBJETIVOS

Utilização do osciloscópio como instrumento de medida. Aplicação na composição de sinais.

8.2 INTRODUÇÃO

Composição de Sinais e Figuras de Lissajous

A superposição de sinais periódicos ocorre em uma série de situações no cotidiano e muitas vezes não temos a percepção clara do fenômeno. A maioria dos sons naturais (como a voz) ou artificiais (como em um instrumento musical) bem como muitas imagens são produzidos pela superposição de sinais periódicos. A composição, muito interessante, de sinais elétricos periódicos que pode ser estendida a outros tipos de variações periódicas são as figuras de Lissajous. A composição gráfica de dois movimentos ondulatórios, um na horizontal e outro na vertical, resulta na chamada *Figura de Lissajous*. Para exemplificar, consideremos a Figura 8-1, onde temos a composição de um sinal na vertical de determinada frequência, e outro na horizontal com o dobro de frequência.

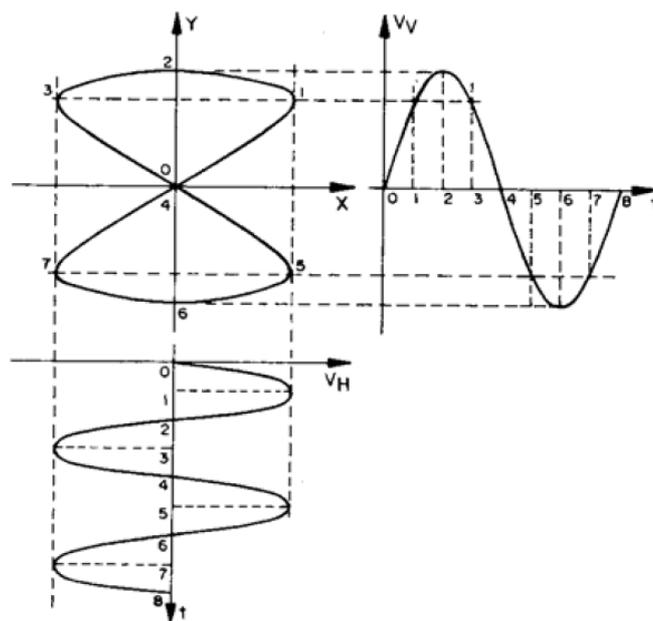


Figura 8-1: Figura de Lissajous resultante da composição de dois sinais de frequência diferente.

Em cada instante, toma-se o ponto correspondente à intensidade de um sinal e também do outro, traçando linhas de projeção que se cruzarão determinando assim o local do espaço em que irá aparecer o ponto correspondente da imagem que será gerada. Numerando estes pontos traça-se a imagem completa. É como se um misturador fosse capaz de juntar dois sinais de características diferentes, obtendo-se um efeito final que é a sua combinação.

Na matemática a figura de Lissajous é o gráfico produzido por um sistema de equações paramétricas:

$$x = x_0 \text{sen}(\omega_x t) \text{ com frequência angular } \omega_x = \frac{2\pi}{T_x} = 2\pi f_x$$

e

$$y = y_0 \text{sen}(\omega_y t) \text{ com frequência angular } \omega_y = \frac{2\pi}{T_y} = 2\pi f_y$$

que descreve um complexo movimento harmônico no plano.

Esta família de curvas foi estudada por Jules Antoine Lissajous em 1857. As primeiras figuras observadas por Lissajous foram obtidas pela composição a 90° ($\pi/2$ rad), no espaço, de dois movimentos senoidais retilíneos e de frequências diferentes obtidos com diapasões (instrumento em forma de U utilizado para afinar instrumentos musicais).

A aparência do gráfico é altamente sensível à razão $\frac{\omega_y}{\omega_x} = \frac{f_y}{f_x}$. A figura obtida será

fechada, ou seja, o ponto que a descreve volta ao ponto de partida e se repete periodicamente, quando a relação entre as frequências é igual a uma relação entre

números inteiros $\frac{\omega_y}{\omega_x} = \frac{n}{n'}$, n e n' inteiros. O intervalo de tempo T (período) para

descrever completamente a figura é dado por $T = nT_y = n'T_x$

A Figura 8-2 representa algumas figuras de Lissajous. A elipse constitui a mais simples, quando a razão é 1 e a diferença de fase entre os sinais é $\phi = \pi/4$ radianos. Outra figura simples é a parábola, formada quando $f_y/f_x = 2$, $\phi = \pi/2$. Os gráficos podem também formar círculos quando $f_y = f_x$, $\phi = \pi/2$ e retas, quando $f_y = f_x$, $\phi = 0$. Outras razões produzem gráficos mais complicados, os gráficos de Lissajous são estáticos (ou seja, se fecham numa figura visível) apenas quando a razão f_y/f_x é um número racional.

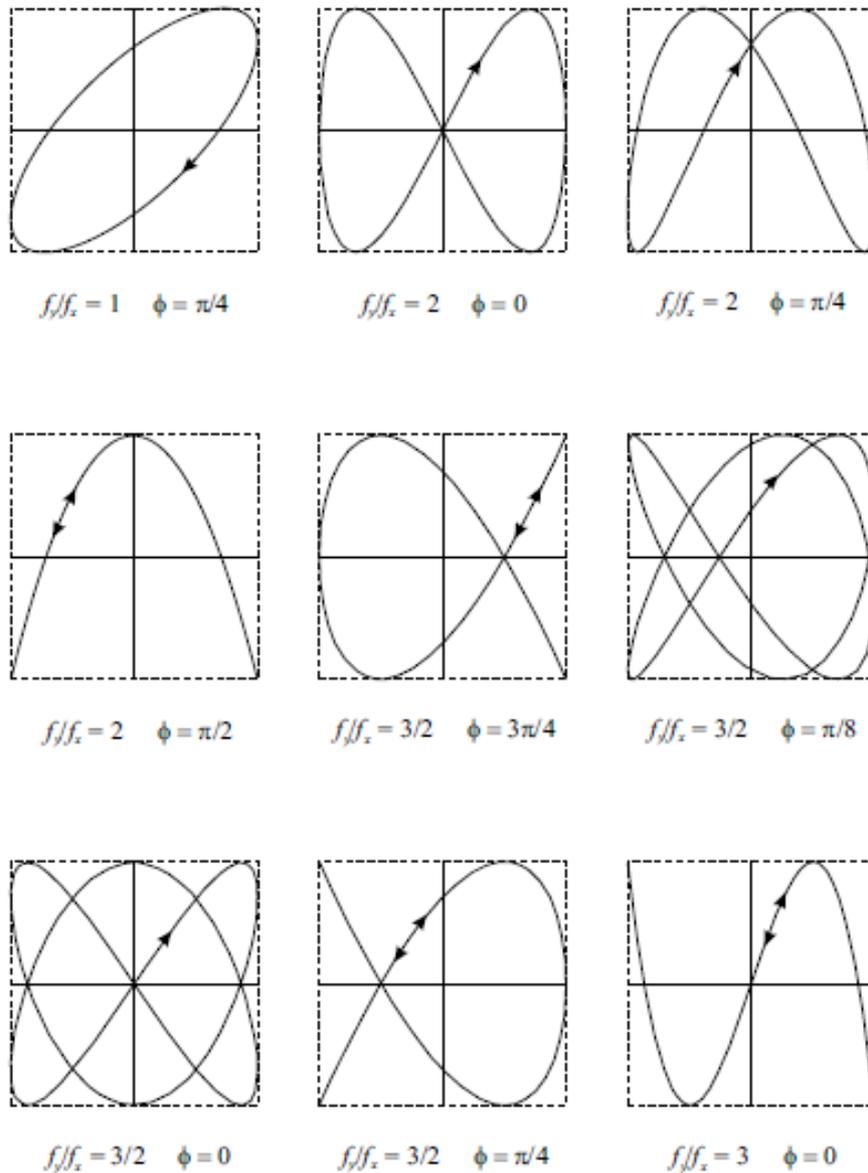


Figura 8-2: Figuras de Lissajous para diferentes relações de frequência e defasagem.

Propriedade dos extremos das figuras: $\frac{\omega_y}{\omega_x} = \frac{f_y}{f_x} = \frac{\text{n}^\circ \text{ de tangentes ao eixo x}}{\text{n}^\circ \text{ de tangentes ao eixo y}}$

A relação precedente não é mais válida (no sentido em que não conseguimos visualizar os extremos) quando a curva apresenta pontos singulares de retorno. A curva toma o aspecto de uma curva aberta, a trajetória de ida descrita pelo ponto é a mesma trajetória de volta com, apenas, inversão de sentido. Exemplo: $f_y/f_x=3/2$, $\phi=\pi/4$ na Figura 8-2.

Propriedade de simetria: a figura correspondente a $\frac{f_y}{f_x} = \alpha$ é análoga à figura obtida para $\frac{f_y}{f_x} = \frac{1}{\alpha}$ quando se permuta x por y.

A figura de Lissajous pode ser utilizada para a determinação da frequência desconhecida de um dos sinais, quando se conhece a frequência do outro sinal, pela observação e contagem dos números de extremos da figura nos dois eixos perpendiculares.

Estudando-se a figura visualizada pode-se também usá-la para medir a fase entre dois sinais. Na indústria, onde problemas de defasagens de sinais de rede de energia são importantes para se determinar o fator de potência, por exemplo, o uso das Figuras de Lissajous se mostra em especial de grande utilidade, eliminando assim a necessidade de outros equipamentos.

Portanto, estas figuras são uma poderosa ferramenta de diagnóstico eletrônico.

Pode-se ainda, através de programas simples gerar as figuras e aplicá-las em outras finalidades, inclusive na geração de efeitos em editores de imagens para internet e recursos multimídia.

8.3 MATERIAIS

- Osciloscópio Digital
- Gerador de Função Digital
- Aparelho de Alimentação AC
- Cabos de Ligação (BNC/jacarés, 2 pontas de prova, 2 banana/jacaré)

8.4 MEDIDAS

Dois sinais senoidais de frequências diferentes serão aplicados nas entradas do osciloscópio no modo X-Y. Desse modo, suponha que x alimenta o canal CH1 e y o canal CH2, x_0 é amplitude do CH1 e y_0 é a amplitude do CH2, f_x é a frequência de CH1 e f_y a frequência de CH2, assim f_y/f_x é a razão das frequências entre os dois canais, ϕ é a diferença de fase entre CH2 e CH1 dada pela figura visualizada na tela.

I) FIGURAS DE LISSAJOUS

Vamos agora realizar a composição do movimento senoidais nos eixos x e y.

Leve o osciloscópio para o modo de operação X-Y, clicando em **DISPLAY** ⇒ **Formato** ⇒ **XY**. Certifique-se que a entrada dos dois canais está aterrada **CH1MENU/CH2MENU** ⇒ **Acoplam** ⇒ **Terra**. Ajuste o posicionamento para que o ponto fique no centro.

ATENÇÃO: O APARELHO DE ALIMENTAÇÃO AC ESTÁ EQUIPADO PARA TRABALHAR COM UMA TENSÃO DE REDE DE 110 V. Ligue o aparelho de alimentação AC em 2 V (comutador de 8 níveis no lado direito). Conecte a saída de tensão alternada (-) ao canal 1 (eixo x), utilizando os cabos banana/jacaré. Mude a entrada desse canal para “AC” e mantenha a do outro canal em “terra”. Ajuste a sensibilidade vertical (VOLTS/DIV) e o posicionamento do canal 1 para que o traço horizontal ocupe toda a tela dentro de seus limites. Volte a entrada deste canal para posição **Terra**.

Ajuste o gerador de função próximo a 10 Hz, senoidal, amplitude média e conecte-o ao canal 2, que é o eixo y. Mude a entrada desse canal para “AC” e mantenha a do outro canal em “terra”. Ajuste a sensibilidade vertical, a amplitude do gerador e o posicionamento do canal 2 para que o traço vertical ocupe toda a tela dentro de seus limites. Não utilize a amplitude máxima do gerador para prevenir distorção no sinal senoidal.

Coloque a entrada do outro canal em “AC” e deverá aparecer uma figura “estranha” em movimento na tela. Ajuste o contraste em **Display** se necessário.

Aumente a frequência do gerador, aos pouco e lentamente, até que apareça uma figura fechada na tela. Tente imobilizar essa figura, se for possível, pelo ajuste da frequência do gerador de modo que você possa observar todos os picos da figura. Anote a frequência do gerador, conte quantos pontos de tangência existem no eixo horizontal (inferior ou superior) e quantos pontos de tangência existem no eixo vertical (esquerdo ou direito) escrevendo-os na forma de uma fração.

Preencha a tabela da folha de dados, com a frequência do gerador f_G (leia no display e

não arredonde), a relação $\frac{n^\circ \text{ de tangentes ao eixo x}}{n^\circ \text{ de tangentes ao eixo y}}$ e a frequência teórica no eixo y

(f_y).

Sabemos que $\frac{f_y}{f_x} = \frac{n^\circ \text{ de tangentes ao eixo x}}{n^\circ \text{ de tangentes ao eixo y}}$ e $f_x = 60 \text{ Hz}$.

Continue a aumentar a frequência do gerador, conectado ao canal 2 e a preencher a tabela toda vez que conseguir uma figura fechada e aproximadamente parada. Prossiga até atingir 600 Hz.

Observe, em particular, as figuras para aproximadamente 20 Hz e 180 Hz, para 30 Hz e 120 Hz, para 40 Hz e 90 Hz e em torno de 60 Hz. O que você percebe?

Os resultados dessas medidas poderão mostrar que nem sempre a frequência teórica, f_y , coincide com a frequência indicada no gerador, f_G , pois o gerador não é perfeito.

As medidas estão concluídas. Desconecte os fios do aparelho de alimentação e do gerador (não é necessário desconectar os cabos da entrada do osciloscópio), mas não desligue ainda o osciloscópio, pois o mesmo precisa ser ajustado antes de ser desligado. Clique em **DISPLAY** ⇒ **Formato** ⇒ **YT** e coloque a entrada dos dois canais para a posição “**Terra**”. Ajuste os posicionamentos de modo que os dois traços fiquem separados um do outro e visíveis na tela. Desligue os equipamentos.

Construa uma curva de calibração para o gerador, $f_G \times f_y$. A curva deve ser suave, passar por todos os pontos medidos e apresentar a equação de correção para o gerador de função.

EXPERIMENTO 9: OSCILOSCÓPIO DIGITAL – AUTO-INDUTÂNCIA E CIRCUITO RL

Nesse experimento você utilizará o osciloscópio como uma ferramenta para observar os sinais de tensão elétrica em um circuito contendo um resistor e um indutor conectados em série.

9.1 OBJETIVOS

Determinação da auto-indutância de um indutor real pela medida de sua resistência e sua impedância.

9.2 INTRODUÇÃO

9.2.1 Coeficiente de auto-indutância e força eletromotriz (f.e.m)

Em todo circuito elétrico por onde passa uma corrente elétrica i existe um campo de indução magnética \vec{B} criado por essa corrente. Quando o meio nas vizinhanças desse circuito é o vácuo ou mesmo o próprio ar, a indução magnética \vec{B} é diretamente proporcional à corrente. Porém, a presença de materiais com propriedades magnéticas como o Ferro faz com que a indução magnética passe a depender da corrente de modo complexo, nem sempre possível de descrever de maneira analítica. O circuito elétrico delimita uma área interna que é atravessada pelas linhas do campo de indução magnética e isso permite definir o fluxo, ϕ , desse campo por essa área. Basicamente, o fluxo é o produto da indução magnética que atravessa a área pela própria área. Formalmente:

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Se considerarmos a indução magnética \vec{B} como uma função da corrente elétrica que a produziu, o fluxo correspondente também poderá ser descrito em função dessa mesma corrente, $\phi = \phi(i)$. Isso significa dizer que uma variação di na corrente produzirá uma variação $d\phi$ no fluxo. O coeficiente de auto-indutância, L , ou simplesmente, indutância, mede como a variação do fluxo depende da variação da corrente e é definido como:

$$L = \frac{d\phi}{di} \text{ (henry)}$$

Em muitas situações importantes, o fluxo é diretamente proporcional à corrente (função linear) e a derivada torna-se constante. Nessas situações, a indutância

depende apenas de parâmetros constantes como as propriedades magnéticas do meio e da geometria do circuito (comprimento, área, etc.). O fluxo pode então ser escrito de modo simplificado como:

$$\phi = Li$$

Em muitos casos o fluxo da indução magnética pode estar mais concentrado em uma determinada região do circuito como no caso de um circuito contendo uma bobina de fio. Os elementos de circuito que concentram o fluxo da indução magnética são chamados de indutores (bobinas, solenóides, bobinas toroidais, etc). Esses elementos praticamente contém toda a indutância do circuito de modo que podemos desprezar o restante (os fios de ligação, por exemplo).

Desse modo, quando falamos na indutância L de um circuito, na verdade estamos nos referindo à indutância de certo elemento do circuito, o indutor.

Faraday, em 1831, mostrou experimentalmente que a variação temporal do fluxo, ϕ , de um campo de indução magnética \vec{B} que atravessa qualquer área delimitada por um circuito elétrico induz, neste circuito, uma “força eletromotriz” (f.e.m.), ε , diretamente proporcional à taxa de variação desse fluxo e que pode ser expressa por:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$

A variação temporal do fluxo pode ter várias causas. Pode ser devido à variação de \vec{B} tanto em módulo como em direção, como no caso do movimento de um ímã nas vizinhanças de uma espira, pode ser devido a uma deformação geométrica da própria espira ou, no caso de um circuito percorrido por uma corrente, devido à variação da própria corrente. Concentremos-nos nesse último caso (geometria fixa).

Tomemos um circuito elétrico contendo um indutor excitado por uma fonte de corrente que varie no tempo, $i = i(t)$. Como o fluxo é uma função da corrente a lei de Faraday pode ser desdobrada como:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{di} \frac{di}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

Nessa expressão, o sentido positivo da corrente deve ser compatível com o fluxo e com a f.e.m. para a manutenção do sinal negativo na expressão. Para evitar possíveis confusões que possam advir por causa desse sinal negativo, estabeleceremos a seguinte convenção de sentidos positivos para a d.d.p. e para a corrente como mostrada na Figura 9-1.

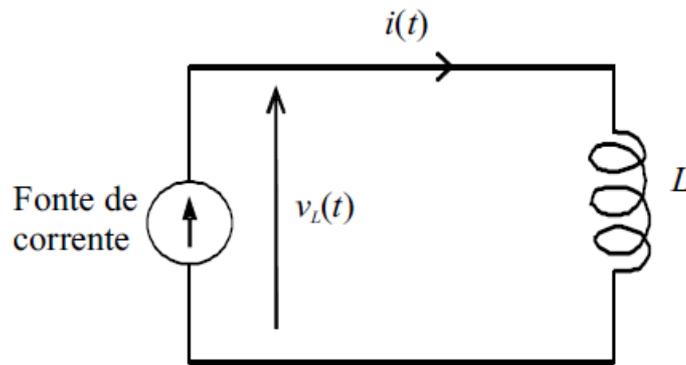


Figura 9-1: Convenção de sentido positivo para a tensão e para a corrente em um indutor.

Com as orientações dessa figura temos válida a expressão (sem sinal!)

$$v_L(t) = L \frac{di}{dt}$$

Em outras palavras, a tensão elétrica em um indutor depende da taxa de variação da corrente que o atravessa. Observe que se essa corrente não variar no tempo a tensão será nula, ou seja, pode haver corrente sem existir tensão! Basta que a corrente seja constante no tempo.

9.2.2 Constante de tempo de um circuito RL em série

Consideremos agora a situação em que um indutor com indutância L , um resistor com resistência R e uma fonte de tensão constante estejam associados em série. Esse resistor pode estar representando a resistência elétrica do fio com que o indutor é fabricado (indutor real) ou mesmo um resistor adicional introduzido propositalmente no circuito. Suponhamos ainda que a fonte de tensão seja ligada em $t = 0$. Veja a Figura 9-2.

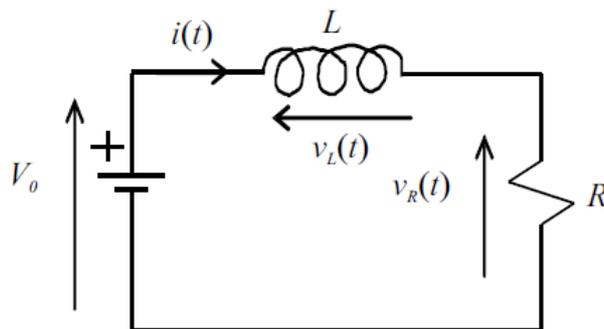


Figura 9-2: Circuito RL alimentado por uma fonte de tensão constante.

A lei das malhas aplicada ao circuito resulta em

$$V_0 = v_L(t) + v_R(t) \quad \text{ou} \quad V_0 = L \frac{di}{dt} + Ri,$$

cuja solução para a condição inicial de corrente nula no instante em que a fonte é ligada, $t = 0$, vale

$$i(t) = V_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

Para $t = L/R$ a corrente atinge o valor:

$$i\left(t = \frac{L}{R}\right) = \frac{V_0}{R} \left(1 - e^{-1} \right) = 0,63 \frac{V_0}{R} = 0,63 I_0$$

A Figura 9-3 mostra o comportamento da corrente ao longo do tempo.

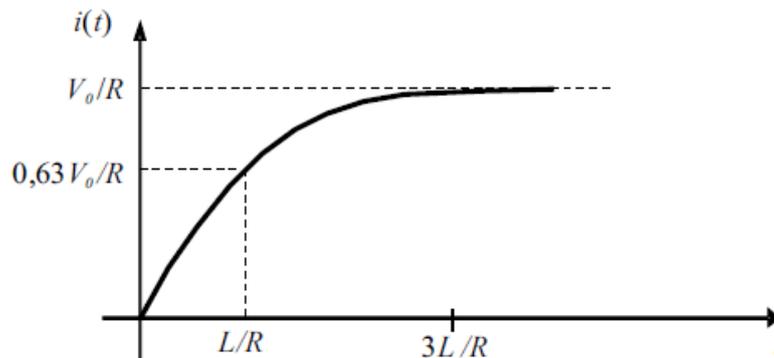


Figura 9-3: Comportamento da corrente elétrica em um circuito RL alimentado por uma fonte constante.

Observe que para $t = 3L/R$ a corrente praticamente atingiu o valor máximo V_0/R . Denominamos L/R de constante de tempo do circuito e é um valor de tempo de referência que nos indica o estado da corrente no circuito. Esse comportamento é conhecido como comportamento transitório e, nos circuitos usuais, é bastante pequeno, da ordem de milissegundos.

9.2.3 Impedância

Consideremos agora a situação em que um indutor com indutância L , um resistor com resistência R e uma fonte de tensão senoidal (ou cossenoidal) estejam associados em série conforme a Figura 9-4. Esse resistor pode estar representando a resistência elétrica do fio com que o indutor é fabricado (indutor real) ou mesmo um resistor adicional introduzido propositalmente no circuito. Suponhamos ainda que a fonte de tensão esteja ligada o bastante tempo de modo que o circuito esteja operando no regime permanente, ou seja, o comportamento transitório já tenha se extinguido.

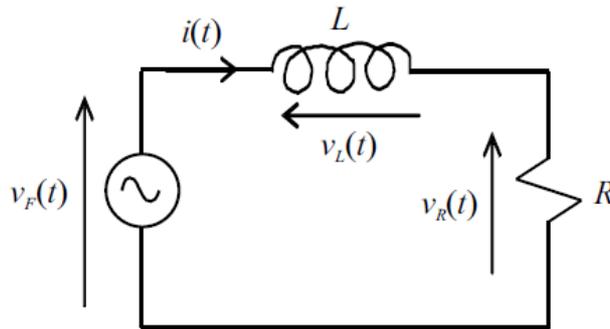


Figura 9-4: Circuito RL alimentado por uma fonte de tensão senoidal em regime permanente.

A equação da malha aplicada ao circuito resulta em

$$v_F(t) = v_L(t) + v_R(t) \quad \text{ou} \quad v_F(t) = L \frac{di}{dt} + Ri$$

Supondo uma excitação cossenoidal, procuremos uma solução para a corrente com a mesma forma, porém, defasada.

$$v_F(t) = V_0 \cos(\omega t) \text{ e } i(t) = I_0 \cos(\omega t + \phi)$$

Onde: V_0 e ω - amplitude e frequência angular da tensão da fonte são conhecidas,

I_0 e ϕ - amplitude e fase inicial da corrente são, por enquanto, desconhecidas.

Substituindo essas duas expressões na equação diferencial do circuito, encontraremos:

$$V_0 \cos(\omega t) + LI_0 \text{sen}(\omega t + \phi) = RI_0 \cos(\omega t + \phi)$$

Desenvolvendo e igualando separadamente os coeficientes de $\cos(\omega t)$ e $\text{sen}(\omega t)$ obtemos:

$$I_0 = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad \text{e} \quad \phi = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

O termo $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ é denominado impedância, Z , e é o análogo da resistência na lei de Ohm para sinais alternados, funciona como se fosse uma “resistência efetiva” atuando na amplitude da tensão para resultar na amplitude da corrente. Veja que esse termo depende da frequência angular ω . O Termo ωL é denominado reatância indutiva, X_L , e junto com a resistência compõe a impedância.

$$I_0 = \frac{V_0}{Z} \quad \text{e} \quad \phi = -\tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

A impedância de um elemento de circuito pode ser determinada experimentalmente a partir das medidas da amplitude da tensão e da amplitude da corrente ou dos respectivos valores eficazes (amplitude dividida por raiz quadrada de dois para sinais senoidais). A resistência pode ser determinada experimentalmente pela razão entre a tensão e a corrente excitando-se o circuito com tensão constante ou contínua. A fase inicial ϕ pode ser medida pela observação do deslocamento relativo entre a senóide da tensão e a senóide da corrente.

Temos, portanto, duas maneiras para determinar a indutância em um indutor real. A primeira pelas medidas de Z e R e a segunda pelas medidas de ϕ e R sendo a frequência angular, $\omega = 2\pi f$, conhecida.

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega} \quad \text{ou então} \quad L = -\frac{R}{\omega} \tan \phi$$

9.3 MATERIAIS

Antes de iniciar o experimento identifique cada item da lista seguinte.

- Osciloscópio Digital
- Matriz de Pontos (protoboard)
- Gerador de Função Digital
- Fonte de Alimentação de Corrente Contínua
- Multímetro Digital (Voltímetro)
- Fios de ligação
- Resistores com valores conhecidos
- Uma bobina de fio e núcleo de ferro laminado ou ferrite.

9.4 MEDIDAS

Todas as medidas nesse experimento serão executadas com o uso de um osciloscópio. Como sabemos, esse instrumento versátil permite visualizar diretamente sinais de tensão contínuos e alternados. As medidas em tensão contínua são

realizadas através do deslocamento vertical do traço da varredura quando o sinal é aplicado na entrada vertical. As medidas em tensão alternada são realizadas através da visualização e medida da amplitude, ou mesmo do valor pico a pico, da figura na tela e através do deslocamento temporal relativo entre duas curvas no caso das medidas de diferença de fase.

O osciloscópio só mede diretamente a tensão elétrica aplicada em seus terminais de entrada de sinal. Para medir corrente elétrica é necessário transformar essa grandeza em tensão elétrica. Isso pode ser realizado através do uso de um resistor de valor adequado e exatamente conhecido. O valor desse resistor deve ser tal que não perturbe o circuito, usualmente, um valor de resistência pequena quando comparado com as outras resistências em série no circuito.

Quando se deseja medir dois sinais simultaneamente através da utilização dos dois canais do osciloscópio deve-se tomar um cuidado adicional com relação aos “terras” ou terminais de referência uma vez que esse terminais são os mesmos para os dois canais e estão conectados à carcaça do instrumento. Esses dois terminais devem sempre ser conectados ao mesmo ponto no circuito onde se realiza a medida e deve ser um ponto que minimize a captação de ruídos e que seja seguro para o operador do instrumento.

I) MEDIDA DA RESISTÊNCIA (CORRENTE CONTÍNUA)

Arme o circuito da Figura 9-5 utilizando a saída de tensão contínua da fonte de tensão. Ajuste a fonte para 12 V (corrente máxima limitada em 0,2 A).

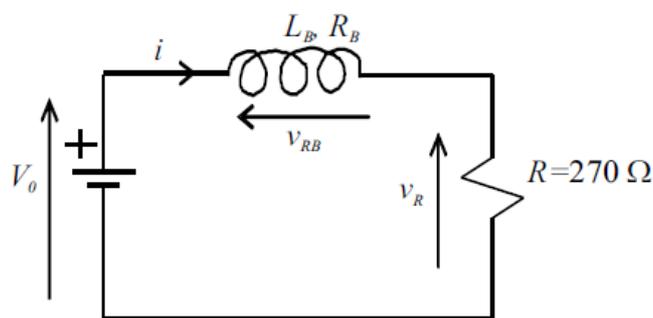


Figura 9-5: Circuito RL para a determinação da resistência da bobina.

Conecte a ponta de prova do canal 1 do osciloscópio ao resistor (atenção a polaridade) e meça a d.d.p. pelo deslocamento vertical do traço da varredura na tela anotando o desvio da medida. Utilize o máximo deslocamento possível a partir da linha inferior da tela fazendo o ajuste da sensibilidade vertical e da posição. Coloque a tecla

de entrada para a posição **CC** para deslocar o traço. Calcule a tensão ($V_{R\text{-oscilosc}}$) e o erro ($\Delta V_{R\text{-oscilosc}}$).

Meça essa mesma tensão também com um multímetro ($V_{R\text{-mult}}$) na escala DCV (ou CCV) e no calibre conveniente. Anote o desvio avaliado da medida ($\Delta V_{R\text{-mult}}$).

Calcule a corrente que percorre o circuito atravessando o indutor e o resistor pelos dois processos.

Conecte agora a ponta de prova do canal 1 do osciloscópio ao indutor (bobina de fio) e meça a d.d.p. ($V_{L\text{-oscilosc}}$). Calcule o desvio ($\Delta V_{L\text{-oscilosc}}$).

Faça o mesmo com o multímetro ($V_{L\text{-mult}} \pm \Delta V_{L\text{-mult}}$).

Calcule a resistência elétrica da bobina, R_B , utilizando a lei de Ohm pelos dois processos.

Calcule as resistências médias da bobina pelos dois processos (osciloscópio e multímetro). Avalie os desvios médios e escreva-as corretamente (o desvio deve conter apenas um algarismo significativo, majore se necessário). Existe alguma diferença significativa entre os dois processos?

II) MEDIDA DA IMPEDÂNCIA (CORRENTE ALTERNADA)

Troque agora a fonte DC pelo gerador de sinal senoidal. Você terá o circuito da Figura 9-6. Ajuste a frequência do gerador para aproximadamente 200 Hz com tensão pico a pico (V_{pp}) de aproximadamente 9 V (amplitude do gerador no máximo até a metade).

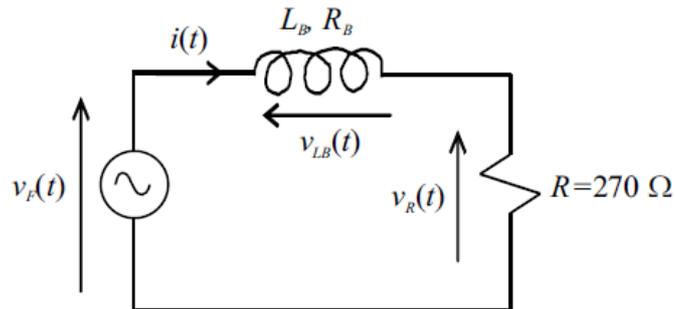


Figura 9-6: Circuito RL para a determinação da impedância da bobina.

Conecte a ponta de prova do canal 1 do osciloscópio ao resistor (**$R = 270 \Omega$**) e meça a d.d.p. pico a pico ajustando o tempo de varredura para obter um ou dois períodos visíveis na tela com o sincronismo feito pelo canal 1. Anote o desvio da medida. Coloque a tecla de entrada na posição AC. Utilize o máximo deslocamento possível a partir da linha inferior da tela fazendo o ajuste da sensibilidade vertical e da posição.

Não se preocupe se a senóide estiver um pouco deformada. Calcule o valor eficaz da tensão ($V_{pp} / 2\sqrt{2}$).

Meça essa mesma tensão (valor eficaz) também com um multímetro na escala ACV (ou CAV) e no calibre conveniente. Anote o desvio avaliado.

Calcule a corrente eficaz que percorre o circuito atravessando o indutor e o resistor pelos dois processos.

Conecte agora a ponta de prova do canal 1 do osciloscópio ao indutor (bobina de fio), meça a d.d.p. pico a pico e calcule o valor eficaz. Calcule o desvio.

Faça o mesmo com o multímetro (mude o calibre começando com um calibre mais elevado) ajustando o calibre convenientemente.

Calcule a impedância elétrica da bobina, Z_B , utilizando a generalização da lei de Ohm ($Z_B = V_{ef} / I_{ef}$) pelos dois processos. Existe alguma diferença significativa entre os dois processos?

III) MEDIDA DA IMPEDÂNCIA DA BOBINA COM NÚCLEO FERROMAGNÉTICO

Coloque o núcleo de ferro no interior da bobina e repita as medidas do item anterior. Há necessidade de repetir a medida da resistência como no item I? Explique.

Das medidas realizadas calcule as impedâncias da bobina com núcleo pelos dois processos. Avalie os desvios médios e escreva-as corretamente. Existe alguma diferença significativa entre os dois processos?

Calcule os valores das indutâncias sem núcleo e com núcleo assumindo a frequência f como constante e igual a **200 Hz**. Utilize apenas as medidas realizadas com o osciloscópio, avalie o desvio e escreva-as corretamente. Quanto vale a relação entre as indutâncias? Você vê alguma vantagem em utilizar um núcleo?

IV) MEDIDA DA DIFERENÇA DE FASE ENTRE A TENSÃO DA FONTE E A CORRENTE NO CIRCUITO

Retire o núcleo de ferro do interior da bobina. Troque o resistor para **R = 10 Ω**. Ligue o canal 1 do osciloscópio aos extremos do resistor de tal modo que o cabo jacaré (terra) seja conectado ao terminal do resistor que está ligado ao gerador de sinal senoidal. Ligue o canal 2 aos terminais do gerador de modo que o cabo jacaré deste canal

esteja ligado ao fio preto do canal 1, ou seja, os dois “terras” devem estar eletricamente conectados ao mesmo ponto de referência.

Sincronize o osciloscópio pelo canal 1, ajuste as sensibilidades verticais dos dois canais e os posicionamentos verticais para visualizar as duas senóides. As duas teclas de entrada devem estar na posição AC. A senóide do canal 1 corresponde à corrente no circuito uma vez que a tensão no resistor está em fase com a corrente. A senóide no canal 2 corresponde à tensão do gerador. As duas senóides têm a mesma frequência. Meça o período e calcule a frequência, ajuste o tempo de varredura se necessário.

Para medir a diferença de fase entre as senóides os traços das varreduras devem ser coincidentes. Coloquem em “terra” as duas teclas das entradas dos dois canais e posicione os dois traços no centro da tela superpondo-os. Coloque as duas teclas em AC e observe as senóides. Identifique a senóide do canal 1 e posicione-a horizontalmente para iniciar o ciclo no canto esquerdo da tela e terminar o ciclo no canto direito. Para isso você deve agir no botão de posicionamento horizontal. Você deverá observar que a senóide do canal 2 termina o ciclo antes da senóide do canal 1 estando, portanto, adiantada no tempo. Meça a diferença de fase (ϕ) diretamente na tela fazendo uma regra de três (10 divisões correspondem a 2π rad). Lembre-se que sua referência é o canal 1 (corrente no circuito), portanto, a tensão da fonte está adiantada (o valor da diferença de fase é positivo). Estime o desvio da medida ($\Delta\phi$).

Coloque o núcleo no indutor e repita o processo de medida da diferença de fase.

9.5 TRABALHOS COMPLEMENTARES

Das medidas de resistência feitas no item I calcule as resistências médias $\langle R_B \rangle$ (para as três tensões da fonte) da bobina pelos dois processos (osciloscópio e multímetro). Avalie os desvios médios $\langle \Delta R_B \rangle$ e escreva-as corretamente (o desvio deve conter apenas um algarismo significativo, majore se necessário). Existe alguma diferença significativa entre os dois processos?

Das medidas de impedância feitas no item II calcule as impedâncias Z_B da bobina sem núcleo pelos dois processos de medida. Avalie os desvios médios $\langle \Delta Z_B \rangle$ e escreva-as corretamente. Existe alguma diferença significativa entre os dois processos?

Das medidas de impedância feitas no item III calcule as impedâncias da bobina Z_B com núcleo pelos dois processos de medida. Avalie os desvios médios $\langle \Delta Z_B \rangle$ e escreva-as corretamente. Existe alguma diferença significativa entre os dois

processos? Calcule os valores das indutâncias sem núcleo ($L_{\text{sem núcleo de ferro}}$) e com núcleo ($L_{\text{com núcleo de ferro}}$) assumindo a frequência f como constante e igual a 200 Hz. Utilize apenas as medidas realizadas com o osciloscópio, avalie o desvio (ΔL) e escreva-as corretamente. Quanto vale a relação entre as indutâncias? Você vê alguma vantagem em utilizar um núcleo?

Das medidas de diferença de fase executadas no item IV e do valor da resistência calculado determine as indutâncias da bobina, sem núcleo e com núcleo. Você deverá utilizar a expressão da fase com o sinal positivo uma vez que o sinal de referência foi a corrente e não a tensão do gerador. Utilize apenas as medidas realizadas com o osciloscópio, avalie os desvios das medidas e escreva-as corretamente. Compare os resultados com os do item anterior. Com base nos desvios, qual é o melhor método (pela medida da impedância ou pela medida da diferença de fase)?

EXPERIMENTO 10: MEDIDAS DA COMPONENTE HORIZONTAL DO CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

10.1 OBJETIVOS

Determinar o valor da componente horizontal da indução magnética terrestre local.

10.2 INTRODUÇÃO

Num dado lugar da superfície da Terra, uma bússola procura e indica sempre a mesma direção. Portanto, em cada ponto da superfície da Terra existe uma indução magnética \vec{B}_T . A análise da direção e intensidade da indução magnética terrestre mostra que, em primeira aproximação, a Terra pode ser comparada com uma grande barra imantada onde o Polo Norte Magnético coincide com 73° N, 100° O, e o Polo Sul Magnético com 68° S, 146° L. Na Figura 10-1 (a) observa-se as linhas de força de tal ímã, e a Figura 10-1 (b) mostra a direção e intensidade de \vec{B}_T .

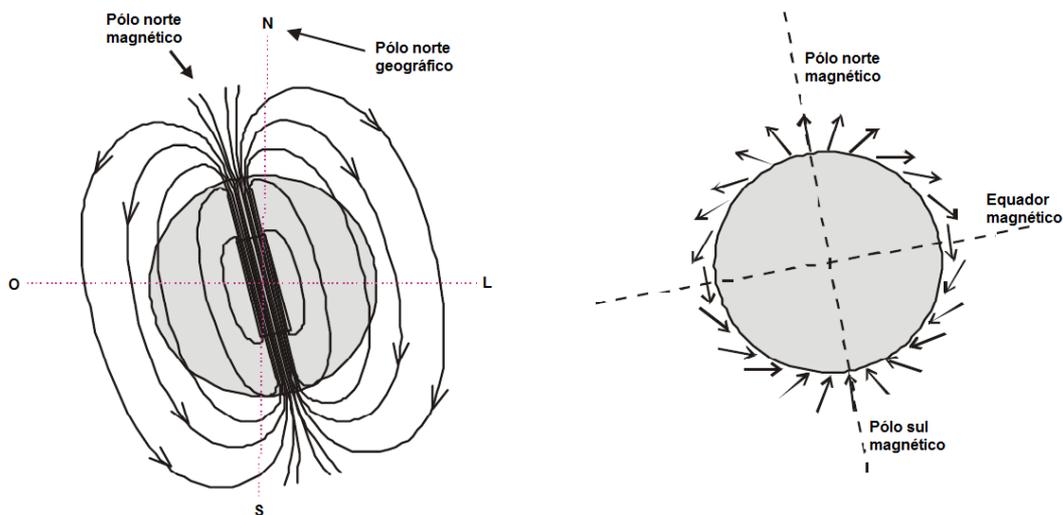


Figura 10-1: A Terra como uma barra imantada: a) linhas de força b) direção e intensidade do campo magnético

Vemos, portanto, que a indução magnética \vec{B}_T da Terra atua em todos os pontos. A componente horizontal (local) do campo magnético terrestre \vec{B}_H se dirige sempre para o polo Norte. Para medir esta componente, podemos realizar distintos experimentos.

Primeiro método

Sabemos que uma bússola orienta-se no campo magnético terrestre. Esta orientação pode ser modificada se algum campo magnético externo adicional for aplicado sobre ela. Neste caso a bússola procurará ficar orientada no campo magnético resultante da soma vetorial destes dois campos. A componente horizontal do campo magnético da Terra pode ser medida observando-se a mudança na orientação da bússola quando sobre ela for aplicado um campo magnético externo perpendicular ao campo magnético terrestre.

Denominando eixo X para a direção horizontal Norte-Sul. Produz-se um campo magnético homogêneo \vec{B} (cuja intensidade é calculada), na direção do eixo Y. Uma bússola se orientará na direção do campo magnético resultante. Medindo o ângulo θ que forma o campo resultante com o eixo X, conforme a Figura 10-2 obtém-se o valor da componente horizontal \vec{B}_H do campo magnético terrestre.

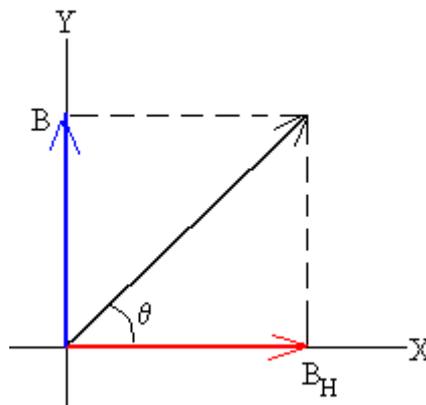


Figura 10-2: Componente horizontal do campo magnético terrestre

$$\tan \theta = \frac{B}{B_H} \quad (1)$$

Segundo método

O segundo método se baseia na indução de um quadro plano em rotação num campo magnético uniforme, conforme a Figura 10-3.

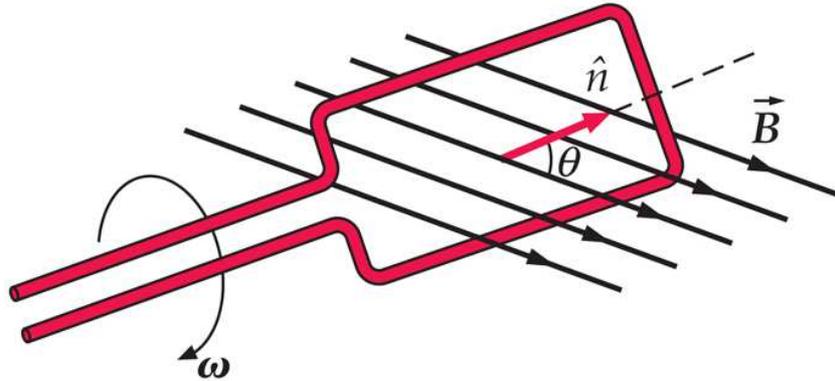


Figura 10-3: Quadro plano em rotação numa campo magnético uniforme.

Quando a normal ao plano da bobina \hat{n} faz um ângulo θ com um campo magnético uniforme \vec{B} , como mostrado na figura, o fluxo magnético através da bobina é

$$\phi_m = NBA \cos \theta \quad (2)$$

Onde N é o número de voltas na bobina e A é a área da superfície plana limitada pela bobina. Quando a bobina é girada mecanicamente, o fluxo através dela irá variar e uma fem será induzida na bobina de acordo com a lei de Faraday. Se o ângulo inicial é zero, então o ângulo em um instante posterior é dado por $\theta = \omega t$ onde ω é a frequência angular de rotação. Portanto a equação 2 fica:

$$\phi_m = NBA \cos \omega t = NBA \cos 2\pi f t \quad (3)$$

A fem na bobina será então:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\phi_m}{dt} = \omega NBA \sin \omega t \quad (4)$$

Isto pode ser escrito como:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{máx}} \sin \omega t \quad (5)$$

Onde $\mathcal{E}_{\text{máx}} = \omega NBA$ é o valor máximo da fem induzida.

Podemos então, produzir uma fem senoidal em uma bobina girando-a com frequência constante em um campo magnético uniforme. Esta fem está representada na Figura 10-4.

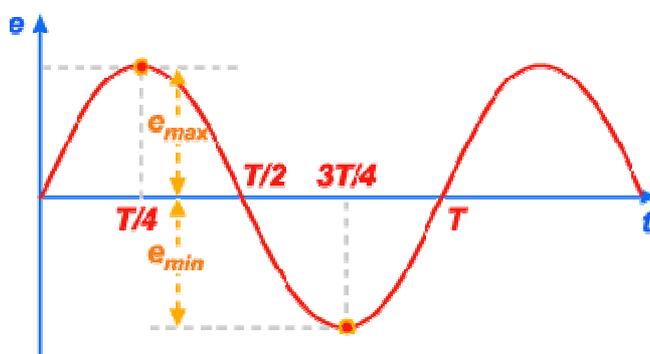


Figura 10-4: Força eletromotriz produzida pela bobina.

Seja $i = \frac{\mathcal{E}}{R}$, onde R é a resistência dos condutores que formam o quadro e i é a corrente induzida:

$$i = i_{\text{máx}} \text{sen} \omega t \quad (6)$$

Onde $i_{\text{máx}} = \frac{\omega NBA}{R}$ é o valor máximo da corrente induzida.

A representação gráfica de i em função de t está indicada na Figura 10-5. Essa corrente é chamada alternativa, ou alternada, porque ela percorre o condutor ora num sentido, ora noutro. A Figura 10-5 indica que a corrente no início tem valor zero; vai aumentando, até atingir um máximo em T/4; depois vai diminuindo até se anular em T/2; depois muda de sentido e vai aumentando até atingir um máximo em 3T/4; depois vai diminuindo, até se anular em T; muda de sentido novamente, e reinicia o ciclo.

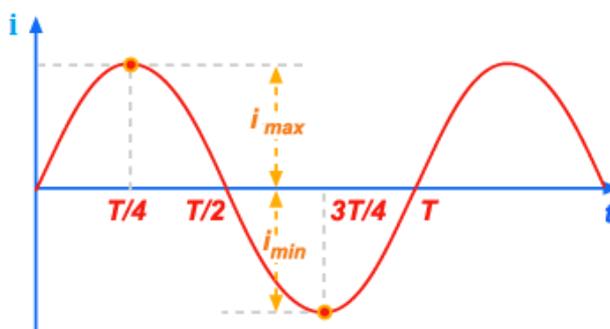


Figura 10-5: Corrente em função do tempo.

Vemos que o tempo T que a corrente demora a realizar um ciclo completo é igual ao tempo T que o quadro demora em dar uma volta no campo magnético.

Geralmente, na corrente usada nas cidades esse tempo T é de $1/60$ segundo, isto é, a corrente muda de sentido 60 vezes por segundo.

Se o campo magnético uniforme através da bobina plana estiver posicionado paralelo ao campo magnético terrestre e com intensidade tal que haja compensação através destes dois campos, não haverá produção da tensão induzida pela bobina plana. O cálculo do campo magnético uniforme \vec{B} quando a corrente induzida é igual a zero resulta na intensidade da componente horizontal do campo magnético terrestre \vec{B}_H .

Campo Magnético Externo

Para produzir o campo magnético externo, em ambos os métodos, utilizaremos uma bobina de Helmholtz, que consiste em um par de bobinas comuns de mesmo raio R , alinhadas paralelamente uma a outra com os eixos coincidindo, e afastadas entre si de uma distância igual ao raio R , conforme a Figura 10-6. Com estas bobinas podemos produzir um campo magnético conhecido.

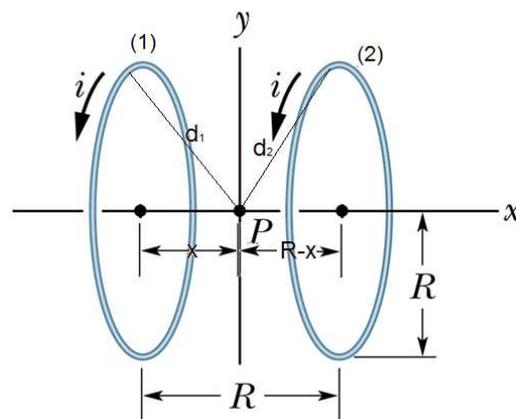


Figura 10-6: Bobina de Helmholtz.

O valor do módulo do campo magnético B ao longo do eixo de uma espira de raio R é:

$$B = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 i R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (7)$$

, onde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A, i é a corrente elétrica que percorre a espira e x a distância medida a partir do centro de uma das bobinas e ao longo do eixo.

Mostre que o módulo do campo magnético no centro geométrico, ou seja, entre as duas espiras que compõe a bobina de Helmholtz é dado por:

$$B = \frac{8\mu_0 Ni}{5^{3/2} R} \quad (8)$$

Onde N é o número de espiras que compõe cada bobina.

10.3 MATERIAIS

- Bobina de Helmholtz
- Bússola
- Fonte de Alimentação de Corrente Contínua
- Quadro rotativo com bobina plana
- Multímetro Digital (Voltímetro, Amperímetro)
- Cabos (6 banana/banana)

10.4 MEDIDAS

Considerações Prévias

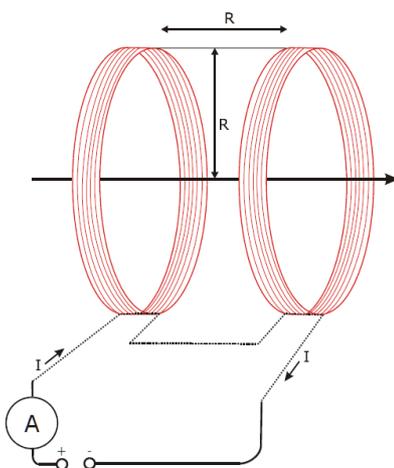
A intensidade do campo magnético produzido pelas bobinas, B, é função da corrente que circulará nas espiras. Se não houver corrente, a bússola colocada no interior da bobina de Helmholtz indicará a direção norte. Se a corrente aumentar, aparecerá um campo magnético perpendicular à componente horizontal de campo da Terra B_H , que fará a bússola girar de certo ângulo. Quando a agulha estiver apontando a direção noroeste ou nordeste, isto é, estiver a 45° em relação à direção norte-sul, o campo da bobina será igual ao da componente horizontal do campo magnético da Terra. Na realidade, é possível determinar o valor do campo B_H da Terra para qualquer que seja o ângulo de orientação da bússola (veja a equação 1). Atenção: este resultado é válido desde que nenhuma outra fonte atue simultaneamente com aquela em estudo. Tais fontes indesejáveis poderiam ser ferragens sobre ou sob a mesa de trabalho,

transformadores das fontes de alimentação, ímãs permanentes, fios percorridos por corrente, etc...

Sabendo que $N=124$ espiras e $R= 15$ cm expresse (equação 8) o campo magnético da bobina B em função da corrente i .

Procedimento 1

1. Conectar as bobinas de Helmholtz com a alimentação em corrente contínua passando por um amperímetro conforme figura abaixo.



2. Posicione a bússola na região central entre as bobinas e de maneira que a sua indicação N-S coincida com a leitura angular $\theta=0^{\circ}$.

3. Posicione o eixo da bobina na posição horizontal e paralelo à direção leste-oeste, isto é, perpendicular ao eixo norte-sul. Desta maneira o campo magnético uniforme da bobina (regra da mão direita) estará perpendicular a componente horizontal do campo magnético da Terra.

4. Ajustar uma corrente de alimentação contínua de aproximadamente $0,5 \times 10^{-3}$ A. A tensão de alimentação não deverá ultrapassar 2 V.

5. Faça agora 10 (dez) medidas de valores da corrente na bobina para as quais a agulha assume ângulos θ entre 15° e 75° . Note que para $\theta=45^{\circ}$ o campo produzido pela bobina será igual à componente horizontal do campo magnético da Terra.

6. Calcule os valores para o campo magnético da bobina B e a componente horizontal B_H correspondente às 10 medidas feitas. A média destes valores deverá

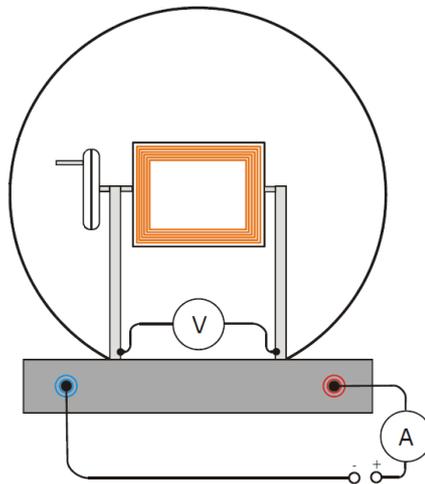
fornecer a melhor expressão do valor experimental da componente horizontal do campo magnético terrestre local.

7. Desligar a fonte de alimentação e retirar a bússola do campo magnético.

Procedimento 2

1. Aparafusar firmemente o quadro rotativo com a bobina plana e seus suportes nos apoios perpendiculares das bobinas de Helmholtz, de modo que a bobina plana possa ser girada no meio do campo homogêneo das bobinas de Helmholtz.

2. Conectar as bobinas de Helmholtz em série com a alimentação em corrente contínua passando por um amperímetro e um voltímetro diretamente com a bobina plana, conforme figura abaixo.



3. Ajustar uma corrente de alimentação de aproximadamente 15×10^{-3} A como alimentação para as bobinas.

4. Acionar a manivela e observar os valores no voltímetro. Alterar a velocidade de rotação até que atinja um valor maior. O que você conclui?

5. Posicionar as bobinas de Helmholtz de modo que o campo magnético das bobinas de Helmholtz e o campo magnético da Terra estejam em paralelo. Girar a bobina plana e observar a tensão.

6. Elevar a corrente nas bobinas de Helmholtz até que não há nenhuma tensão de indução nas saídas da bobina plana.

7. Calcule o campo magnético das bobinas quando a corrente induzida é igual a zero e conseqüentemente encontre a componente horizontal do campo magnético terrestre local. Compare com o valor obtido anteriormente.

EXPERIMENTO 11: DEMONSTRAÇÕES SOBRE ELETROMAGNETISMO

11.1 OBJETIVOS

Observar, descrever e explicar algumas demonstrações de eletromagnetismo.

11.2 INTRODUÇÃO

Força de Lorentz

Do ponto de vista formal, devemos ter em mente que é impossível tratar cargas elétricas em movimento sem levar em consideração a existência do campo magnético. Veremos logo adiante que cargas em movimento criam um campo magnético. Por outro lado, havendo um campo magnético em determinada região do espaço, este exercerá uma força sobre uma carga em movimento.

Existem duas formas básicas de criação de um campo magnético. A primeira tem a ver com a descoberta do fenômeno; trata-se do campo de um ímã permanente. A segunda forma tem a ver com o campo criado por uma carga em movimento; trata-se do campo criado por uma corrente elétrica.

Não importa, para o momento, qual a fonte de criação, o que importa é que dado um campo magnético, \vec{B} , este exerce uma força sobre uma carga, q , em movimento:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

onde \vec{v} é a velocidade da carga. A força magnética é nula em duas circunstâncias: Carga estacionária ($v=0$); Velocidade paralela ao vetor campo magnético.

No caso geral, em que temos um campo elétrico, E , e um campo magnético, a força sobre uma carga em movimento é dada por

$$\vec{F} = \vec{F}_E + \vec{F}_B = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2)$$

A força expressa em (2) é conhecida como força de Lorentz. O sentido da força é obtido pela regra da mão direita para o produto vetorial (Figura 11-1).

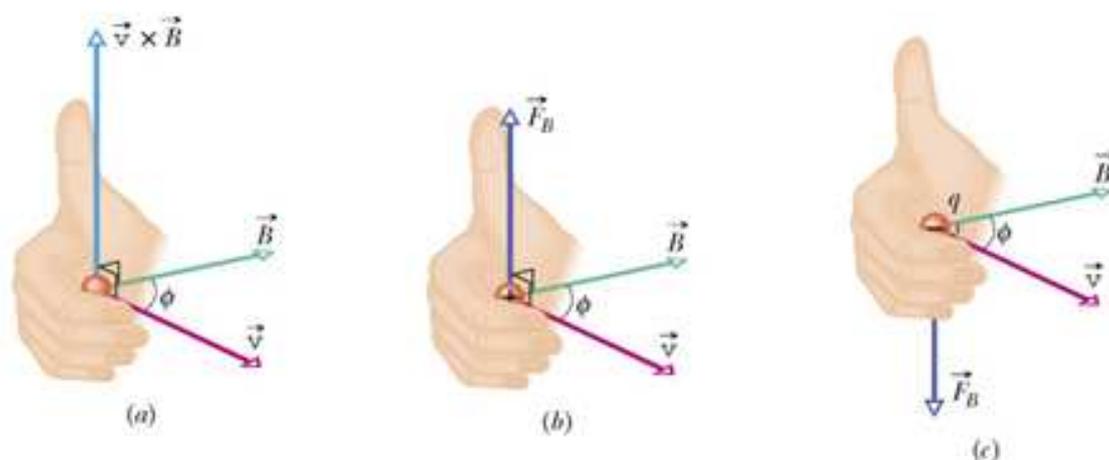


Figura 11-1: (a) O polegar da mão direita aponta na direção de $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ quando os outros dedos apontam de \mathbf{v} para \mathbf{B} . (b) Se a carga q é positiva, a força \mathbf{F}_B tem o mesmo sentido que $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. (c) Se q é negativa, a força \mathbf{F}_B tem o sentido oposto ao de $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$.

Força sobre uma corrente

Quando um fio condutor é percorrido por uma corrente elétrica, surge em torno dele um campo magnético. A figura 11-2 mostra o efeito do campo magnético produzido na agulha de uma bússola quando pelo fio condutor passa uma corrente elétrica.

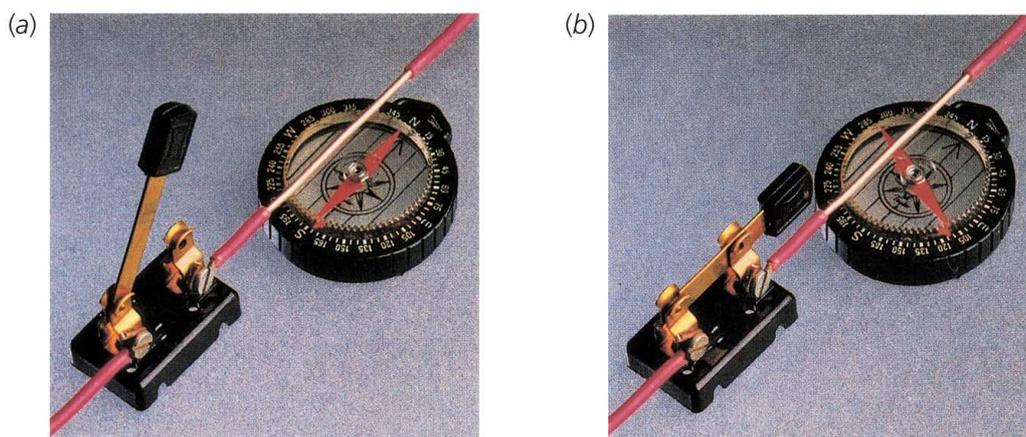


Figura 11-2: Experimento de Oersted. (a) Quando não existe corrente no fio, a agulha de bússola aponta para o norte. (b) Quando o fio conduz uma corrente, a agulha da bússola é defletida na direção do campo magnético resultante.

A lei de Ampère estabelece que a integral de linha do campo magnético ao longo de qualquer trajetória fechada C (Figura 11-3) é proporcional à somatória das correntes que atravessam a mesma:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I$$

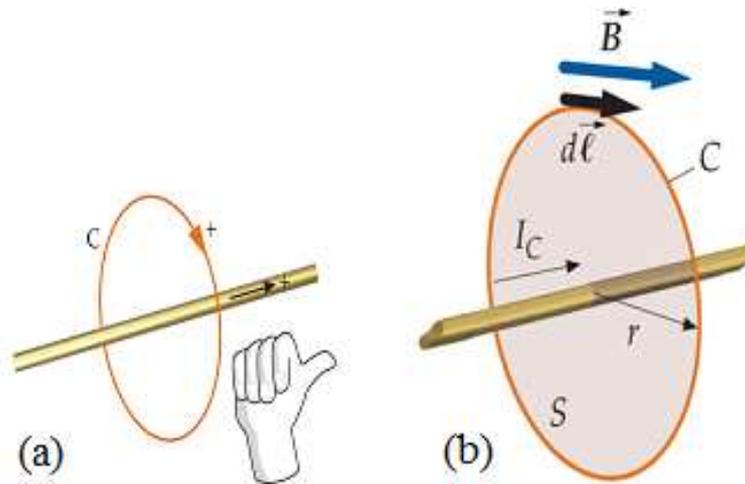


Figura 11-3: (a) O sentido positivo para a integral de caminho para a lei de Ampère. (b) Geometria para calcular o campo magnético de um fio condutor longo e retilíneo usando a lei de Ampère.

Se um campo magnético exerce uma força sobre uma carga em movimento, é óbvio que ele exercerá uma força sobre uma corrente elétrica. Como calcular esta força?

A força sobre um elétron é dada por $F = evB$. Supondo que existam N elétrons no segmento L do fio (seção reta A), tem-se que a densidade eletrônica será $n = N/LA$. Sabemos que $J = nev$, logo,

$$J = \frac{I}{A} \Rightarrow v = \frac{IL}{Ne}$$

A partir desses resultados, temos que a força sobre um elétron será $F = \frac{IL}{N}B$

Portanto, a força sobre o segmento de fio será $F_{\text{fio}} = NF_{\text{elétron}} = ILB$

A expressão geral é dada por

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B} \quad (3)$$

O sentido da força é obtido pela regra da mão direita para o produto vetorial.

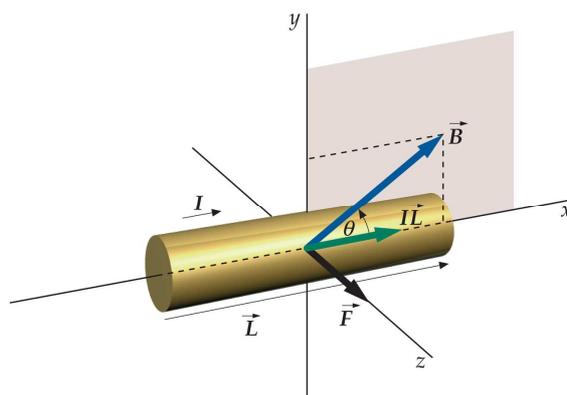


Figura 11-4: Força magnética em um segmento de fio conduzindo corrente em um campo magnético. A corrente está na direção x , o campo magnético está no plano xy e faz um ângulo θ com a direção $+x$. A força magnética F está na direção $+z$, perpendicular a B e a L e tem magnitude $ILB\sin\theta$.

Imãs Permanentes

De forma similar ao caso anterior, onde elétrons percorrendo um fio condutor produzem um campo magnético, elétrons circulando em orbitais atômicos também podem produzi-lo, seguindo a lei de Ampère. Neste caso, os orbitais atômicos fazem a função do fio condutor.

Apesar de estes movimentos serem muito complicados, podemos admitir neste modelo simples, que são equivalentes aos movimentos de elétrons em microespiras fechadas no interior de um imã permanente, como mostra a Figura 11-5:

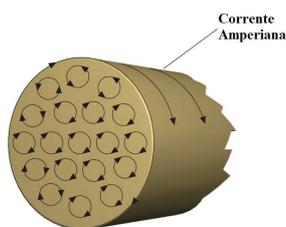


Figura 11-5: Um modelo de anéis de corrente atômicos.

Suponhamos que todas as microespiras, que aparecem na Figura 11-5, são paralelas e percorridas por correntes de mesmo sentido de I . Quando o material é homogêneo, a corrente líquida no interior do material é nula, pois há o anulamento entre as correntes de microespiras vizinhas. No entanto, uma vez que não ocorre o mesmo na superfície do corpo, o resultado é que as microespiras externas produzem uma corrente superficial denominada corrente de Ampère, I . Esta corrente resultante, que percorre o cilindro no mesmo sentido das correntes existentes em cada microespira,

faz com que este pedaço de imã permanente se comporte como um solenóide, conforme Figura 11-6:

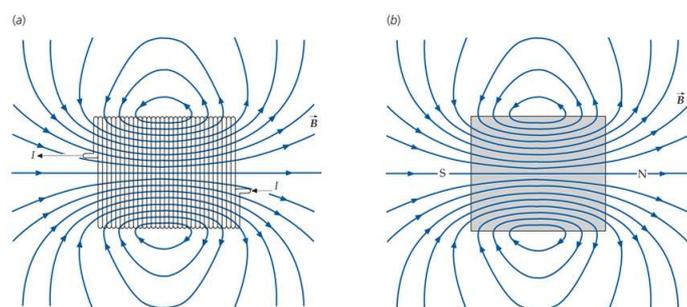


Figura 11-6 a) linhas de campo de um solenóide; b) linhas de campo de uma barra de imã.

Tanto o solenóide quanto à barra imantada apresentam uma estrutura comum: a presença de dois polos magnéticos norte e sul, os quais não surgem separadamente na natureza, por esta razão denominados dipolos magnéticos.

Logicamente, na presença de um campo magnético uniforme, todos os dipolos magnéticos sofrem um torque e se orientam ao longo do mesmo, de forma similar a agulha na presença do campo magnético terrestre.

Lei de Faraday

Para que possamos entender a lei descoberta por Faraday, devemos inicialmente conhecer o conceito de fluxo magnético. Consideremos uma superfície plana imaginária, de área A , colocada dentro de um campo magnético uniforme \mathbf{B} . Traçando-se uma normal \hat{n} à superfície, designemos θ o ângulo formado por esta normal com o vetor \mathbf{B} , veja Figura 11-7:

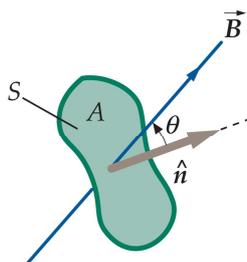


Figura 11-7: Superfície plana imaginária.

O fluxo magnético que percorre através desta superfície é representado pela letra grega ϕ e definido pela seguinte expressão:

$$\phi_m = NBA \cos \theta \quad (4)$$

O conceito de fluxo magnético através de uma superfície pode ser interpretado em termos do número de linhas de indução que atravessam esta superfície. Quanto maior

o número de linhas de indução que atravessam a superfície, maior será o valor do fluxo magnético.

Se, ao invés de termos uma superfície plana imaginária submersa em um campo magnético, tivermos uma espira plana qualquer, constituída de um fio condutor de área A, dois fatos poderão ocorrer:

- 1) Se o fluxo magnético não se altera no tempo nada ocorrerá;
- 2) Se o fluxo magnético se altera no tempo, por um motivo qualquer, surgirá uma tensão elétrica na espira, denominada força eletromotriz induzida (fem), \mathcal{E} , cuja intensidade é dada por:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\phi_m}{dt} \quad (5)$$

A Figura 11-8 mostra a variação da fem quando o fluxo magnético varia no tempo.



Figura 11-8: Demonstração de fem induzida, quando o imã é aproximado ou afastado da bobina, uma fem é induzida na bobina, como mostrado pela deflexão do Galvanômetro.

Geralmente, a fem é observada através da corrente que percorre o circuito. O sinal negativo na equação 5 é explicado pela lei de Lenz: qualquer corrente induzida tem um sentido tal que o campo magnético que ela gera se opõe à variação do fluxo magnético que a produziu.

Correntes de Foucault

Quando uma espira retangular movimenta-se através de um campo magnético, se houver variação do fluxo magnético através desta espira, surge uma f.e.m. induzida segundo a lei de Faraday como mostra a Figura 11-9:

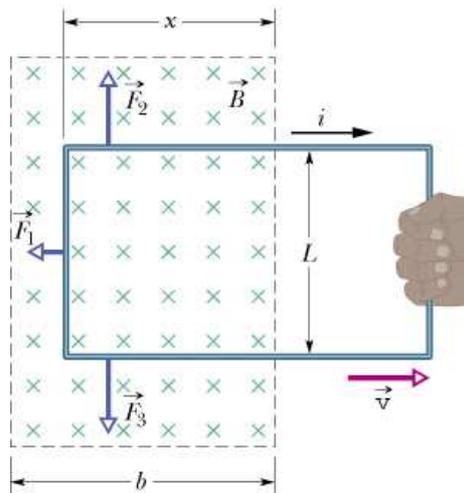


Figura 11-9: Uma espira é puxada para fora de uma região onde existe um campo magnético. Enquanto a espira está se movendo, uma corrente i no sentido horário é induzida na espira.

Este fenômeno, contudo, pode aparecer também em condutores maciços, como é o caso de uma chapa metálica (Figura 11-10). Como um condutor maciço possui resistência elétrica pequena, estas correntes induzidas (correntes de Foucault ou correntes parasitas), podem atingir valores consideráveis. Portanto, podem conseqüentemente aquecer o condutor. Geralmente as correntes parasitas são indesejáveis (por exemplo, em transformadores, motores, etc...), pois provocam perda de energia por aquecimento Joule e esta energia dissipada deve ser transferida para o ambiente.

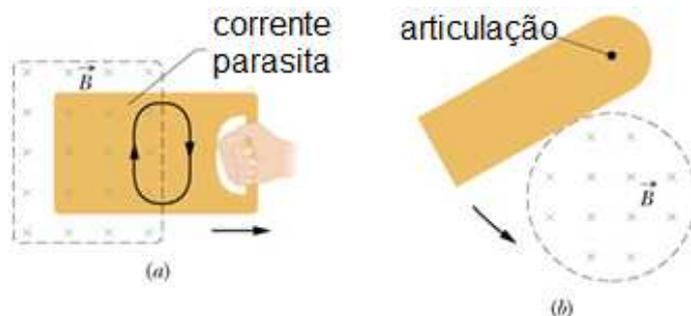


Figura 11-10: (a) Correntes parasitas induzidas em uma placa ao ser puxada para fora de uma região com campo magnético. (b) Correntes parasitas são induzidas em uma placa condutora toda vez que ela entra ou sai de uma região onde existe um campo magnético.

A interrupção dos caminhos condutores na lâmina metálica pode reduzir as correntes parasitas (Figura 11-11). Faz-se a substituição dos blocos metálicos maciços constituídos por lâminas isoladas uma da outra. Por vezes, as correntes de Foucault podem ser desejáveis, como acontece em certos fornos elétricos chamados de fornos de indução.

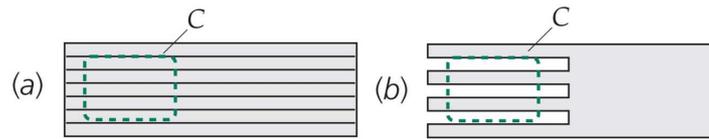


Figura 11-11: (a) Lâmina construída de tiras de metal coladas, a cola isolante entre as tiras aumenta a resistência. (b) Cortes na barra metálica reduzem as correntes parasitas.

Influência do meio no valor do campo magnético

Nos itens anteriores, analisamos os campos magnéticos criados por condutores percorridos por correntes elétricas sem, entretanto, nos referirmos ao meio no qual eles se encontravam. Verifica-se experimentalmente, que o valor do campo magnético em torno de um fio percorrido por uma corrente elétrica é diferente daquela que existiria caso o mesmo se encontrasse no ar (rigorosamente falando no vácuo, porém a diferença entre as duas situações é insignificante). Portanto, a presença de um meio material provoca alterações na intensidade do campo. A seguir faremos uma análise destas modificações, procurando entender como e por que elas ocorrem.

Imantação de um Material

Quando um campo magnético atua em um meio material qualquer, este meio sofre uma modificação e dizemos que ele se imanta (ou se magnetiza).

Para entendermos em que consiste esta imantação, devemos nos lembrar de que existem, no interior de qualquer substância, correntes elétricas elementares, geradas pelos movimentos dos elétrons nos átomos constituintes da matéria. Estas correntes elementares criam pequenos campos magnéticos, de modo que cada átomo pode ser considerado como um pequeno imã (imã elementar) como mostra a Figura 11-12:

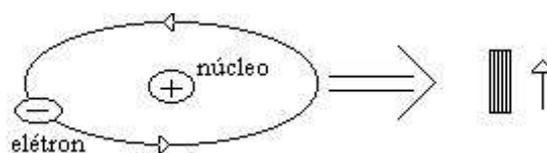


Figura 11-12: Considerando um átomo como um pequeno ímã.

No interior de um material no seu estado normal (não magnetizado), estes ímãs elementares encontram-se orientados inteiramente ao acaso, como mostra a Figura 11-13a, de modo que os campos magnéticos criados pelos átomos da substância tendem a se anular, sendo nulo o campo magnético resultante.

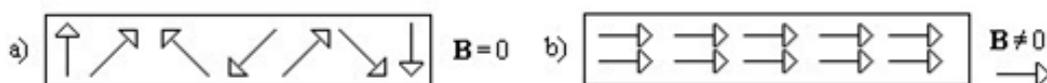


Figura 11-13: a) barra não imantada e b) barra imantada

Entretanto, se este material for submetido a um campo magnético B , este campo atuará sobre os ímãs elementares tendendo a orientá-los como mostra a Figura 11-13b. Em virtude desta orientação, os campos magnéticos elementares dos átomos se reforçam e o material passa a apresentar efeitos magnéticos apreciáveis. Nestas condições, dizemos que a substância está imantada ou magnetizada, ou seja, o material passa a se comportar como um ímã.

De acordo com o comportamento de seus momentos magnéticos em um campo magnético externo os materiais são classificados em três categorias:

1- Substâncias diamagnéticas: são aquelas que, ao serem colocadas em um campo magnético, tem seus ímãs elementares orientados em sentido contrário ao campo aplicado, implicando em um campo magnético resultante um pouco menor que o inicial. Quando o campo aplicado é desligado, o campo produzido pela substância também desaparece (desmagnetização). Ex: vidro, bismuto, cobre, água, chumbo, etc.

2- Substâncias paramagnéticas: são aquelas que, ao serem colocadas em um campo magnético, se imantam de maneira a provocar um pequeno aumento no valor do campo magnético. Nestas substâncias, os ímãs elementares tendem a se orientar no mesmo sentido do campo aplicado, fazendo com que o campo resultante tenha um valor um pouco maior do que o inicial. Quando o campo aplicado é desligado, o campo produzido pela substância também desaparece. Ex: alumínio, ar, cromo, estanho, platina, etc.

3- Substâncias ferromagnéticas: são aquelas que, ao serem colocadas em um campo magnético, se imantam fortemente, de modo que o campo magnético que eles estabelecem está no mesmo sentido do campo aplicado e possui uma intensidade muito maior que a dele. O campo magnético resultante pode se tornar centenas e até milhares de vezes maiores do que o campo inicialmente aplicado. Quando o campo aplicado é desligado, o campo produzido pela substância não desaparece. Para destruir as propriedades ferromagnéticas adquiridas por certas substâncias, devemos aquecê-las acima de certa temperatura, denominada temperatura de Curie. Ex: ferro, cobalto, níquel, gadolínio, disprósio e ligas especiais, etc.

Transformadores

Um transformador é um dispositivo usado para aumentar ou reduzir a tensão em um circuito sem perda apreciável de energia. A Figura 11-14 mostra um transformador simples que consiste em duas bobinas em torno de um núcleo comum de ferro. A bobina com a potência de entrada é chamada de primário e a outra bobina de secundário. O transformador opera baseado no princípio que uma corrente alternada

em um circuito induz uma fem alternada em um circuito nas proximidades devido à indutância mútua entre os dois circuitos. O núcleo de ferro aumenta o campo magnético para uma dada corrente e conduz sua direção de forma que o fluxo de acoplamento entre as bobinas se aproxima de 100 por cento. Se a diferença de potencial na bobina secundária é maior que a diferença de potencial na bobina primária, a corrente no secundário é menor que a corrente no primário e vice-versa. Perdas de energia surgem devido ao aquecimento Joule nas pequenas resistências em ambas as bobinas, ou nas correntes parasitas, e devidas à histerese nos núcleos de ferro.

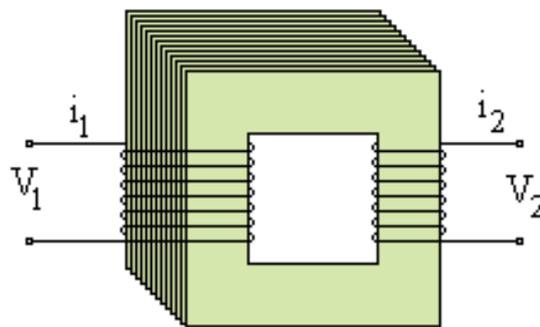


Figura 11-14: Um transformador com N_1 voltas no primário e N_2 voltas no secundário.

Se não há fuga do fluxo fora do núcleo de ferro, o fluxo através de cada volta é o mesmo para ambas as bobinas e a diferença de potencial na bobina secundária é:

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1 \quad (6)$$

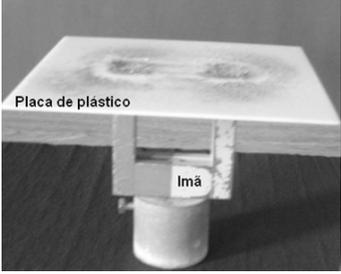
E a energia por unidade de tempo (potência) no primário será a mesma que no secundário:

$$P = i_1 V_1 = i_2 V_2 \quad (7)$$

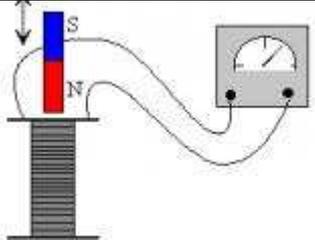
Se N_2 é maior que N_1 , a diferença de potencial na bobina secundária é maior que a queda de potencial na bobina primária, e o transformador é chamado de amplificador para o contrário o transformador é chamado atenuador.

11.3 MATERIAIS E DEMONSTRAÇÕES

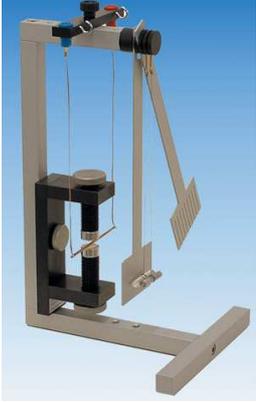
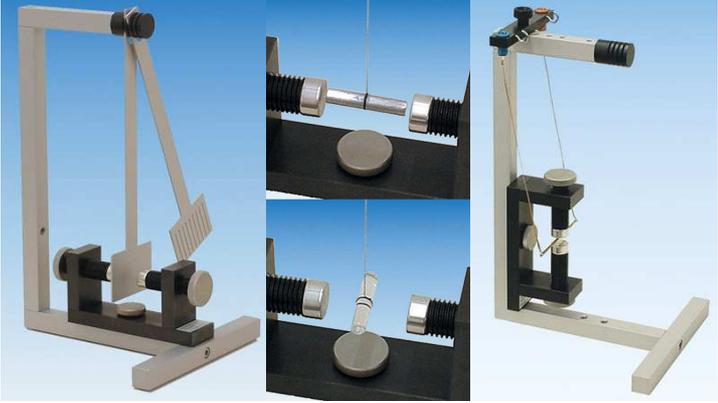
11.3.1 Descreva o observado no experimento abaixo e explique com base na teoria

Materiais	Experimentos
 <p>Ímã ferradura, condutor reto, anel condutor, fonte, cabos e limalha de ferro</p>	 <p>Linhas de campo magnético</p>

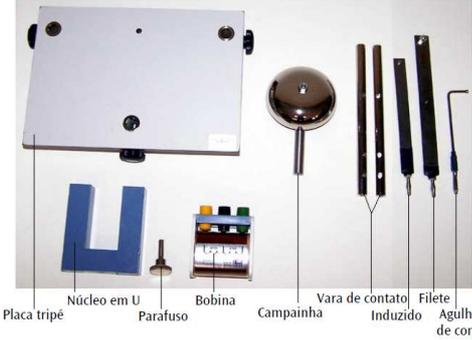
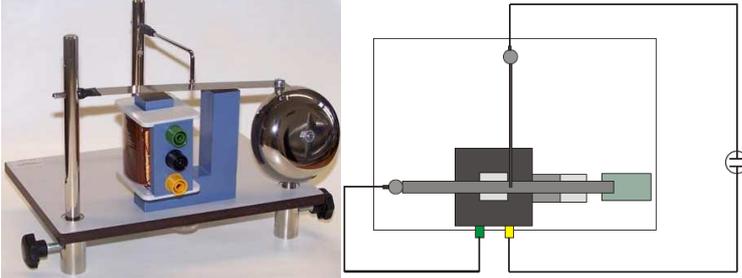
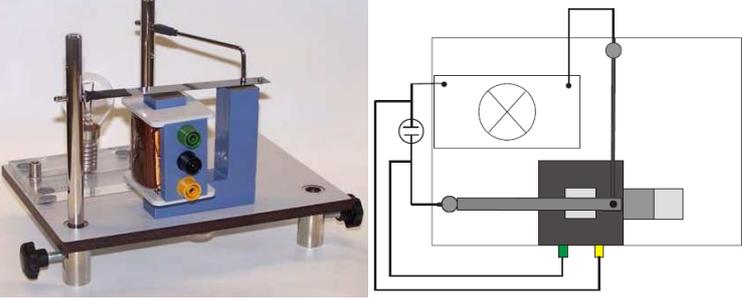
11.3.2 Descreva o observado no experimento abaixo e explique com base na teoria

Materiais	Experimentos
 <p>Ímã em barra, bobina, amperímetro, cabos, tubo de plástico, tubo de alumínio, magneto</p>	 <p>Lei de Faraday - Lei de Lenz e Freio magnético</p>

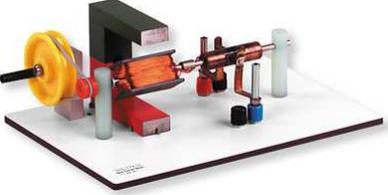
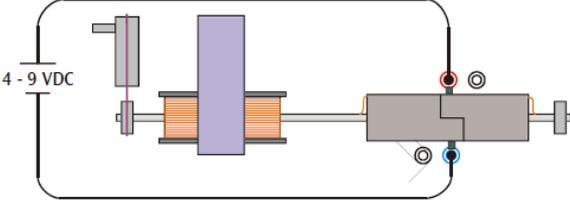
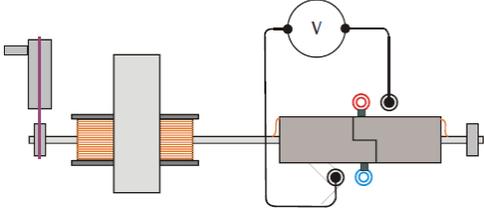
11.3.3 Descreva o observado no experimento abaixo e explique com base na teoria

Materiais	Experimentos
 <p data-bbox="245 792 587 831">Aparelho eletromagnético</p>	 <p data-bbox="651 792 1337 831">Correntes parasitas – Imantação – Força de Lorentz</p>

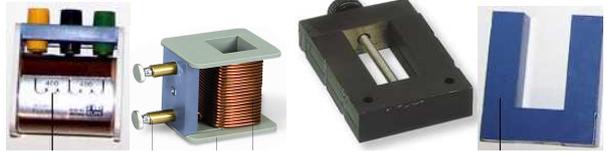
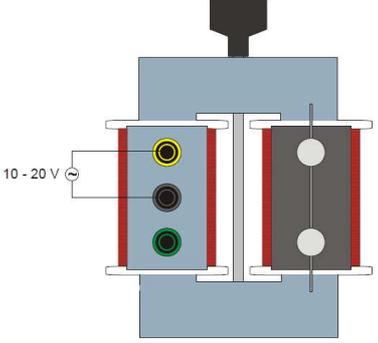
11.3.4 Descreva o observado no experimento abaixo e explique com base na teoria

<p>Materiais:</p>	 <p>Placa tripé Núcleo em U Parafuso Bobina Campainha Vara de contato Induzido Filete de contato</p>
<p>Experimento 1:</p>	 <p>Montagem de uma campainha</p>
<p>Experimento 2:</p>	 <p>Montagem de um relê</p>

11.3.5 Descreva o observado no experimento abaixo e explique com base na teoria

Materiais:	 <p>Motor elétrico e gerador</p>
Experimento 1:	 <p>Operação como motor elétrico (com ímã permanente)</p>
Experimento 2:	 <p>Operação como gerador AC</p>

11.3.6 Descreva o observado no experimento abaixo e explique com base na teoria

Materiais	Experimento
 <p data-bbox="336 622 933 712">Bobina 200 voltas, bobina de alta corrente (22 voltas) e núcleo em U (ferro doce ou lata)</p>	 <p data-bbox="979 748 1348 779">Transformador desmontável</p>

Alunos:

Data:

Turma:

APÊNDICE A: TEORIA DOS ERROS

1. INTRODUÇÃO

Uma afirmação inicial que podemos fazer é que nada é exato em uma ciência experimental. O ato de se medir é um ato de se interferir de alguma maneira no fenômeno e esta interferência faz com que não possamos "ver" o fenômeno como ele realmente acontece. Um exemplo simples pode esclarecer melhor esta questão: Quando vamos medir a corrente que atravessa um circuito colocamos em serie com o mesmo um amperímetro, e como este medidor tem certa resistência interna R_a que, embora normalmente pequena comparada às outras resistências do circuito, modifica as características do mesmo. Vários outros exemplos poderiam ser citados, alguns não tão simples como este, mas sempre há o aparecimento da interferência do medidor na medida. Com o surgimento da Física Moderna, principalmente da Física das partículas elementares, pode-se mostrar claramente que nunca se obteve nem nunca se obterá uma medida exata de um fenômeno qualquer.

Por estas razões a medida de uma grandeza tem obrigatoriamente uma incerteza que será chamada aqui de **faixa de desvio, erro** ou simplesmente **desvio**.

Uma medida de uma grandeza deve ser sempre expressa com este desvio. Usamos de dois modos para escrever o valor da medida.

1. Dizemos que o valor da medida é:

$$X \pm \Delta X$$

Neste caso, o desvio ΔX tem a mesma unidade da medida X e é chamado de **desvio absoluto**.

2. Dizemos que o valor da medida é:

$$X \text{ com } 5\% \text{ de desvio}$$

Neste caso temos um **desvio relativo** que dá a razão entre o desvio absoluto e o valor da medida e é conseqüentemente adimensional.

2. DESVIO SOBRE UMA ÚNICA MEDIDA

i. Desvio absoluto, relativo e absoluto avaliado

Desvio avaliado é uma medida da limitação do aparelho a qual acarreta desvio na medida efetuada. Ele pode ser expresso de duas maneiras:

1. Quando o fabricante não indica a faixa de desvio do aparelho usamos para expressar o desvio a metade da menor divisão da escala do medidor. Um medidor (exclua os medidores multiescalas) dá sempre o mesmo desvio avaliado independente

do valor da medida. O desvio absoluto avaliado deve ser sempre expresso na mesma unidade da grandeza da medida efetuada.

2. O fabricante indica a faixa de desvio do aparelho. Isto é feito sempre por porcentagem, ou seja, o fabricante dá a razão percentual entre o desvio absoluto e o valor da medida ($\Delta X/X$). Por isso, este tipo de desvio é chamado **Desvio Relativo**. Como o desvio relativo é a razão entre dois valores expressos na mesma unidade, então ele é **adimensional**. Exemplo: As indústrias de resistores costumam indicar o desvio no valor das resistências em porcentagem. O valor da resistência de um resistor é normalmente indicado por anéis coloridos. O último destes anéis indica a faixa de desvio: ouro 5%, prata 10%.

Vamos recapitular aqui o que vimos anteriormente:

Desvio Absoluto - Tem sempre a mesma unidade que a grandeza.

Desvio Relativo - É a razão entre o desvio absoluto e o valor da medida e por isso é um número. Muitas vezes é usado em porcentagem.

Desvio Absoluto Avaliado - Tem a mesma unidade que a grandeza e vale metade da menor divisão da escala do medidor.

ii. Algarismos significativos

Suponhamos que queremos medir o comprimento de uma placa de circuito e dispomos de uma régua graduada de 1 em 1 mm. Aproximamos a régua da barra (veja Figura 1) e fazemos a medida. Como devemos expressar o resultado da medida?

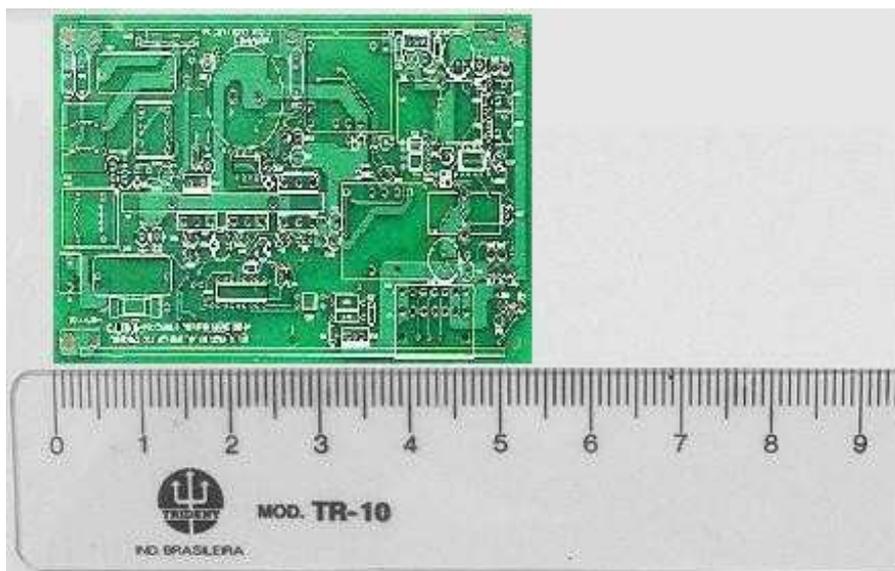


Figura 1: Medida do comprimento de uma placa de circuito.

A régua representada na Figura 1 nos dá precisamente o valor da medida em milímetros, mas a casa dos décimos de milímetros pode ser apenas estimada.

Da casa seguinte, a casa de centésimos de milímetros, não temos a menor ideia e não faz nenhum sentido a avaliação dela.

O nosso resultado deve ser expresso com todos os algarismos precisos mais o algarismo avaliado. O comprimento da placa será expresso como 5,35 cm (uma vez que o comprimento está entre dois traços de milímetros).

Os algarismos que compõem o resultado de uma medida são chamados algarismos significativos. **Toda medida se expressa por n algarismos precisos mais um e somente um algarismo duvidoso.**

Observação 1 - Os zeros a esquerda do primeiro algarismo não nulo não são significativos, pois o número de significativos não dependem da unidade em que expressamos o resultado da medida. Assim:

$$5,35 \text{ cm} = 0,0535 \text{ m} = 0,0000535 \text{ km} = 53,5 \times 10^3 \mu\text{m} = 53,5 \times 10^6 \text{ nm} = 53,5 \times 10^9 \text{ pm}$$

Em todos os casos temos apenas 3 algarismos significativos sendo dois precisos e outro duvidoso.

Observação2 - Os zeros a direita do último algarismo não nulo são significativos, pois indicam um valor medido. Assim:

0,0535 m tem três significativos

5,3500 cm tem cinco significativos

Você pode dizer qual a menor divisão dos medidores que fizeram estas medidas?

iii. Regras de Arredondamento

Quando queremos fazer operações com algarismos significativos muitas vezes é necessário tirar um ou vários algarismos significativos. Devemos então seguir as chamadas **Regras de Arredondamento**.

Quando o algarismo a ser retirado for:

- 1.- Menor que cinco, o algarismo anterior não muda
- 2.- Maior que cinco, adiciona-se uma unidade ao algarismo anterior
- 3.- O número cinco, temos dois casos:
 - a. quando o anterior for par, o algarismo anterior não muda
 - b. quando o anterior for impar, adiciona-se uma unidade ao algarismo anterior.

iv. Majoração de desvios

Na seção anterior vimos que as medidas têm certo número de algarismos precisos e um algarismo duvidoso. É sobre este algarismo duvidoso que incide o desvio. Por esta razão o desvio avaliado absoluto é definido como sendo metade da menor divisão da escala, ou seja, incide na casa duvidosa.

Isto faz com que **o desvio absoluto só deve ter um único algarismo significativo**. Quando queremos operar com medidas, algumas questões devem ser vistas. Veja o exemplo:

- Ache o semiperímetro de uma mesa estreita e comprida cujas dimensões são: $(50,05 \pm 0,01)$ cm e $(200,0 \pm 0,4)$ cm

Devemos calcular o valor máximo e o valor mínimo da soma, o que significa que devemos considerar os desvios ou ambos positivos ou ambos negativos.

Operando temos: $(250,05 \pm 0,41)$ cm

Qual deve ser a faixa de desvio? Vimos anteriormente que um desvio absoluto só pode ter um algarismo significativo. Mas, se usamos as mesmas regras de arredondamento, iremos limitar a faixa de desvio e perder a certeza de que o nosso valor corresponde realmente a soma das duas medidas. Então, devemos **majorar o desvio**, ou seja, tomar um valor maior para conservar a nossa certeza.

Nosso resultado deve ser expresso como:

$$(250,0 \pm 0,5) \text{ cm}$$

Observe que o resultado é coerente; o desvio absoluto apresenta um único algarismo significativo que incide sobre o algarismo duvidoso da medida. Note que após majoração do erro deduz-se que o algarismo duvidoso da soma encontra-se na casa de milímetros e não décimos de milímetros.

Desvio calculado: 0,41 cm

Desvio majorado: 0,5 cm

Soma calculada: 250,05 cm

Posição algarismo duvidoso da soma: 250,0 cm

Resultado final: $(250,0 \pm 0,5)$ cm

v. Precisão e Certeza

A precisão de medida é definida a partir do desvio relativo. Temos uma precisão maior quanto menor for o desvio relativo. É sempre desejável obtermos uma precisão maior possível. Isto nos leva a outra questão:

Suponha que fizemos uma medida com um determinado medidor e, achando que o desvio relativo da medida deu um valor muito grande, diminuimos arbitrariamente este desvio. O que deve acontecer? Se diminuirmos arbitrariamente a faixa de desvio já não temos certeza que o valor da medida que fizemos se encontra dentro na faixa de valores, pois esta faixa se tornou estreita.

Vemos então que precisão e certeza são duas coisas relacionadas e não podemos a nossa vontade modificar uma sem que a outra se modifique.

vi. Propagação de desvios

Todas as equações que descrevem fenômenos físicos são relações entre grandezas medidas. Estas grandezas têm desvios e, quando definimos uma função cujos parâmetros são valores medidos, devemos esperar que exista um desvio na determinação da função. Interessa-nos saber como os desvios sobre as variáveis se propagam na função:

Considere uma função $F(X, Y, Z)$. Os parâmetros X, Y, Z são valores medidos em laboratório com desvios absolutos $\Delta X, \Delta Y$ e ΔZ . Devemos esperar que a função F sofra um desvio ΔF . Este valor ΔF deve estar relacionado com os desvios dos parâmetros e com a própria função.

Vamos supor agora que estes desvios são pequenos em relação à medida. Podemos então fazer uma aproximação e substituir a diferencial da função e de seus parâmetros pelos desvios $\Delta F, \Delta X, \Delta Y$ e ΔZ . Ainda devemos fazer uma observação. Uma derivada dá a variação da função em relação a variável; no nosso caso a derivada dá a variação da função quando temos uma pequena incerteza na variável. Então ela está relacionada com o desvio e como não podemos subtrair desvios, devemos considerar estas derivadas em módulos.

Assim, obtemos finalmente:

$$\Delta F = \left| \frac{\partial F}{\partial X} \right| \Delta X + \left| \frac{\partial F}{\partial Y} \right| \Delta Y + \left| \frac{\partial F}{\partial Z} \right| \Delta Z$$

Esta relação dá desvio absoluto na determinação da função F em relação aos desvios absolutos dos parâmetros. Se quisermos obter o desvio relativo da função F basta dividir o desvio absoluto pela função:

$$\frac{\Delta F}{F} = \left| \frac{\partial F}{\partial X} \right| \frac{\Delta X}{F} + \left| \frac{\partial F}{\partial Y} \right| \frac{\Delta Y}{F} + \left| \frac{\partial F}{\partial Z} \right| \frac{\Delta Z}{F}$$

Vejamos um exemplo simples: Qual o desvio relativo que se comete na determinação do $\cos(\theta)$ quando $\theta = 60^\circ$ com um desvio absoluto de $0,1^\circ$?

Devemos, antes de tudo, expressar θ em radianos, pois é a unidade de ângulo que tem sentido matemático.

$$\begin{array}{l} \pi \rightarrow 180^\circ \\ \Delta \theta \rightarrow 0,1^\circ \end{array} \Rightarrow \Delta \theta = \frac{0,1\pi}{180}$$

Vamos resolver então no nosso exemplo:

$$\Delta(\cos \theta) = \left| \frac{\partial \cos \theta}{\partial \theta} \right| \Delta \theta$$

$$\Delta(\cos \theta) = |\operatorname{sen} \theta| \Delta \theta$$

Como queremos o desvio relativo

$$\frac{\Delta(\cos \theta)}{\cos \theta} = \left| \frac{\operatorname{sen} \theta}{\cos \theta} \right| \Delta \theta = |\operatorname{tag} \theta| \Delta \theta = \frac{\sqrt{3} \times 0,1 \times \pi}{180}$$

Operando achamos:

$$\frac{\Delta(\cos \theta)}{\cos \theta} = 0,00302$$

Em percentagem

$$\frac{\Delta(\cos \theta)}{\cos \theta} \% = 0,302\%$$

Vejamos agora o caso de funções simples, representado por quatro operações fundamentais.

$$F_1(x, y) = x + y$$

$$F_2(x, y) = x - y$$

$$F_3(x, y) = xy$$

$$F_4(x, y) = x / y$$

Usando a relação de propagação de desvios para a função $F_1(x, y)$:

$$\Delta F_1 = \left| \frac{\partial F_1}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial F_1}{\partial y} \right| \Delta y$$

Obtemos:

$$\Delta F_1 = \Delta x + \Delta y$$

Repetindo o mesmo procedimento para a função $F_2(x, y)$ encontramos o mesmo valor para o desvio, isto é:

$$\Delta F_2 = \Delta x + \Delta y .$$

Podemos estabelecer a seguinte regra prática:

O desvio absoluto da soma ou diferença de grandezas é igual a soma dos desvios absolutos destas grandezas.

Consideremos agora as funções que envolvem multiplicação e divisão.

$$\Delta F_3 = \left| \frac{\partial F_3}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial F_3}{\partial y} \right| \Delta y \rightarrow \Delta F_3 = y \Delta x + x \Delta y$$

Dividindo pelo valor da função, obtemos o desvio relativo:

$$\frac{\Delta F_3}{F_3} = \frac{y \Delta x}{xy} + \frac{x \Delta y}{xy} \rightarrow \frac{\Delta F_3}{F_3} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$$

Repetindo o mesmo procedimento para a função $F_4(x, y)$, obtemos:

$$\frac{\Delta F_4}{F_4} = \frac{1/y}{y/x} \Delta x + \frac{x/y^2}{y/x} \Delta y \rightarrow \frac{\Delta F_4}{F_4} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$$

Podemos estabelecer a seguinte regra prática:

O desvio relativo do produto ou quociente de grandezas é igual a soma dos desvios relativos destas grandezas.

Observação para o uso das regras práticas

As regras práticas estabelecidas na secção precedente podem ser usadas em muitos casos. Entretanto, devemos considerar alguns aspectos antes de aplicá-las. Vejamos um exemplo. Considere a função:

$$F(x) = \frac{x}{x+1}$$

Utilizando as regras práticas podemos obter diretamente o desvio relativo da função, ou seja:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta x}{x+1} = \frac{2x \Delta x + \Delta x}{x(x+1)}$$

Vamos resolver agora a mesma questão aplicando a relação:

$$\Delta F = \left| \frac{\partial F}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial F}{\partial y} \right| \Delta y + \left| \frac{\partial F}{\partial z} \right| \Delta z$$

Note que

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{1(x+1) - x}{(x+1)^2}$$

$$\Delta F = \frac{\Delta x}{(x + 1)^2}$$

O desvio relativo será então:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta x}{(x + 1)^2 \frac{x}{x + 1}} = \frac{\Delta x}{x(x + 1)}$$

Comparando agora os dois resultados

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta x}{x(x + 1)} + \frac{2 \Delta x}{(x + 1)} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta x}{x(x + 1)} \quad (2)$$

Vemos que o resultado obtido usando as regras práticas é maior.

Por que isto acontece?

A questão pode ser respondida se consideramos que o desvio Δx da variável x foi levado em conta mais de uma vez. Quando aplicamos as regras práticas calculamos o desvio do numerador da função (que é o desvio Δx da variável x).

Desta maneira consideramos o desvio da variável x duas vezes, fazendo com que o erro ΔF , da função $F(x)$, ficasse muito grande.

Isto acontece sempre quando trabalhamos com uma função que é o quociente de duas funções de mesmas variáveis, ou seja, uma função que tem a forma:

$$F(x, y) = \frac{G(x, y)}{H(x, y)}$$

Nestes casos nós não podemos aplicar as regras práticas para determinar o erro da função pois, deste modo, estaremos considerando os erros das variáveis mais de uma vez. Quando trabalhamos com esse tipo de função devemos sempre usar a relação:

$$\Delta F(x, y, z, \dots) = \left| \frac{\partial F}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial F}{\partial y} \right| \Delta y + \left| \frac{\partial F}{\partial z} \right| \Delta z + \dots$$

vii Exercícios

1. Para determinar o perímetro e a área de uma mesa duas pessoas mediram as suas dimensões lineares. O comprimento da mesa foi medido com uma régua graduada em centímetros. A largura foi medida por uma régua com graduações em milímetros. Os resultados são dados abaixo:

Comprimento = 1,595 m

Largura = 0,5900 m

- a) Os resultados foram expressos corretamente? Justifique!
- b) Qual é o desvio absoluto?
 - i) na medida da largura?
 - ii) na medida do comprimento?
 - iii) na determinação do perímetro?
- c) Qual é o desvio relativo?
 - i) na medida da largura?
 - ii) na medida do comprimento?
 - iii) na determinação do perímetro
 - iv) na determinação da área?

2. Em um circuito elementar composto de uma bateria, um resistor ôhmico R e um amperímetro, queremos determinar a diferença de potencial V fornecida pela fonte. A medida da corrente que atravessa o resistor foi feita por amperímetro graduado de 2 em 2 mA e vale 100 mA. O valor da resistência do resistor é fornecido pelo fabricante como sendo igual a $2,50 \text{ k}\Omega$ com um desvio relativo de 5%. A resistência interna do amperímetro é desprezível em relação à do resistor. Determine:

- a) a diferença do potencial V :
- b) o desvio absoluto cometido na determinação de V
- c) o desvio relativo.

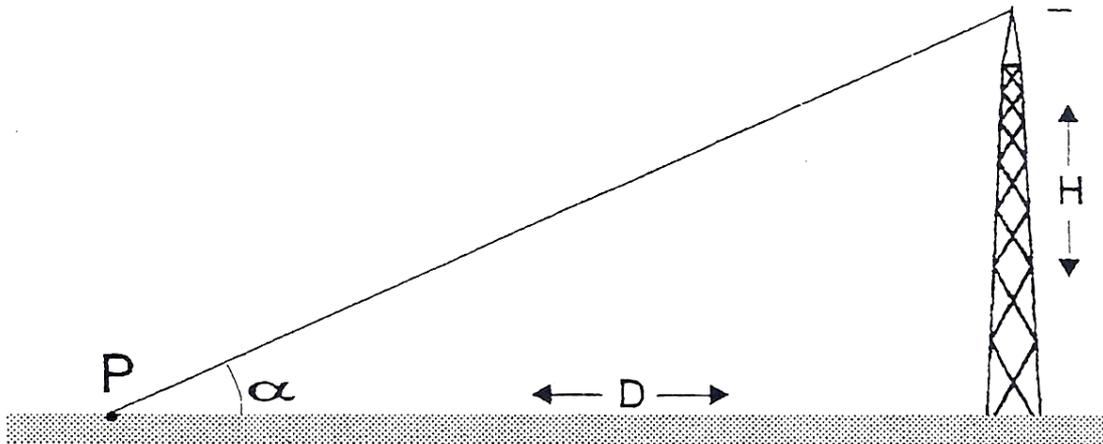
3. A força entre cargas fixas é dada pela relação:

$$f = k \frac{q_1 q_2}{R^2}$$

Sabendo-se que as duas cargas q_1 e q_2 são do mesmo valor, igual a $3 \times 10^{-10} \text{ C}$, e foram determinadas com um desvio de 10%. A distância R entre elas foi medida achando-se um valor de $(1,00 \pm 0,05) \text{ m}$. A constante K é suposta precisa e igual a $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2$. Determine:

- a) o desvio relativo na determinação da força F .
- b) o desvio absoluto.

4. Para determinar a altura H de uma torre vertical de televisão um observador se coloca no ponto P , a uma distancia O da base da torre com um teodolito ele mede o angulo α (mostrado na figura a seguir)



O teodolito é graduado de 0,02 em 0,02 radianos e o resultado da medida vale

$$\alpha = \frac{\pi}{4} \text{ rad}$$

A medida da distância D foi feita com uma fita hectométrica graduada de metro em metro e vale (D = 94,3 m).

- a) Determine a altura H da torre
- b) Mostre que o desvio absoluto cometido na determinação da altura H é dado por:

$$\Delta H = \Delta D \tan \alpha + D \frac{\Delta \alpha}{\cos^2 \alpha}$$

- c) Calcule o desvio H. Como deve ser expresso H levando em conta os algarismos significativos?
- d) Calcule o desvio relativo sobre H.

5. Queremos determinar a distância entre Ponta Grossa e Jaguariaíva e estamos de posse dos dados seguintes

Ponta Grossa – Carambeí	(20,8 ± 0,1) km
Carambeí – Castro	(21,36 ± 0,03) km
Castro – Jaguariaíva	(82 ± 1) km

Dos três dados acima:

- a) Qual é o dado que apresenta o menor desvio absoluto?
- b) Qual é o dado que apresenta o maior desvio relativo?
- c) Calcule a distância Ponta Grossa - Jaguariaíva.
- d) Determine os desvios absoluto e relativo cometidos neste cálculo.
- e) Escreva a distância com os algarismos significativos certos.

f) Assumindo que a largura média da estrada vale $(15,2 \pm 0,1)$ m, calcule a área da superfície da estrada.

g) Determine os desvios relativo e absoluto cometidos na determinação desta área.

h) Expresse a área, em metros quadrados, com os algarismos significativos certos.

6. Um dos vários métodos de medida da constante de permissividade elétrica ϵ de um meio consiste em usar um par de placas paralelas de área A submetidas a uma diferença de potencial e separadas pelo meio considerado. Um experimentador mediu a carga líquida em umas destas placas e encontrou $Q = 8,0 \times 10^{-12}$ C, com um erro relativo de 2%. As placas são iguais e quadradas com dimensões lineares $l_1=l_2=(1,00 \pm 0,05)$ cm e estão separadas por uma lâmina de acrílico de espessura $d=(2,02 \pm 0,02)$ mm. A diferença de potencial entre elas foi medida em um voltímetro graduado de 0,5 V em 0,5 V e marcou em sua escala $V = 8,0$ V. Calcule o valor de ϵ para o acrílico e avalie seu desvio relativo e absoluto sabendo que:

$$\epsilon = \frac{Qd}{VA}$$

3. TABELAS

As tabelas são de dois tipos: **Horizontal e Vertical**. Geralmente quando a experiência envolve muitas variáveis costuma-se construir uma tabela Vertical, isto é, costuma-se dispor os valores obtidos na vertical, exemplo:

V (Volts)	I (Ampère)	T (°C)	ϕ (rad)	R (Ω)	etc

Quando poucas variáveis são utilizadas e o número de medida é pequeno podem-se usar as tabelas Horizontais, por exemplo:

V (Volts)	
I (Ampères)	

É de fundamental importância que se especifique nas tabelas as unidades das grandezas envolvidas. Às vezes uma grandeza está expressa em uma unidade no sistema SI (Volt, por exemplo) e a outra grandeza está expressa em unidades de outro sistema, (comprimento em polegadas, por exemplo). É necessário, portanto fazer a conversão para um mesmo sistema para evitar erros. As tabelas devem aparecer geralmente com as grandezas expressas no mesmo sistema de unidades.

4. GRÁFICOS

Na construção de gráficos devem ser levados em conta os seguintes itens:

1. Escala Vertical e Horizontal, conveniente que facilite tanto a construção quanto a leitura do gráfico.

2. Unidade das grandezas representadas em cada eixo

3. Valores experimentais devem ser representados com suas respectivas incertezas. Quando possível, lançar em gráfico o ponto após cada medida. Isto possibilitará, depois de uma série de medidas, descobrir qual ponto contém um erro muito grande. Tal medida deve ser tomada novamente

4. Além disso, é fácil notar as regiões onde a curva apresenta picos e depressões. Então é necessário tomar muitos pontos nessas regiões para que se incorra num erro mínimo. Por exemplo, suponhamos que no eixo das abscissas foram tomados pontos de 2 em 2 (duas) unidades. Na região de pico ou depressão devemos tomar pontos de meia em meia unidade ou em intervalos menores.

5. Costuma-se, às vezes, colocar segmentos verticais e horizontais ou pequenos círculos em cada ponto com as dimensões do desvio cometido.

5. LINEARIZAÇÃO DE CURVAS

Os gráficos são usados em física para representar dados experimentais de um fenômeno físico. A partir deles nós podemos obter uma visão mais global do fenômeno estudado, e nos casos mais simples, encontrar uma solução matemática.

Para que seja bem entendido um gráfico deve ser bem claro:

- 1) Os nomes ou iniciais convencionais das grandezas representadas nos respectivos eixos.

- 2) Especificar as unidades usadas (também nos eixos) e usar uma escala coerente com dados (notar que as escalas horizontal e vertical são independentes).

- 3) Com os dados representados devemos uni-los por uma curva suave, sem "cotovelos", pois a existência destas daria duas inclinações em um mesmo ponto do gráfico.

4) O gráfico de mais fácil identificação e maior precisão é o da reta. É de interesse então, sempre que possível, transformar os gráficos de curvas em gráficos lineares para mais facilmente analisá-los e traçá-los.

Três funções aparecem frequentemente em Física

Função Linear: $y = Ax + B$ (1)

Função Exponencial: $y = C e^{mx}$ (2)

Função não linear do tipo: $y = Dx^n$ (3)

onde A, B, C, D, m e n são constantes

i. Função linear

O gráfico desta função é uma linha reta. Nesta análise gráfica os dados experimentais quando colocados em papel milimetrado se aproximam de uma reta conforme a Figura 2. Então se traça a reta média entre os pontos e o fenômeno estudado pode ser descrito por uma relação do tipo (1) onde A é o coeficiente angular e B o coeficiente linear da reta traçada.

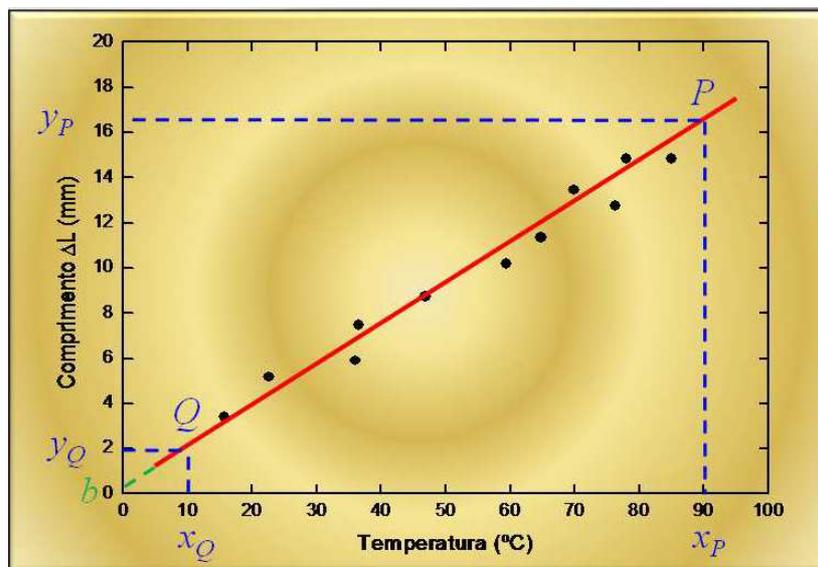


Figura 2: Ajuste linear

Para calcular o coeficiente angular escolhem-se dois pontos sobre a reta média (Q e P na Figura 2) e utiliza-se a expressão:

$$A = \frac{y_P - y_Q}{x_P - x_Q}$$

Para encontrar o coeficiente linear prolonga-se a reta média até a interseção com o eixo y, portanto:

$$B = y(0)$$

ii. Função exponencial

Traçando em um papel milímetro, o gráfico da função exponencial é do tipo:

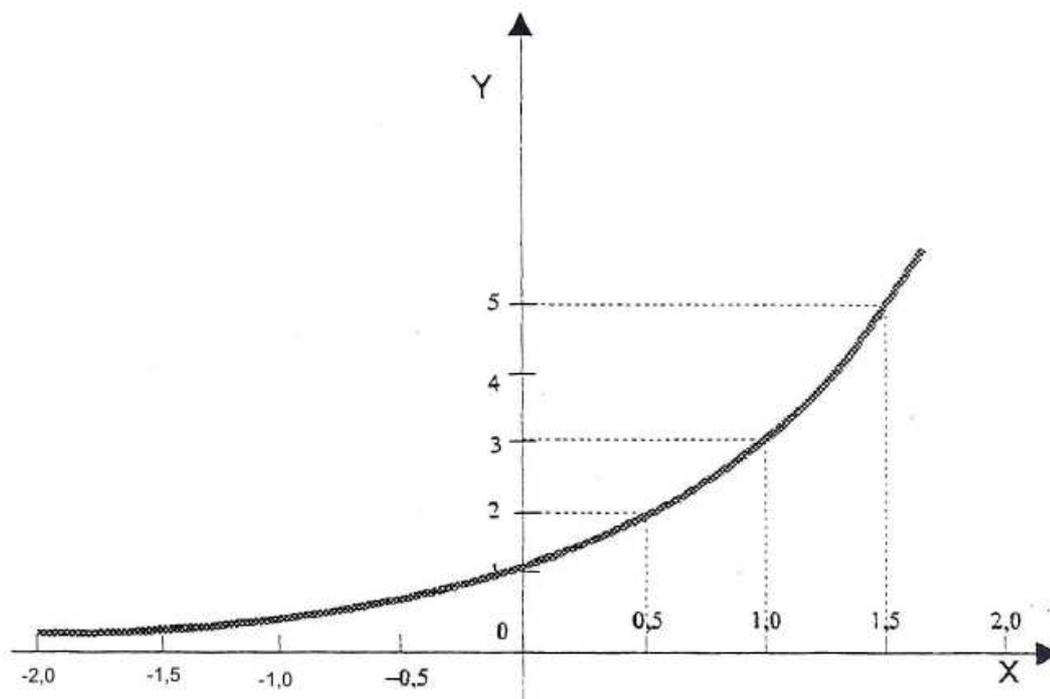


Figura 3: Função exponencial.

Agora, tomando o logaritmo decimal da expressão (2) teremos:

$$\log y = \log (Ce^{mx}) = \log C + mx \log e$$

$$\log y = \log C + (m \log e)x$$

Fazendo:

$$\log y = Y$$

$$\log C = c$$

obtemos a expressão:

$$Y = fx + c$$

que é uma relação linear.

Então, se nós temos uma tabela de dados experimentais onde o gráfico do logaritmo de uma das variáveis contra a outra variável dá uma reta, então o fenômeno físico atende a uma relação do tipo (2), onde

$$f = \frac{\log y_P - \log y_Q}{x_P - x_Q} = \frac{y_P - y_Q}{x_P - x_Q}$$

$$c = y(x=0)$$

$$m = \frac{f}{\log e}$$

Uma maneira equivalente de tratar o problema é usar um papel semi-log. Escolhendo nas ordenadas uma escala logarítmica evitaremos o cálculo dos logaritmos decimais de todos os valores de y , o que se torna tarefa mais simples.

Obs. Notar que em um papel log-log (base 10) cada unidade de variação na escala logarítmica corresponde a dez unidades de variações na escala linear.

iii. Função não linear do tipo $y=Dx^n$

O gráfico desta função é da forma

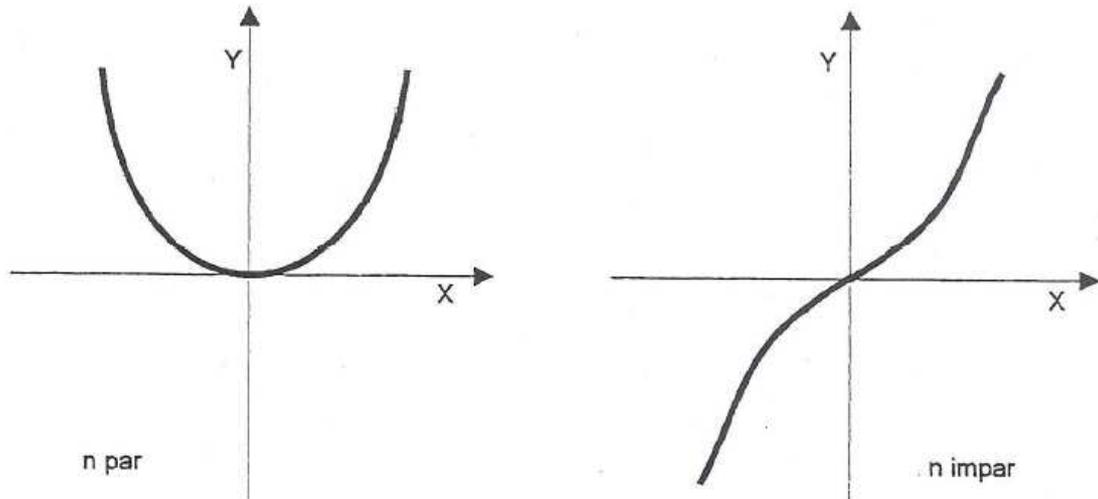


Figura 4: Função não linear para n par e ímpar.

Aplicando ao mesmo raciocínio anterior temos:

$$\log y = \log D + n \log x$$

Fazendo

$$\log y = Y \quad \log D = d \quad \text{e} \quad \log x = X$$

Obtemos

$$Y = nX + d$$

Por outro lado, se nós temos um conjunto de dados tal que o gráfico de seus logaritmos dá uma reta, então o fenômeno físico pode ser descrito por uma reta do tipo (3) onde:

$$D = y(x=1)$$

$$n = \frac{\log y_p - \log y_q}{x_p - x_q} = \frac{y_p - y_q}{x_p - x_q}$$

Para não ser necessário o cálculo dos logaritmos podemos fazer o gráfico em papel log-log.

iv. Interpolação e extrapolação gráfica

Frequentemente é necessário obter a partir de um gráfico de dados experimentais um ponto intermediário as medidas obtidas. A isto se chama Interpolação. Por outro lado, quando queremos obter pontos fora do nosso intervalo de medida devemos fazer uma extrapolação.

Interpolar e Extrapolar subentende obter uma estimativa da variável em um ponto não tabelado e isto então implica em se cometer erros. Quando estamos trabalhando com grandezas que variam suavemente a interpolação gráfica pode ser bastante aplicada e a faixa de erro não seria então muito superior à faixa de erros das próprias medidas experimentais. Mas quando nada sabemos do modo como variam as variáveis a interpolação se torna algo muito duvidoso e a faixa de erro se eleva bastante.

O caso da extrapolação já é mais difícil e a possibilidade de se incorrer em grandes erros se torna muito maior. Podemos ver o exemplo da água: O volume das substâncias aumenta sempre com a temperatura. No caso da água, no entanto, entre 0°C e 4°C ela aumenta de volume. Se tivéssemos uma tabela de dados experimentais que não inclusive o intervalo 0° - 4° C , estimar um valor, neste intervalo, incorreríamos em erros muito grandes.

Os casos de interpolação e extrapolação gráfica devem ser usados principalmente quando temos conhecimento do comportamento físico das variáveis.

A interpolação pode ser linear ou não linear. Os chamados Métodos Numéricos procuram basicamente achar um polinômio que mais se aproxima da curva em questão e, assim, determinar os pontos a serem interpolados. Os erros introduzidos por estes métodos tornam-se pequenos quando encontramos um polinômio que "case" perfeitamente com a curva estudada.

BIBLIOGRAFIA

1. TIPLER, Paul Allen; MOSCA, Gene. **Física para cientistas e engenheiros**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, c2009 vol 2.
2. HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2009 vol 3.
3. SEARS, Francis Weston; ZEMANSKY, Mark Waldo; YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física III: eletromagnetismo**. 12. ed. São Paulo, SP: Pearson Addison Wesley, c2008-2009 vol 3.
4. ALONSO, Marcelo; FINN, Edward J. **Física: um curso universitário**. São Paulo: E. Blücher, vol 2.
5. NUSSENZVEIG, H. Moysés. **Curso de física básica**. São Paulo: E. Blücher, vol 3.
6. SERWAY, Raymond A., JR JEWETT John W. **Princípios de física. Eletromagnetismo**. 3. Ed São Paulo: Thomson, vol 3.
7. CHAVES, Alaor. **Física Básica: Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: LTC.
8. HALLIDAY, RESNICK, KRANE **Física 3**, 5 ed. Rio de Janeiro: LTC.
9. VUOLO, José H. **Fundamentos da Teoria de Erros**. 2. Ed. Editora Edgard Blücher Ltda, SP, 1996.