

Autores

Prof. Ms. Jackson de Oliveira
Prof. Ms. José Ferreira Neto
Prof. Dr. José Humberto de Araújo

Equipe Técnica

Antonio Salviano de O. Sobrinho
Eng. Regina Maria Rodrigues Pinheiro Spinelli

Revisão: Prof. Dr. Mário Pereira da Silva

NATAL -RN

2009

INTRODUÇÃO

O presente texto é uma iniciativa de se desenvolver um material didático auxiliar voltado para o curso laboratorial de Física Experimental II, cujo objetivo visa a introduzir os alunos em técnicas experimentais voltadas para o estudo e aplicações do eletromagnetismo, focalizando os aspectos formativos e informativos da área.

Especificamente, os objetivos do curso podem ser divididos em duas partes: a primeira, de cunho informativo e, a segunda, no que se refere à formação do aluno. Em relação à parte informativa, o curso de Física Experimental II orienta os estudantes a adquirirem conhecimentos em física experimental nas áreas de eletricidade e magnetismo, de modo a entender seus conceitos fundamentais, medir grandezas relacionadas com fenômenos físicos e interpretar tais medidas, correlacionando-as com conceitos fundamentais. Em relação à formação do estudante, o curso busca o desenvolvimento da atitude científica, através do exercício da iniciativa, do raciocínio lógico, da capacidade de síntese e do senso crítico.

Os experimentos apresentados no texto são distribuídos em experimentos, onde cada assunto específico corresponde a um capítulo.

A apresentação de um determinado experimento compõe-se de: título, objetivos, introdução teórica, procedimento experimental, análise dos resultados e questões relativas ao experimento. A introdução teórica apresenta ao aluno o conteúdo do experimento do ponto de vista fenomenológico e quantitativo, na maioria das vezes, deduzindo-se as equações fundamentais e/ou calculando-se as grandezas envolvidas. O procedimento experimental descreve o material necessário e a diagramação para a execução do experimento. Na análise dos resultados o aluno é orientado a realizar a aquisição dos dados, construção de gráficos e obtenção das grandezas envolvidas. O experimento é concluído com um questionário para interpretação dos resultados obtidos.

Esta apostila encontra-se num processo constante de revisão e atualização, sempre no sentido de melhor adaptá-la ao uso dos novos equipamentos adquiridos pelo Laboratório de Ensino do DFTE assim como às novas práticas de ensino laboratorial de eletricidade e magnetismo.

PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

As atividades experimentais realizar-se-ão nas dependências do Laboratório I de Física, na sala denominada Eletricidade e Magnetismo.

Sempre que possível, as turmas serão distribuídas de forma a não ultrapassarem vinte alunos, que se distribuirão em grupos de trabalho. Cada grupo, contendo no máximo 04 alunos, ocupará uma das bancadas.

A assiduidade e a pontualidade são requisitos fundamentais numa atividade experimental. Para o curso de Física Experimental II, haverá uma tolerância de, no máximo 15 minutos, após a qual não será permitida a entrada do aluno.

Por outro lado, a elaboração dos conteúdos de atividades do curso fica a critério do Professor limitado aos experimentos apresentados nesta apostila.

Por se tratar de um curso básico de laboratório, o curso de Física Experimental II possui também a premissa de introduzir aos alunos noções básicas de organização e outros procedimentos laboratoriais.

O zelo no uso dos equipamentos é fundamental, pois poucos deles possuem mais de um exemplar em condições plenas de uso. Além do mais, alguns equipamentos e dispositivos fazem parte de vários experimentos, de forma que um equipamento danificado poderá inviabilizar a realização de outro experimento incluído no programa do curso.

Por se tratar de um curso que envolve o uso de aparelhos e dispositivos elétricos, solicita-se toda a atenção dos alunos quanto aos usos dos mesmos. Esta Apostila, várias vezes ao longo do texto, chama a atenção deste aspecto. Além dos mais, o Professor, a cada aula, se encarregará de lembrar os cuidados que o aluno deve ter ao manusear tais equipamentos.

Dessa forma, solicita-se ao aluno a aquisição do *Caderno de Laboratório*, que será por ele utilizado para fazer anotações de medidas, possíveis deduções, esboço de gráficos, resultado de cálculos, análises de resultados, responder às perguntas da apostila, síntese da experiência, conclusões, etc. Não se trata de um caderno de relatórios e sim um caderno para anotar os detalhes de um trabalho em andamento.

Pela sua importância, será exigido que cada aluno, **obrigatoriamente**, possua seu próprio *Caderno de Laboratório*, exclusivo para o Laboratório de Física Experimental II.

Recomendamos como *Caderno de Laboratório*, um caderno simples de 50 folhas, grampeado, no tamanho A4.

Aconselha-se que para cada experimento o Caderno de Laboratório deva conter:

- a. Título do experimento e data de realização;
- b. Objetivos do experimento;
- c. Esquema do aparato utilizado;
- d. Descrição dos principais instrumentos;

- e. Dados;
- f. Cálculos;
- g. Gráficos;
- h. Resultados e conclusões;
- i. Resolução das questões propostas no final do experimento.

Eventualmente, o professor poderá solicitar ao aluno o Caderno para efeito de avaliação bem como permitir a sua consulta durante as provas.

CAPÍTULO I

1. INSTRUMENTOS DE MEDIDA: USOS E CUIDADOS.

2. OBJETIVO

Utilizar o multímetro ou multíteste para medidas de Diferença de Potencial (Tensão ou Voltagem), Resistência e Corrente Elétrica.

3. INTRODUÇÃO TEÓRICA:

Nesta experiência procuraremos que você se familiarize com um dos instrumentos de medida mais freqüente no laboratório de medidas elétricas (O MULTÍMETRO) bem como adquira certos hábitos importantes dentro do laboratório de eletricidade

Iniciaremos nossos estudos chamando a atenção para alguns cuidados que devem ser tomados quando lidamos com experimentos de eletricidade e magnetismo. Embora simples, eles são de importância fundamental para o bom andamento do laboratório, assim como, na redução a zero dos riscos inerentes ao manuseamento de circuitos e aparelhos de medições.

- a) Os circuitos devem ser montados com todo cuidado e só podem ser ligados à fonte de tensão após ser APROVADO pelo professor.
- b) Os instrumentos são em geral muitos sensíveis e a falta de cuidado com sua utilização pode danificá-los, às vezes, de forma irreparável.
- c) Antes de tudo, ao iniciar uma aula, observe atentamente as explicações do seu professor e leia com atenção o roteiro da aula.
- d) EM HIPÓTESE ALGUMA se brinca com os instrumentos de medida.
- e) Sempre que terminar a utilização de um equipamento desligue-o.
- f) **O excesso de confiança pode provocar descuidos no manuseio dos equipamentos. Evite-o.**

O MULTÍMETRO:

Analisemos o multímetro quanto a sua utilização. Em sua configuração básica, este instrumento pode ser usado para medir tensão e corrente elétrica, tanto CC quanto CA, assim como para medir resistência elétrica. Os multímetros mais modernos podem também ser utilizados para medir outras grandezas, tais como, capacitância, indutância, etc. Os multímetros utilizados hoje em dia são de dois tipos: Analógico e Digital.

Os multímetros analógicos possuem internamente um miliamperímetro, cujo princípio básico de funcionamento baseia-se na interação de um campo magnético

produzido por um ímã existente dentro do multímetro, com uma corrente elétrica que circula em uma bobina imersa nesse campo, na qual é fixado um ponteiro. Desta interação resulta uma força que gera um torque sobre a bobina e provoca um deslocamento angular do ponteiro. O valor final da grandeza é lido numa escala adequada.

Os multímetros digitais não possuem miliamperímetro embutido e a valor da grandeza medida é diretamente convertido em digital através do uso de um conversor analógico/digital. Nele, a escala do mostrador é substituída por um display, apresentando o resultado da medição diretamente em números visualizados neste display. Como não possuem bobinas móveis, em geral, os multímetros digitais são mais compactos e robustos que os analógicos.

A tendência é que, dentro de algum tempo, só existam no comércio multímetros digitais e que os analógicos sejam relegados à peças de museu. No entanto, neste período de transição, é importante conhecermos os dois tipos, aproveitando-se das técnicas consagradas dos antigos multímetros e aplicando-as aos mais modernos, ao mesmo tempo em que exploramos também os seus novos recursos.

A figura 1.1 mostra um multímetro analógico utilizado para ensino, no qual pode ser visualizado o sistema acima descrito. O miliamperímetro é constituído pelo ímã e, localizada no seu centro, pela bobina, na qual está fixado o ponteiro.



Figura 1.1

Nas figuras 1.2a, 1.2b, 1.2c e 1.2d são mostrados alguns multímetros (multímetros), dentre os vários modelos existentes no Laboratório de Ensino de Física do DFTE.



Figura 1.2a



Figura 1.2b



Figura 1.2c

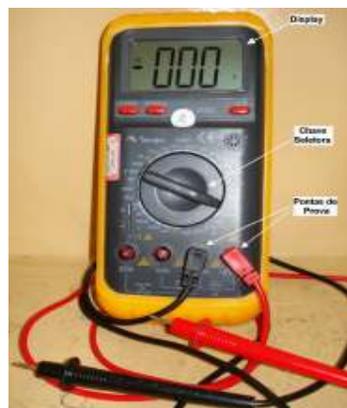


Figura 1.2e

No nosso curso, utilizaremos o multímetro digital Minipa, modelo ET-2082, mostrado na figura 1.2e.

Especificamente, este modelo de multímetro mede voltagem, resistência e corrente elétrica, além de capacitância, indutância, temperatura e frequência.

Atenção para os seguintes símbolos exibidos na parte frontal do multímetro:

\underline{V} significa voltagem e \underline{A} significa corrente.

O símbolo = significa tensão ou corrente contínua.

O símbolo ~ significa tensão ou corrente alternada

OBSERVAÇÕES:

- Você deverá fazer medidas de tensões (ddp) e correntes tanto CC como CA, bem como de resistência elétrica. Portanto, verifique sempre se a chave seletora encontra-se na posição correta. Em caso de dúvida recorra ao professor;
- Procure antes ver qual o máximo valor de saída especificada pelo fabricante da fonte de maneira a evitar erros que possam danificar o instrumento. Quando não souber, use a chave seletora na posição de maior valor (alcance) possível do instrumento na “grandeza” correspondente;
- Convencionou-se utilizar borne vermelho como positivo e o borne preto como negativo

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1- Material

- Uma fonte variável de zero a 30 volts (DC ou CC)
- Um transformador de varias saídas (AC ou CA)
- Uma pilha (DC ou CC) de 1,5V e uma bateria de 9V
- Um multímetro digital Minipa, modelo ET-2082
- Uma placa de circuito, uma chave, resistores e cabos.

4.2 - Medidas de Diferença de Potencial

Medida de Tensão Contínua (DC)

- Ligue a fonte amarela em 220 volts na bancada;
- Monte o circuito da figura 1.3 e alimente-o, ligando os bornes da fonte nos pontos 1 e 2 da placa de circuito;
- Escolha para a medida a resistência R3 do circuito da figura 1.3 e meça a diferença de potencial quando o cursor da fonte estiver nas posições A, B e C. Coloque o resultado na folha de dados e desligue a fonte de tensão.
- Meça a tensão em uma das pilhas e na bateria;
- Coloque os resultados na folha de dados.

Medida de Tensão Alternada (AC)

- Ligue o transformador em 220 volts;
- Coloque o multímetro no modo de medida AC;
- Ainda utilizando o circuito da fig. 1.3, meça a diferença de potencial em um dos resistores, quando o circuito for alimentado entre os pontos A e B, A e C e B e C;
- Coloque os resultados na folha de dados e desligue o transformador.

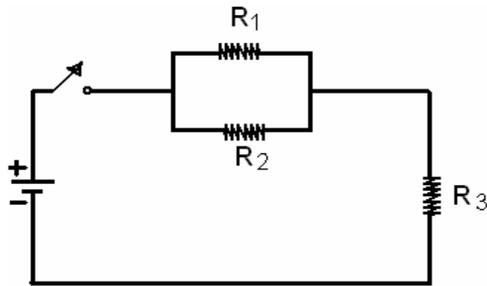


Figura 1.3: Circuito com resistores

4.3 - Medida de Corrente num Circuito

Medida de Corrente Contínua (DC)

- 1) Ligue a fonte amarela. Alimente o circuito da fig. 6, ligando os bornes da fonte nos pontos 1 e 2 da placa de circuito;
- 2) Meça a corrente nos pontos 3 e 4 quando o cursor da fonte estiver nos pontos B e C;
- 3) Coloque o resultado na folha de dados e desligue a fonte de tensão.

Medida de Corrente Alternada (AC)

- 1) Substitua a fonte amarela do circuito pelo transformador e alimente o circuito com a tensão dos pontos A e D;
- 2) Meça a corrente nos pontos 3 e 4 da placa de circuito;
- 3) Coloque os resultados na folha de dados e desligue o transformador.

4.4 - Medida de Resistências

A resistência elétrica (R) é uma medida da oposição ao movimento dos portadores de carga, ou seja, a resistência elétrica representa a dificuldade que os portadores de carga encontram para se movimentarem através do condutor. Quanto maior a mobilidade dos portadores de carga, menor a resistência elétrica do condutor.

Em termos circuitais, a resistência elétrica (R) é a relação entre a ddp aplicada (V) e a correspondente intensidade de corrente elétrica (i).

$$\text{Assim, } R = \frac{V}{i}$$

A resistência elétrica é uma característica do condutor, portanto, depende do material do qual ele é constituído, da suas formas e dimensões, além da temperatura a qual está submetido. Posteriormente, esses itens serão analisados mais detalhadamente.

As figuras 1.4a e 1.4b mostram os tipos mais comuns de resistores elétricos utilizados em circuitos simples.

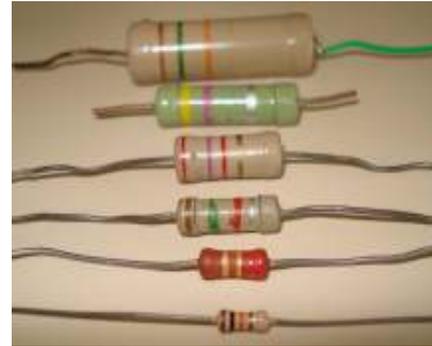


Figura 1.4a – Resistores de carbono

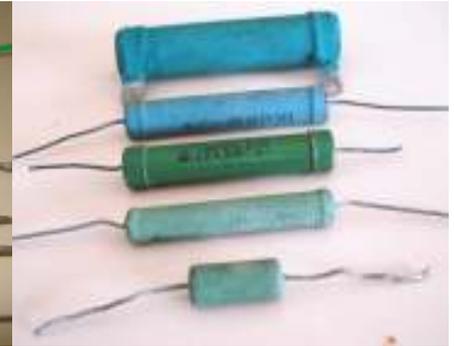


Figura 1.4b – Resistores de potência

A figura 1.5 mostra um reostato (resistor de resistência variável) utilizado no laboratório de ensino do DFTE.



Figura 1.5 - Reostato

O ohmímetro é um aparelho que permite a leitura direta do valor de um resistor elétrico. Seu funcionamento baseia-se na relação $R = V / I$. No aparelho há um gerador que fornece tensão ao componente cuja resistência se quer medir. A corrente que circula é medida por um miliamperímetro. Calibrando-se esse medidor em ohms, faz-se diretamente a leitura da resistência.

5. FOLHA DE DADOS

Fonte amarela

	Pontos			pilha	bateria
	A	B	C		
ddp					
escala usada					

Transformador

	Pontos		
	A e B	A e C	B e C
ddp			
escala usada			

Fonte amarela e circuito

	Pontos	
	B	C
corrente		
escala usada		

Transformador e circuito

	Pontos
	A e D (ddp)
corrente	
escala usada	

Resistores (medidos com o multímetro)

R ₁		Req(R ₁ ,R ₂)	
R ₂		Req(R ₁ ,R ₂ ,R ₃)	
R ₃			

Resistores (valores lidos utilizando os código de cores)

Resistor	1ª faixa		2ª faixa		3ª faixa		Valor do resistor	4ª faixa	precisão
	cor	Valor	cor	valor	cor	valor		cor	valor
R ₁									
R ₂									
R ₃									

6. QUESTÕES

1. Altera-se o valor de uma grandeza medida quando se muda a escala na chave seletora? Por que?
2. Indique as operações que se pode realizar com o multímetro digital Minipa, modelo ET-2082.
3. Em relação ao seu instrumento de medida, qual a escala conveniente para uma medida de 1,9 mA?
4. Qual a escala conveniente para uma medida de 19,5 V?

CAPÍTULO - II

1. INSTRUMENTOS DE MEDIDAS ELÉTRICAS: CONSTRUÇÃO

2. OBJETIVO

Entender o funcionamento dos multímetros, a partir da construção de amperímetros, voltímetros e ohmímetros.

3. INTRODUÇÃO TEÓRICA

Para a construção dos equipamentos de medidas propostos neste capítulo, devemos antes de tudo estabelecer alguns conceitos fundamentais referentes às leis que regem o funcionamento dos circuitos elétricos.

3.1 – As leis de Kirchoff

As leis de Kirchoff são fundamentais para a resolução de problemas em circuitos elétricos, pois elas nos permite determinar diretamente as correntes e tensões de um determinado circuito. Em número de duas, elas estão baseadas em dois princípios básicos: a conservação da carga e a conservação da energia.

3.1.1 - Lei dos Nós

A lei dos nós, baseada na lei de conservação da carga elétrica, estabelece que a soma algébrica das correntes que entram em um nó é nula, i.e.,

$$\sum_n i_n = 0$$

Como regra geral, admite-se que a corrente em qualquer porção do circuito pode ser indicada a priori sem necessidade de saber se a corrente circula verdadeiramente no sentido indicado. Como convenção, uma corrente indicada como entrando num nó será considerada positiva e negativa no caso contrário.

3.1.2 - Lei das malhas

A lei das malhas, estabelecida com base na lei de conservação da energia, estabelece que a soma algébrica das tensões ao longo de uma malha fechada é nula, i.e.,

$$\sum_n V_n = 0$$

3.2- O Galvanômetro

Galvanômetro ou miliamperímetro é um instrumento utilizado para a detecção de pequenas correntes num circuito fechado.

Existem diversos tipos de galvanômetros, porém o princípio de funcionamento de todos eles, já descrito no capítulo 01 deste texto, baseia-se no fato de que uma corrente elétrica circulando através de uma bobina interage com o campo magnético produzido por um ímã colocado dentro do instrumento, provocando o surgimento de uma força que gera um torque sobre a bobina. O movimento relativo da bobina, provocado pelo torque, é proporcional à corrente que circula pelo aparelho. Temos assim o “segredo” do galvanômetro.

Os tipos mais comuns de galvanômetros são:

- Galvanômetro tangente - contém uma agulha magnetizada (ímã) colocada no centro de uma bobina circular. A agulha se move quando a corrente passa na bobina fixa.
- Galvanômetro de bobina móvel - o ímã é fixo e é a bobina que rotaciona quando por ela circula a corrente elétrica.

3.3- Construção de um Amperímetro

Um amperímetro é basicamente constituído de 2 elementos: Um galvanômetro e um resistor.

Como se sabe, um galvanômetro consegue medir correntes bem pequenas, da ordem de miliampères, porém tal instrumento possui muitas limitações.

Introduz-se então um resistor EM PARALELO para que se possa medir uma grande variedade de valores de corrente. Esse resistor é denominado de “RESISTOR DE SHUNT”.

A figura 2.1 mostra o circuito esquematizado representativo de um amperímetro.

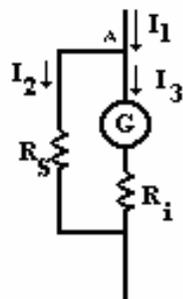


Figura 2.1 – Circuito esquematizado

Aplicando a Lei dos Nós ao nó A, temos:

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (01)$$

Mas, $R_S \cdot I_2 = R_i \cdot I_3 \quad (02)$

Se considerarmos a seguinte relação:

$$\frac{I_1}{I_3} = n \quad (03)$$

Onde n é denominado “Fator de Ampliação da Escala”, poderemos medir correntes n vezes maiores que a corrente que o galvanômetro pode ler sozinho, bastando para isso ajustar o valor de R_S como demonstra as expressões abaixo:

De (01) e (03) temos:

$$n \cdot I_3 = I_2 + I_3 \quad \Rightarrow \quad I_2 = I_3 \cdot (n - 1) \quad (04)$$

De (02) e (04):

$$R_S \cdot (I_3 \cdot (n - 1)) = R_i \cdot I_3$$

Logo:

$$R_S = \frac{R_i}{n - 1} \quad (05)$$

Cabe aqui então analisar o que ocorre internamente em um amperímetro quando se seleciona uma escala qualquer. Logicamente, se mudarmos da escala de 1mA para a de 10mA estamos querendo ler valores maiores que 1mA, então estamos interessados

em aumentar o valor de n. Para que isso ocorra devemos diminuir o valor de R_S , pela equação 05. É exatamente isso que ocorre na prática.

Outro fato importante a ser observado é que como o amperímetro deve ser ligado em série ao circuito que se deseja medir a corrente, este deve ter idealmente uma resistência nula, pois de outro modo afetaria na medição precisa do valor da corrente. A colocação do resistor de Shunt em paralelo ao galvanômetro vem então atenuar a introdução de um erro na medida devido a presença do amperímetro, pois reduz a sua resistência total.

A figura 2.2 abaixo, mostra o amperímetro a ser montado pelo aluno durante o experimento.

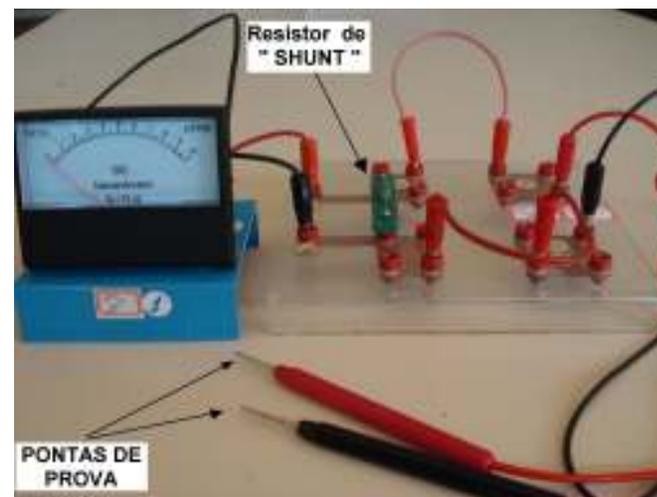


Figura 2.2 – Circuito básico do amperímetro

3.4 - Construção de um Voltímetro

Voltímetros são instrumentos destinados a medir a diferenças de potencial entre dois pontos de um circuito. Para que um voltímetro, quando em uso, não passe a fazer parte do circuito como uma resistência adicional, ele deve possuir uma alta resistência interna e ser colocado sempre “em paralelo” com o elemento através do qual será medida a diferença de potencial.

Da mesma maneira que um amperímetro pode ser obtido através de um galvanômetro, podemos também construir um voltímetro. Só que no caso deste último, a resistência agora deve ser ligada EM SÉRIE com o galvanômetro. Essa resistência é denominada RESISTOR DE MULTIPLICAÇÃO.

As figuras 2.3 e 2.4 mostram, respectivamente, esquemas representativos de um voltímetro.

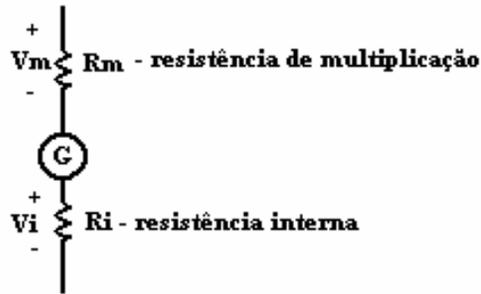


Figura 2.3 - Voltímetro básico

Na verdade, continuamos a medir uma corrente no galvanômetro, porém se conhecermos o valor da resistência de multiplicação R_m e a resistência interna do galvanômetro R_i , podemos, a partir da Lei de Ohm, deduzir a diferença de potencial responsável pela corrente que passa pelo galvanômetro.

Logo, de acordo com a figura 4:

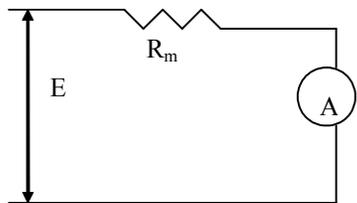


Figura 2.4 - Voltímetro básico redesenhado

$$E = (R_i + R_m).I \quad (06)$$

Como a corrente I é comum para as duas resistências, então:

$$\frac{V_m}{R_m} = \frac{V_i}{R_i} \quad (07)$$

Se considerarmos a relação:

$$\frac{E}{V_i} = n \Rightarrow \frac{V_m + V_i}{V_i} = n \Rightarrow V_m = V_i.(n-1) \quad (08)$$

onde n é o “Fator de Ampliação da Escala”. Então teremos de (08):

$$\frac{V_i.(n-1)}{R_m} = \frac{V_i}{R_i} \Rightarrow R_m = R_i.(n-1) \quad (09)$$

A equação 09 nos mostra que se quisermos medir tensões n vezes maiores que a tensão que o galvanômetro sozinho pode medir, então devemos associar em série a esse galvanômetro um resistência de valor R_m .

Ainda é importante saber que a relação entre a resistência interna do voltímetro e a tensão de escala plena dá a sensibilidade do voltímetro em ohms/volt. Quanto maior for esta relação, maior será a sensibilidade do aparelho.

A figura 2.5 a seguir, mostra o voltímetro a ser montado pelo aluno durante o experimento.

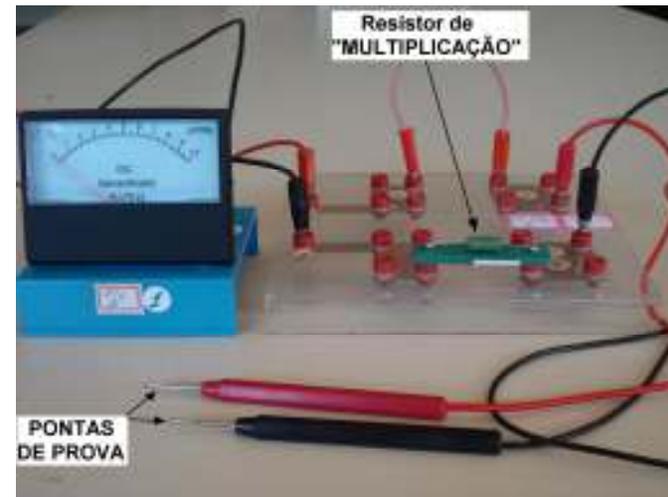


Figura 2.5 – Circuito básico do voltímetro

3.5- Construção de um Ohmímetro

Um ohmímetro consiste num miliamperímetro de corrente DC em série com uma bateria e um reostato. A bateria fornece uma pequena corrente ao elemento que

queremos medir a resistência, e o reostato faz com que possamos ajustar o ponteiro do ohmímetro no zero da escala. Por isso, antes de qualquer medida com o ohmímetro deveremos fechar o circuito conectando-se as pontas de prova do instrumento, ou seja, fazendo um curto circuito no aparelho ($R=0$). Ademais, o valor máximo na escala deve ser atingido quando as pontas de prova estiverem em aberto ($R=\infty$). A seguir, com o ohmímetro ajustado, ligamos seus terminais nos pontos onde se deseja ler a resistência. A comparação entre a tensão fornecida pela pilha e a corrente que passa pelo elemento, nos dará o valor desejado da resistência, através da Lei de Ohm.

As figuras 2.6 e 2.7 mostram, respectivamente, o esquema circuital do ohmímetro e sua montagem durante o experimento.

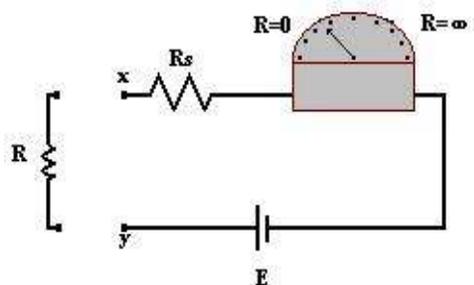


Figura 2.6 - Ohmímetro básico esquematizado



Figura 2.7 - Ohmímetro montado

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1- Amperímetro

A partir de um miliamperímetro de 1mA, vamos construir um amperímetro para medir corrente elétrica cujo valor a plena escala seja 4 mA.

4.1.1- Materiais necessários

- Miliamperímetro de 0 - 1mA DC de resistência interna (R_i) conhecida;
- Década de resistores;
- Resistores conhecidos;
- Fonte DC - 0 - 30 V;
- Chave simples;
- Reostato - 1,5 A;
- Placa para circuito;
- Multiteste comercial Minipa, modelo ET-2082.

4.1.2- Procedimento

- Projeto do amperímetro:
 - Determine o valor da resistência de Shunt adequada;
 - Desenhe o circuito do instrumento;
 - Desenhe a nova escala do seu amperímetro;
- Fazendo uso do projeto do instrumento e utilizando o circuito da figura 2.8 e monte o circuito utilize os vários valores de resistência indicados na tabela a seguir e meça os diversos valores das correntes obtidas. Anote os valores obtidos na tabela.

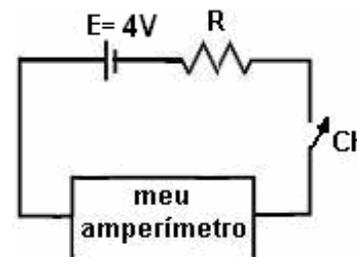


Figura 2.8 - Circuito para medição de corrente

- c) Compare cada valor obtido com o seu correspondente, medido com o amperímetro comercial Minipa, modelo ET-2082. Anote também os resultados na tabela a seguir:

Resistor (Ω)	Amperímetro Comercial	Meu Amperímetro
1K		
2K2		
3K3		
4K7		
6K8		
10K		

4.2- Voltímetro

4.2.1- Materiais necessários

- Miliamperímetro DC/ 0 - 1mA de resistência interna conhecida;
- Década de resistores;
- Pilha e associação de pilhas;
- Resistores de 2K7 e 10K;
- Multiteste comercial Minipa, modelo ET-2082;
- Fios para ligação;
- Fonte de 0 - 30V;
- Chave simples;
- Reostato – 1,5A.

4.2.2- Procedimento

- Projeto do Voltímetro:
 - Determine o valor do resistor de multiplicação adequado;
 - Desenhe o circuito do instrumento;
 - Desenhe a nova escala do seu voltímetro;
- Faça os cálculos necessários para determinar o valor da resistência de multiplicação R_m para construir um voltímetro de 0 a 3,0V e de 0 a 10V;
- Monte inicialmente o voltímetro de 0 a 3,0V;
- Aplique seus terminais a uma pilha e meça a diferença de potencial nos seus bornes;
- Desenhe a nova escala;
- Monte o voltímetro de 0 a 10V;
- Desenhe a nova escala;
- Meça a diferença de potencial nos bornes de duas pilhas ligadas em série;
- Meça a diferença de potencial nos bornes de duas pilhas ligadas em paralelo.

- Calcule a sensibilidade dos voltímetros construídos.

4.3- Ohmímetro

4.3.1- Materiais necessários

- Placa de circuito;
- Multiteste comercial Minipa, modelo ET-2082;
- Miliamperímetro DC 0 - 1mA;
- Reostato 1,5 A;
- Resistores de carvão;
- Fonte de tensão contínua variável DC 0 - 30V;
- Chave simples.

4.3.2- Procedimento

Nesta etapa, você irá transformar um amperímetro em um medidor de resistência (ohmímetro), associando uma determinada corrente a um certo valor de resistência. Então você deverá:

- “zerar” o ohmímetro
- coletar dados e com eles construir uma curva de calibração
- medir algumas resistências

“Zeragem” do ohmímetro: basicamente o que você irá fazer é estabelecer uma correspondência da corrente de fundo de escala, no caso 100mA, com uma resistência de valor zero.

- monte o circuito da figura 2.9b abaixo, seguindo a disposição dos equipamentos na placa de circuito, mostrado na figura 2.9a.

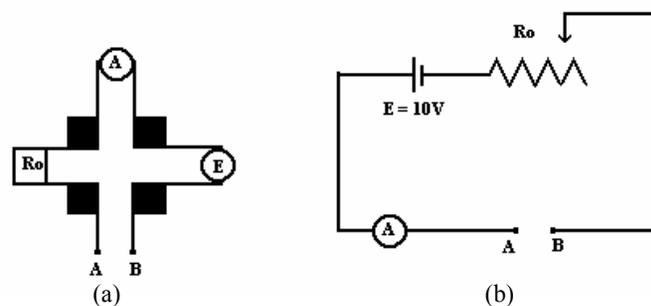


Figura 2.9 – Esquema do circuito de calibração do ohmímetro

- b) coloque as extremidades das “pontas de prova” em contato, de modo que entre A e B a resistência seja zero.
- c) intervenha no reostato R_o , de modo que a corrente no medidor seja 100mA. Em outras palavras, para uma corrente de 100mA você fará associar uma resistência zero.
- d) justifique o porquê do procedimento do item “c”.

Calibração do ohmímetro: agora você irá coletar valores de resistências e correntes para com eles construir um gráfico de calibração do “ohmímetro” que você construiu. Use ainda o mesmo circuito.

- a) com o ohmímetro já “zerado”, coloque entre as pontas de prova A e B os seguintes resistores:
 100Ω, 220Ω, 330Ω, 470Ω, 680Ω, 1KΩ, 2K2Ω, 3K3Ω, 4K7Ω, 6K8Ω, 10KΩ, R_A , R_B , R_C e R_D ;
- b) Anote na tabela a seguir, os valores de corrente registrados e as resistências correspondentes.

Resistor (Ω)	Corrente (mA)
100	
220	
470	
680	
1000	
2200	
3300	
4700	
6800	
10000	

- c) Construa em papel milimetrado, um gráfico $I \times R$. Este gráfico reproduzirá a curva de calibração do seu ohmímetro.
- d) Usando essa curva de calibração, determine os valores dos resistores que se encontram sobre sua mesa de trabalho (R_A , R_B , R_C e R_D) e compare com o valor lido no multímetro.

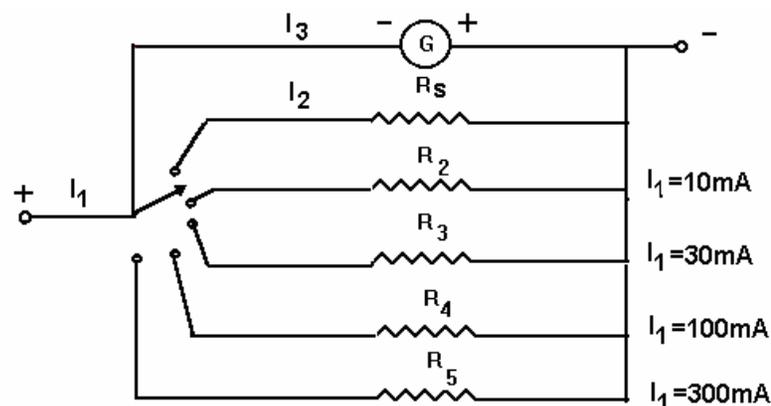
5. QUESTÕES

1. Amperímetro com várias escalas :

O circuito a seguir representa um amperímetro com vários resistores de derivação (Shunt). O Galvanômetro G possui deflexão máxima de $I_3 = 1\text{mA}$ e resistência interna $R_i = 100\Omega$

a) Mostre que $R_s = \frac{R_i}{n-1}$, onde $n = \frac{I_1}{I_3}$.

- b) Escolha a escala conveniente e sua resistência de shunt R_s , para uma medida de corrente da ordem de 80mA.

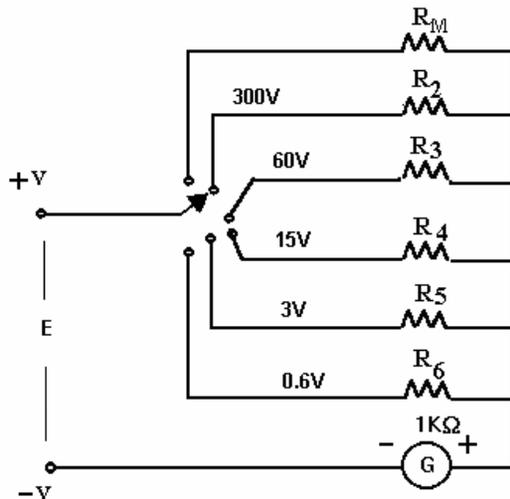


2. Voltímetro com várias escalas :

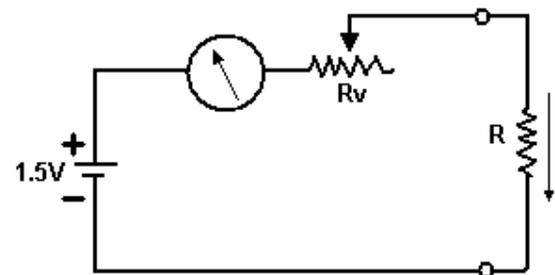
O circuito a seguir representa um voltímetro com vários resistores de multiplicação R_M . O Galvanômetro G possui deflexão máxima de $50\mu\text{A}$.

- a) Mostre que, $R_M = R_i(n-1)$ onde $n = \frac{E}{V_i}$ é o fator de multiplicação da escala.
- b) Deseja-se medir uma diferença de potencial de 50V. Escolha a escala conveniente e determine sua resistência de multiplicação.
- c) Para uma medida de 30V nesta escala, qual a corrente correspondente no galvanômetro?

d) A relação entre a resistência interna do voltímetro e a tensão da escala plena é conhecida como sensibilidade do voltímetro (ohms/volts). Determine a maior sensibilidade do seu aparelho.



b) Em papel milimetrado, desenhe a curva de calibração $i \times R$ para o seu ohmímetro.



3. Um simples ohmímetro é feito quando ligamos uma pilha de 1,5V em série com um resistor R_v e um miliamperímetro de ($I = 1,0 \text{ mA}$), como é mostrado na figura abaixo. R_v está ajustado de modo que quando:

- $R = 0\Omega$ (curto circuito), o ponteiro se deflete para o fundo de escala de 1mA.
- $R = \infty$ (circuito aberto), o ponteiro está em zero.

a) Determine, as resistências externas R para deflexões do ponteiro de: 10%, 30%, 50%, 70% da corrente de fundo de escala.

CAPÍTULO - III

1. SUPERFÍCIES EQUIPOTENCIAIS

2. OBJETIVOS

Traçar as equipotenciais para uma dada distribuição de cargas, traçar as linhas de campo e calcular o campo elétrico.

3. INTRODUÇÃO TEÓRICA

Medidas quantitativas de campos eletrostáticos são muito difíceis de serem realizadas em laboratório, pois infelizmente, em nosso clima úmido, é quase impossível produzir distribuições eletrostáticas por um longo tempo. No entanto, é muito freqüente na Física a ocorrência de fenômenos de natureza distinta que são regidos pelas mesmas equações matemáticas com as mesmas soluções. Será exatamente isto que nos possibilitará estudar o campo eletrostático. Melhor ainda, estudaremos um outro fenômeno que é a passagem da corrente através de uma solução eletrolítica que, no entanto, é descrita matematicamente da mesma forma que a eletrostática.

O método consiste em verificar numa “CUBA ELETROLÍTICA”, pontos de mesmo potencial elétrico e através desses potenciais, determinar a distribuição de campo elétrico na cuba. Mas qual a relação entre V e \vec{E} ? Bem, vejamos a figura abaixo:

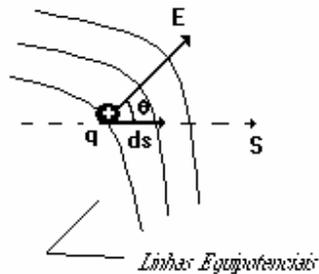


Figura 3.1

Como a direção do campo elétrico é perpendicular às linhas equipotenciais, desloquemos então a carga-teste q através da trajetória ds , de uma equipotencial V para

outra $V+\Delta V$, cuja diferença de potencial entre elas seja ΔV . Assim, o trabalho realizado pelo campo elétrico para deslocar a carga será:

$$dW = -q \cdot dV$$

Mas, sabemos que uma a expressão geral para definição de trabalho é:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

e, ainda, que a força elétrica \vec{F} exercida sobre uma carga q imersa numa região de campo elétrico \vec{E} é dada por:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

Então:

$$-q \cdot dV = q \cdot \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Além disso, é também do nosso conhecimento que:

$$\vec{E} \cdot d\vec{s} = E_s \cdot ds$$

onde, E_s é a componente de \vec{E} na direção de S :

$$\text{Logo: } E_s = -\frac{\partial V}{\partial s}$$

Se agora estendermos essa equação para as três direções cartesianas, podemos escrever:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V \quad (01)$$

Em componentes cartesianas, a equação 01 se resume a:

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}; \quad E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}; \quad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z}; \quad (02)$$

Essas equações vêm provar que a nossa suposição da direção de \vec{E} é correta já que sabemos que a derivada indica um gradiente ou taxa de variação em uma direção perpendicular à variável considerada e sempre na direção de crescimento da função.

Daí, os sinais negativos nas equações 01 e 02 indicam que o campo elétrico possui o sentido das linhas de maior para as de menor potencial.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 - Materiais necessários

- Uma cuba com papel milimetrado;
- Um auto-transformador Variac de 0-240V;
- Um multímetro digital Minipa, modelo ET-2082;
- Eletrodos cilíndricos e retangulares;
- Fios de ligação;
- Solução de NaCl;
- Uma chave.

Nesta experiência você fará medidas com o multímetro usando somente o voltímetro.

Sobre sua bancada encontram-se uma cuba de acrílico contendo uma solução de NaCl e dois conjuntos de eletrodos.

I - EQUIPOTENCIAIS DE DUAS PLACAS PARALELAS

A figura 3.2 a seguir mostra a montagem do circuito para medidas de equipotenciais geradas por duas placas paralelas.

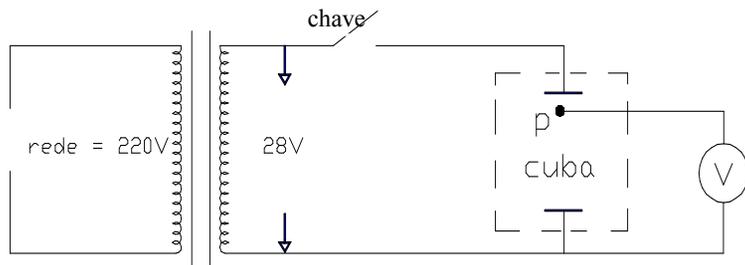


Figura 3.2 - Montagem do circuito

Coloque os dois eletrodos nas posições $y = +5$ e $y = -5$, observando o esquema da figura 3.3.

A seguir, prenda uma das pontas de prova do voltímetro em um dos eletrodos deixando a outra ponta solta a fim de que esta possa se movimentar dentro da solução eletrolítica.

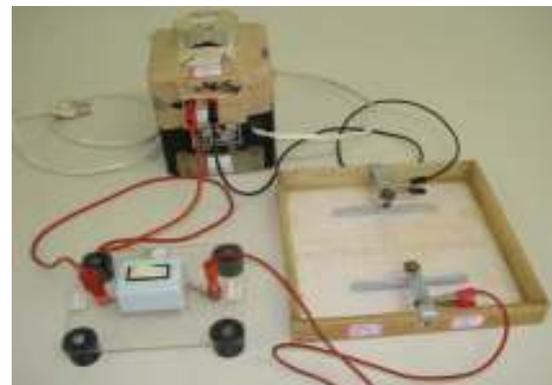


Figura 3.3: Circuito montado utilizando a cuba eletrolítica.

Com a ponteira solta (p) do voltímetro, você vai medir os potenciais dentro da cuba contendo a solução eletrolítica de NaCl. Considere:

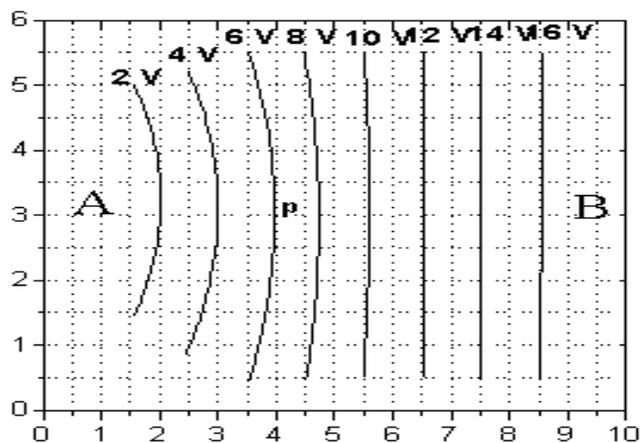
- A_1 . Superfície que passa pelo ponto $(x,y) = (0,0)$
- A_2 . Superfície que passa pelo ponto $(x,y) = (0,2)$
- A_3 . Superfície que passa pelo ponto $(x,y) = (0,4)$
- A_4 . Superfície que passa pelo ponto $(x,y) = (0,-2)$
- A_5 . Superfície que passa pelo ponto $(x,y) = (0,-4)$

- Determine as superfícies equipotenciais que passam pelos pontos acima indicados. Ache pelo menos cinco pontos para caracterizar uma determinada superfície. Coloque os resultados na folha de dados.
- Para determinar o campo elétrico, respectivamente, nos pontos $(0,0)$ e $(2,-4)$, use a seguinte logística:
 - Coloque a ponta de prova no ponto considerado. Ande meio centímetro para cada lado em torno do ponto na direção da coordenada "X" e anote o valor do potencial em cada uma das duas posições. Com isto você terá condições de determinar Δx e ΔV na direção X. Repita o mesmo procedimento para o eixo "Y". Em outras palavras, encontre os valores dos potenciais nos seguintes pontos a seguir assinalados e coloque os resultados obtidos na folha de dados.
 $(0.5, 0)$, $(-0.5, 0)$, $(0, 0.5)$, $(0, -0.5)$ e $(1.5, -4)$, $(2.5, -4)$, $(2.0, -3.5)$, $(2.0, -4.5)$

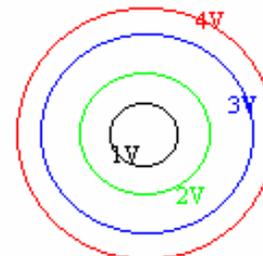
6. QUESTÕES:

1. A figura abaixo, mostra as equipotenciais para uma dada distribuição de carga.

- Trace as linhas de campo;
- Calcule o vetor campo elétrico \vec{E} (módulo direção e sentido) no ponto **p** indicado;
- Indique na figura o sinal e a forma da distribuição de carga.



2. A figura a seguir representa quatro superfícies equipotenciais “casca esféricas concêntricas”, cada uma com um potencial V conhecido. Trace as linhas de campo (direção e sentido). Qual a melhor distribuição de carga representa essa configuração?



3. Trace as linhas de campo e as superfícies equipotenciais para um capacitor de placas paralelas representado na figura abaixo. Qual o valor da componente E_x do campo elétrico? Justifique.



CAPÍTULO - IV

1. CIRCUITOS LINEARES

2. OBJETIVOS

-Verificação experimental da Lei de Ohm e das Leis de Kirchoff.

3. INTRODUÇÃO TEÓRICA

3.1 - Lei de Ohm

Aplicando-se uma diferença de potencial a dois pontos distintos de um condutor percebe-se a existência de um movimento ordenado de cargas. Para caracterizar esse movimento criou-se uma grandeza chamada corrente elétrica que nada mais é que a variação da quantidade de cargas que passam por uma seção reta do condutor em um determinado período de tempo.

O fato é que estas cargas não circulam livremente no condutor, já que este é formado por átomos que ocupam espaço na sua rede cristalina. Logo, ocorrem choques no interior da estrutura do condutor entre as cargas em movimento e os próprios átomos do condutor. Dessa maneira é necessário que uma tensão (ddp) seja mantida para que haja deslocamento de cargas (corrente elétrica).

Observou-se que, ao aplicar uma tensão V nesse condutor, surgia uma corrente i dada pela relação:

$$i = \frac{V}{R} \quad \text{ou} \quad V = R \cdot i \quad (01)$$

E essa relação é válida para qualquer condutor, isolante ou semiconductor.

A grandeza R foi designada de resistência elétrica e, como visto no capítulo 01, ela surge justamente devido a dificuldade que o material fornece à passagem de corrente elétrica. Isso pode ser muito bem comprovado com o uso da equação 01. Se mantivermos a mesma tensão e aumentarmos o valor de R , menor será da corrente que passa através de R , ou seja, aumentamos a dificuldade de circulação de corrente.

Se R for uma constante, ou seja, não dependa de V , então dizemos que este condutor ou elemento qualquer é um **elemento ôhmico**.

Os elementos mais comuns utilizados em circuitos elétricos que obedecem à Lei de Ohm lei são os resistores elétricos.

Estes por sua vez apresentam uma curva característica $I \times V$ como sendo uma reta de inclinação igual a $1/R$, de acordo com o gráfico mostrado na figura 4.1.

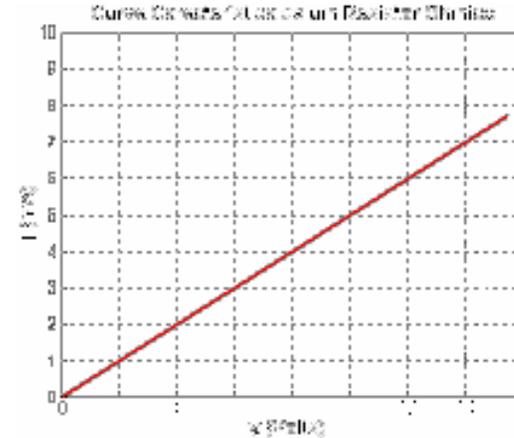


Figura 4.1 - Curva característica de um resistor ôhmico

Por outro lado, muitos elementos de circuitos utilizados na prática não são elementos ôhmicos. Esses elementos possuem uma curva característica bem diferente, como é o caso do gráfico de um diodo mostrado a seguir, na figura 02.

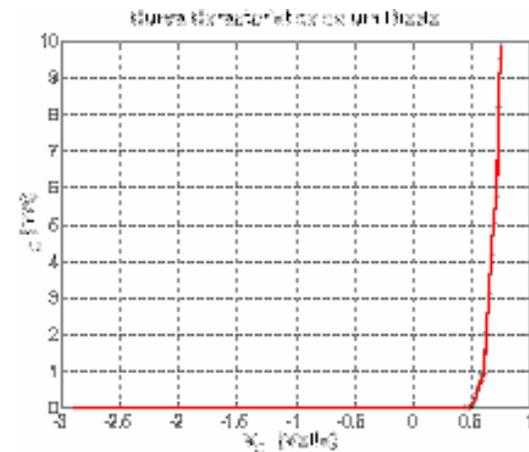


Figura 4.2 - Curva característica do Diodo BAX17, obtida experimentalmente

É importante notar que, neste último caso, a equação 01 ainda é válida. Apenas a resistência R não é mais uma constante. Ela depende da tensão V aplicada.

3.2 - Leis de Kirchhoff

Como citado no capítulo anterior, as leis de Kirchhoff são fundamentais para a resolução de problemas em circuitos elétricos, pois permitem determinar diretamente as correntes e tensões de um determinado circuito. Neste capítulo, faremos uso prático dessas leis na determinação das grandezas características de um circuito elétrico.

Lei das Malhas- *A soma algébrica das diferenças de potencial em uma malha fechada de um circuito elétrico é igual a zero.*

$$\sum_{i=1}^n v_i = 0 \quad (02)$$

Intuitivamente esta lei pode ser muito bem compreendida simplesmente imaginando-se o seguinte: diferenças de potencial estão diretamente relacionadas a energia fornecida as cargas para que estas circulem no circuito. Então, o que esta lei afirma é simplesmente que a soma das energias fornecidas e consumidas no circuito fechado é zero, ou seja, ela corresponde ao Princípio de Conservação da energia, que é válida para qualquer sistema, inclusive os elétricos. A figura 4.3 a seguir mostra um exemplo da aplicação desta lei:

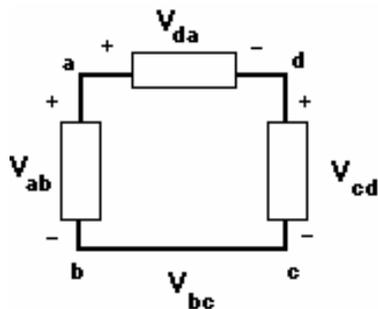


Figura 4.3

Aplicando a Lei das Malhas:

$$V_{ab} - V_{da} - V_{cd} = 0$$

Pois $V_{bc} = 0$ (fio ideal).

Lei dos Nós- *A soma das correntes que chegam a um nó é igual a soma das correntes que saem deste nó.*

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad (03)$$

Da mesma maneira que a Lei das Malhas, esta lei é simplesmente a aplicação de um princípio fundamental da física: a conservação das cargas.

O raciocínio é bastante simples e também intuitivo. Em um nó não podem se criar ou desaparecer cargas, pois contrariaria o princípio da conservação das cargas. Logo, como corrente representa a taxa de variação de cargas no tempo é de se esperar que esta também se conserve em um nó. A figura 4.4 abaixo demonstra essa lei:

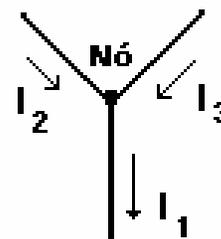


Figura 4.4

Aplicando a Lei dos Nós:

$$I_1 = I_2 + I_3$$

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1) Material utilizado

- fonte DC variável 0 - 30 V;
- Multiteste comercial Minipa, modelo ET-2082;
- resistores de carvão;
- placa de circuito;
- chave simples;
- fios de ligação.

4.2 - Procedimentos

4.2.a) Comprovação da Lei de Ohm

- a) Monte o circuito esquematizado no circuito da figura 4.5, cuja montagem é mostrada na figura 4.6, onde R_x é, em princípio, a resistência de valor desconhecido e a ser determinado.

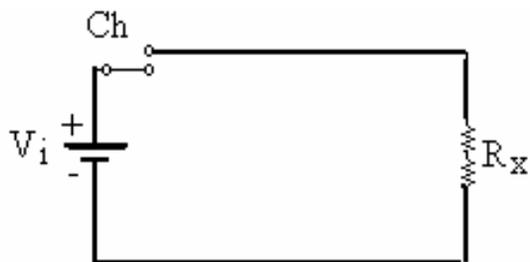


Figura 4.5



Figura 4.6

- b) A seguir, insira o voltímetro e o amperímetro no circuito, de forma que seja possível medir, ao mesmo tempo, a tensão da fonte e a corrente que passa através de R_x .

Solicite ao professor a verificação de sua montagem.

- c) Varie a d.d.p. na fonte de 3 em 3 volts até 18 volts e meça as correntes que passam através de R_x . Anote os resultados na folha de dados.

4.2.b) Comprovação das Leis de Kirchoff

- a) Monte o experimento da figura 4.8, cujo circuito está representado pela figura 4.7 abaixo:

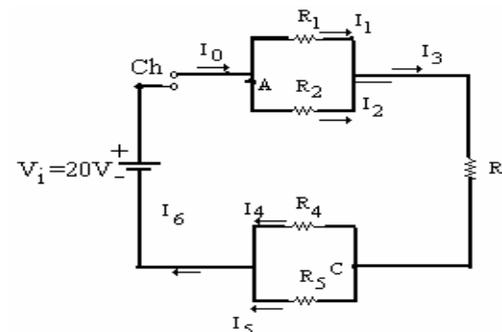


Figura 4.7

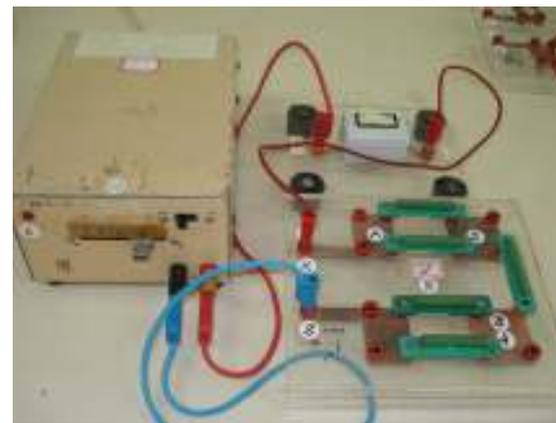


Figura 4.8

Solicite ao professor a verificação de sua montagem.

- b) Denomine i_1 , i_2 , i_3 , i_4 e i_5 correntes através de R_1 , R_2 , R_3 , R_4 e R_5 respectivamente. Com o multímetro (chave comutada na região DC - A) em escala conveniente, meça i_0 e i_6 além de i_1 , i_2 , i_3 , i_4 , e i_5 . Anote os resultados na folha de dados.

c) Com o multímetro (chave na região DC - V) em escala conveniente, meça a d.d.p. nos terminais de fonte e nos extremos de cada resistência. Coloque o resultado na folha de dados.

d) Com a fonte desligada e o multímetro (chave comutada na região Ω) em escala conveniente, meça R_1 , R_2 , R_3 , R_4 e R_5 e R_{eq} do circuito. Coloque os resultados na folha de dados.

FOLHA DE DADOS

4.2.a – Comprovação da Lei de Ohm

V	0	3	6	9	12	15	18
I							

4.2.b – Verificação das Leis de Kirchoff

Correntes:

i_0	i_6	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5

Tensões:

V_f	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5

Resistências:

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_{eq}
Medido						

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS:

5.1. Determinação de R_x utilizando a Lei de Ohm

a) Para a determinação experimental de R_x , construa em papel milimetrado um gráfico de I versus V, dos dados obtidos no experimento 4.2.a.

- b) A partir do gráfico encontrado, calcule o valor de R_x .
- c) Compare o resultado obtido com o valor nominal daquele resistor, ou seja, calcule o erro percentual e determine se o valor encontrado por você situa-se dentro da faixa de precisão para R_x fornecida pelo fabricante.

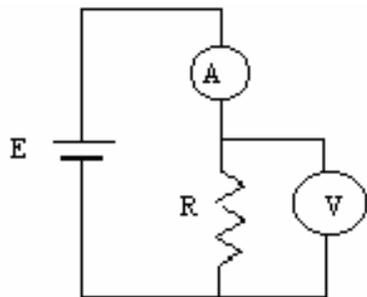
5.2. Comprovação das Leis de Kirchoff

- a) Atribuindo um sinal positivo para uma corrente que chega a um nó, e negativo para a que sai, calcule as seguintes somas algébricas:
- no nó A: $i_0 + i_1 + i_2$
 - no nó C: $i_3 + i_4 + i_5$
- Comente os resultados.
- b) Calcule os valores das somas algébricas:
- $V_2 + V_3 + V_4$
 - $V_1 + V_3 + V_5$
- Compare os resultados acima com o valor de V_f . Faça comentários.
- c) Usando a Lei de Ohm calcule os valores das resistências R_1 , R_2 , R_3 , R_4 e R_5 . Compare com os valores lidos com o multímetro.
- d) A partir dos valores encontrados para as resistências determine a resistência equivalente (R_{eq}) do circuito. Compare com o valor lido utilizando o ohímetro.
- e) Calcule o valor de $R_{eq} \times i_0$. Que relação existe entre este valor e V_f ? Justifique a sua resposta.
- f) Compare a potência fornecida pela fonte com a soma das potências dissipadas por cada resistência. Explique o resultado.

6. EXERCÍCIOS

- a) Mostre que a resistência equivalente entre dois resistores em série é sempre maior que a de qualquer dos resistores.
- b) Mostre que a resistência equivalente de dois resistores em paralelo é sempre menor que a de qualquer dos resistores.
- c) Quando se deseja medir corrente coloca-se o amperímetro de resistência interna r em série no circuito (veja capítulo I), alterando, portanto, a resistência equivalente do circuito. Na prática o que deve ser feito para não alterar as características do circuito quando se mede corrente?
- d) Para medir a diferença de potencial num resistor, coloca-se um voltímetro r em paralelo com o resistor, alterando assim sua resistência equivalente, lembre-se do capítulo I. O que deve ser feito para não alterar as características dos circuitos elétricos quando se deseja medir voltagem?

e) Um voltímetro (resistência interna R_v) e um amperímetro (resistência interna R_A) são ligados a um resistor a fim de medir o valor R da sua resistência como mostra a figura abaixo. O valor da resistência é obtido de $R = V/i$, onde V é dado pela leitura do voltímetro e i é o valor da corrente que atravessa o resistor R . Uma fração de corrente i' registrada pelo amperímetro passa através do voltímetro, de modo que o quociente V/i' entre as duas leituras dá apenas um valor aparente R' para a resistência . Mostre que R e R' estão relacionados por:



$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R'} - \frac{1}{R_v}$$

Note que se $R_v \gg R$, então $R \cong R'$

CAPÍTULO - V

1. CIRCUITOS RESIDENCIAIS

2. OBJETIVO

Descrever os elementos básicos necessários para que se possa montar em laboratório um circuito residencial simples. Associar este circuito simples a um circuito residencial real.

3. INTRODUÇÃO TEÓRICA

Os sistemas de energia elétrica podem ser divididos em três partes: geração, transmissão e distribuição. A geração compreende centros produtores de energia como as usinas hidroelétricas, termoeletricas, nucleares, eólicas, etc. Essa energia gerada é então transportada até os centros consumidores por meio de circuitos de transmissão. Nos centros consumidores, esses circuitos de distribuição levam a energia aos diversos pontos de consumo nas áreas urbanas, rurais e também para as grandes indústrias.

Os circuitos de distribuição são divididos em rede primária e rede secundária. A primeira, em geral, corresponde a circuitos com tensão da ordem de 13.8kV, que transportam energia até os transformadores (esses comumente encontrados nos postes nas cidades). Os transformadores, por sua vez, abaixam essa tensão para 220V ou 110V, dependendo da região. A rede secundária, que geralmente opera em uma dessas duas tensões, leva a energia dos postes até os circuitos residenciais.

Saber manipular aparelhos elétricos, circuitos residenciais e, até mesmo, fazer cálculos correspondentes aos custos de utilização do mesmo, são tarefas que a população não se dispõe a fazer facilmente e com toda razão. Para isso, seria necessário o conhecimento geral de aplicações dos conceitos de voltagem, corrente elétrica, potência e resistência elétrica e, possivelmente, das leis de Ohm e Kirchoff.

3.1 – O Efeito Joule

Correntes elétricas são produzidas em condutores pela ação de um campo elétrico aplicado, por exemplo, por uma bateria. Neste caso, a energia química da bateria está sendo transformada em energia cinética dos portadores de carga. A resistência do condutor, por sua vez, transforma a energia cinética (energia mecânica) em *energia térmica*. Ou seja, como em qualquer processo onde há atrito, energia é dissipada na forma de calor. A dissipação de energia em um resistor (condutor) elétrico é denominada *Efeito Joule*.

Vamos idealizar uma situação simples na qual há apenas uma ddp V aplicada às extremidades de um resistor (por exemplo, uma bateria dissipando energia).

Por outro lado, num resistor sujeito a uma ddp V , a quantidade de carga dq que o atravessa num intervalo de tempo dt é

$$dq=Idt \quad [01]$$

Nesse processo, o trabalho realizado pela força elétrica para transportar a carga dq é dado por:

$$dW=dqV= I V dt \quad [02]$$

Por sua vez, este trabalho realizado por unidade de tempo, corresponde à potência elétrica dissipada P no resistor. Portanto,

$$P=\frac{dW}{dt}=VI \quad [03]$$

A equação acima é válida em geral, mesmo para resistores que não obedecem a lei de Ohm, sendo uma consequência direta da lei de conservação da energia.

Para os casos especiais de materiais ôhmicos de resistência R , pode-se utilizar a relação $V = RI$ e escrever, utilizando a equação 03

$$P=R^2I^2 \quad [04]$$

$$\text{ou, ainda, } P=\frac{V^2}{R} \quad [05]$$

Unidades:

[S.I.] Watt (W) = Joules / segundo (J / s)

[prática] quilowatt (kW) = 10^3 W

A aplicação de uma ou outra equação depende evidentemente do problema específico em consideração.

3.2 – Energia Elétrica dissipada

Sempre que um aparelho elétrico entra em funcionamento, energia elétrica é transformada em outras formas de energia como mecânica de rotação, luminosa, térmica, sonora, etc., i.e., os aparelhos elétricos só funcionam com uso de fontes de energia elétrica.

O acesso e a utilização dessas fontes constituem um custo a pagar, seja na hora de comprar uma pilha ou bateria, seja na hora de pagar a conta da luz à companhia

distribuidora, que cobra o *consumo* do usuário, traduzido como a quantidade de energia consumida na sua residência durante um determinado intervalo de tempo.

Como a energia elétrica dissipada E informa a quantidade de energia elétrica transformada em energia térmica (Calor) durante certo intervalo de tempo Δt qualquer, a companhia cobra por essa energia relacionando-a com a potência média dissipada P pelos vários aparelhos existentes na casa, de tal forma que

$$E = P \Delta t \quad [06]$$

Unidades:

[S.I.] Joule (J)
[prática] quilowatt –hora (kWh)

É nesse aspecto que é realizado o experimento demonstrativo de Circuitos Residenciais, onde o objetivo central é entender a utilização das leis e das grandezas elétricas acima citadas.

Para isso, vamos utilizar os conceitos definidos acima, assim como recorrer aos capítulos 01, 02 e 03 da apostila, nos quais estão descritos alguns conceitos básicos relativos aos circuitos elétricos e aplicá-los ao circuito residencial mostrado na figura 01.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1- Circuito Residencial

4.1.1- Materiais necessários

- a) Circuito Residencial indicado na figura 1;
- b) Caneta teste;
- h) Multiteste comercial Minipa, modelo ET-2082.

4.1.2- Procedimento

O circuito mostrado na figura 5.1 consiste de vários elementos semelhantes aos existentes nos circuitos residenciais.

Trata-se de um circuito cuja malha principal, assinalada pela letra a , inicia-se no ponto 1 (entrada do circuito). A partir da malha a e dos nós x , partem quatro derivações, cujas malhas são assinaladas pelas letras b, c, d, e .

Pode-se então identificar nas várias malhas os seguintes elementos:

Malha a

- 1 – entrada do circuito
- 2 – disjuntor

Malha b

3 – lâmpada incandescente L_A

4 – interruptor *threeway*

Malhas c e e

5 e 9 – tomada simples

Malha d

6 e 7 – lâmpadas incandescentes ligadas em série L_B e L_C

8 – interruptor simples

4.1.2.1 - Baseado na configuração do circuito e no funcionamento dos vários componentes, o professor demonstra o funcionamento do circuito tomando como base de discussão os conceitos de voltagem, resistência e corrente elétrica, potência e energia elétrica dissipada, além das leis de Ohm e Kirchoff.

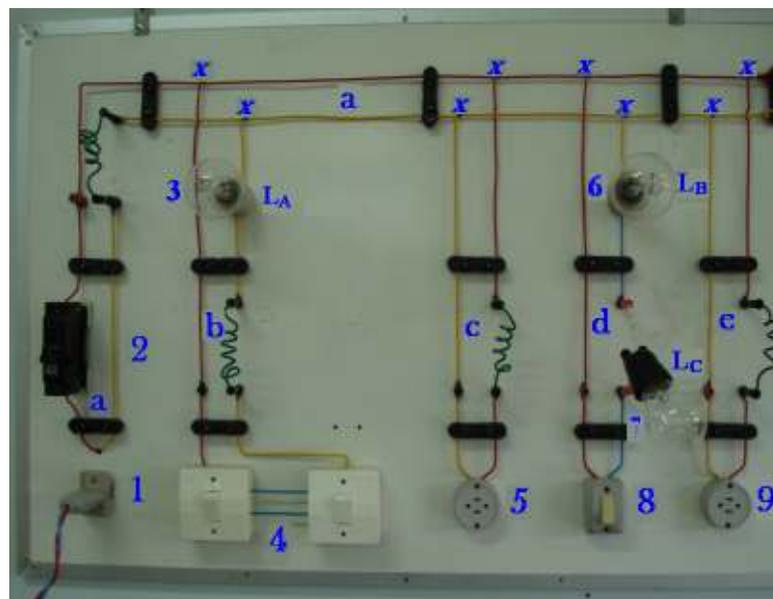


Figura 5.1 – Circuito residencial de laboratório

4.1.2.2 – Caracterização das lâmpadas

Dados do fabricante: Lâmpada L_A 220 volts 40 watts
Lâmpada L_B 220 volts 150 watts
Lâmpada L_C 220 volts 25 watts

a) Medida de resistência das lâmpadas L_A e L_B

a.1) À temperatura ambiente

Com o circuito desligado, ligue os terminais da lâmpada L_A nos terminais do multímetro, na função ohmímetro, com a chave seletora na posição conveniente. Anote abaixo o resultado obtido.

$$R(L_A) = \quad \Omega$$

a.2) Repita o procedimento acima para a lâmpada L_B . Anote abaixo o resultado obtido.

$$R(L_B) = \quad \Omega$$

b) Medida da corrente nas lâmpadas L_A e L_B para $V=220$ volts

b.1) Mude a chave seletora para a posição de corrente (posição 20A-CA). Retire o fio **b** do circuito e introduza os terminais do multímetro nos respectivos bornes. Coloque a lâmpada L_A no soquete 3 e ligue o circuito. Anote abaixo o valor da corrente medida.

$$I(L_A) = \quad A$$

b.2) Substitua a lâmpada L_A pela lâmpada L_B e repita o procedimento acima. Anote abaixo o resultado obtido

$$I(L_B) = \quad A$$

c) Medida das tensões nas lâmpadas L_B e L_C ligadas em série

Com o multímetro na função voltímetro e a chave seletora na escala conveniente, meça a ddp nos respectivos terminais das lâmpadas L_B e L_C (ver figura 1). Anote a seguir o resultado obtido.

$$V(L_B) = \quad \text{volts} \quad \text{e} \quad V(L_C) = \quad \text{volts}$$

d) Medida da corrente através das lâmpadas L_B e L_C ligadas em série

Mude a chave seletora para a posição de corrente (posição 20A-CA). Abra o circuito na malha **d**, retire um dos fios da lâmpada L_C do soquete (ver figura 1). Em

seguida, ligue o interruptor **8**, introduza os terminais do amperímetro e meça o valor da corrente. Anote abaixo o resultado obtido.

$$I(L_B) = I(L_C) = \quad A$$

Observe que, embora circule corrente na malha **d, uma das lâmpadas permanece apagada.**

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

- a) A potência dissipada por uma lâmpada elétrica de filamento pode ser expressa pela relação $P=V \times I$ (onde V é a ddp nos terminais da lâmpada e I , a corrente que passa através do seu filamento). Utilizando os valores obtidos para $I(L_A)$, $I(L_B)$ e para a potência da lâmpada L_B , além do valor fornecido pelo fabricante para a potência de L_A , calcule o valor das resistências das lâmpadas $R(L_A)$ e $R(L_B)$ quando estas são ligadas em 220V.
- b) A partir dos valores encontrados no item anterior discuta as razões das diferenças encontradas entre os valores de $R(L_A)$ e $R(L_B)$ para a temperatura ambiente e quando ligadas em 220V.
- c) Utilizando os valores obtidos para as tensões nas lâmpadas L_B e L_C ligadas em série verifique a aplicação da lei das malhas para o circuito.
- e) Explique porque, estando ligadas em série, uma das lâmpadas permanece apagada, mesmo com o interruptor **8** (ver figura 1) ligado.

6. QUESTÕES

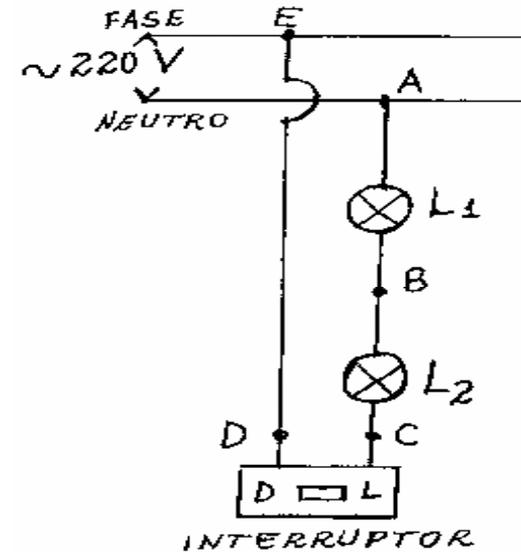
- a) Lâmpadas de 40W, de 60W e de 100W. O que é que essas lâmpadas possuem de diferente uma das outras?
- b) Um chuveiro elétrico de 3.200W/220V foi usado durante 15 horas em um determinado mês, enquanto um ferro elétrico de 1.200W/220V foi utilizado durante 45 horas no mesmo período. Qual dos dois consumiu mais energia?
- c) Uma lâmpada de filamento possui no seu bulbo de vidro a especificação 60W 220V.
- Quando ligada numa tensão de 200V, qual o valor da corrente no seu filamento?
 - Qual a potência nominal que pode ser dissipada por essa lâmpada?
 - Suponha que essa lâmpada permaneça ligada durante 8 horas/dia e que o preço do kWh cobrado pela distribuidora é de R\$ 0,38, já considerados todos os tributos. Quanto deverá o usuário pagar pelo seu consumo durante 30 dias?
- d) Que função (ões) possui o disjuntor num circuito residencial? E o antigo fusível? Em que esses dois dispositivos se diferenciam?
- e) Em um circuito elétrico foram ligadas três lâmpadas idênticas, em série.
- Ao acender todas possuem o mesmo brilho?
 - O que acontece com as demais lâmpadas, se uma delas queimar?
- f) Responda o item anterior caso as lâmpadas sejam ligadas em paralelo.
- g) Numa instalação elétrica residencial ocorre freqüentemente o desarme de um disjuntor de 15A. Explique por que isso acontece?
- h) Explique o princípio de funcionamento do interruptor *threeway*.
- i) O circuito a seguir refere-se a um ramo de uma instalação elétrica residencial de **220V**, onde **A**, **B**, **C**, **D** e **E** são pontos onde podem ser conectadas as pontas de prova de um voltímetro. **L1** e **L2** são lâmpadas ligadas em série. Tomando por base este circuito, indique na tabela abaixo qual a tensão medida por um voltímetro entre os pontos indicados, considerando o interruptor nas seguintes condições:

i) Interruptor desligado

V_{AB}	
V_{BC}	
V_{CD}	
V_{DE}	
V_{EA}	

ii) Interruptor ligado

V_{AC}	
V_{CD}	
V_{DE}	
V_{EA}	



CAPÍTULO -VI

1. CIRCUITO RC

2. OBJETIVOS

Verificar a dependência temporal da corrente durante os processos de carga e descarga (no capacitor) num circuito RC.

3. INTRODUÇÃO TEÓRICA

3.1- O Capacitor

Já conhecemos alguns elementos utilizados em circuitos elétricos. Cabe-nos agora apresentar um outro elemento também bastante comum em circuitos: o Capacitor.

O capacitor é basicamente constituído de dois condutores, geralmente em forma de placas paralelas, separados por um dielétrico. Ele é definido por uma constante denominada Capacitância.

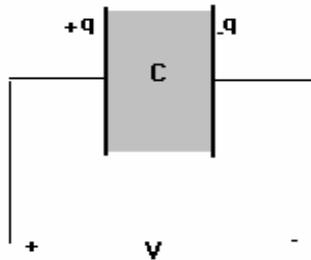


Figura 6.1- O Capacitor

Por definição, essa capacitância é obtida da seguinte expressão:

$$C = \frac{q}{V}. \quad (01)$$

No SI a unidade de capacitância é o Faraday (F) que é o quociente entre Coulomb(C) e Volt(V) , mas em virtude dessa unidade ser muito grande na natureza, usam-se mais comumente o μF e o nF .

3.2- Circuitos RC

Pela definição da equação 01 e pelo próprio nome sugestivo, o capacitor é um dispositivo elétrico capaz de armazenar cargas em suas placas e, portanto, de armazenar energia no campo elétrico existente entre as cargas opostas das placas. A pergunta que surge então é: Como carregar esse capacitor?

Na prática o que se faz é montar o circuito da figura 03 (chave inversora na posição 1) do item 4:

Aplicando a Lei das Malhas:

$$E - R \cdot I - \frac{q}{C} = 0$$

Colocando a equação só em termos de q:

$$I = \frac{dq}{dt}$$

$$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = E$$

Esta é uma equação diferencial ordinária cuja solução nos fornecerá

$$q = f(t)$$

Do estudo das equações diferenciais pode ser mostrado que

$$q = C \cdot E (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (02)$$

onde foi adotado que em $t=0$ não havia cargas nas placas do capacitor. Obviamente é muito simples determinar a corrente no capacitor (que pode ser obtida através de pontos instantâneos com o amperímetro da figura 03)

$$I = \frac{dq}{dt} \Rightarrow I = \left(\frac{E}{R}\right) \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (03)$$

este resultado mostra uma corrente dependente do tempo, apesar de termos uma fonte constante E. Isto pode ser bem explicado da seguinte forma: a medida que o capacitor se carrega, ou seja, q aumenta na equação 02, a corrente diminui porque a tensão no capacitor aumenta e esta se opõe a tensão E.

Ainda é importante notar que o produto RC na equação 03 deve ter dimensão de tempo, pois se assim não fosse, não haveria cancelamento com o t do numerador. Este produto é de grande importância em eletricidade e por isso recebe o nome de constante de tempo capacitiva(τ). Este tempo por sua vez corresponde ao tempo necessário para que o capacitor atinja aproximadamente 63% de sua carga de regime ou equilíbrio(a carga quando $t \rightarrow \infty$).

Através da equação 03, podemos determinar qualquer tensão no circuito, pois pela Lei de Ohm aplicada ao resistor, temos

$$V_C = E - V_R = E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (04)$$

e também a tensão aplicada ao capacitor

$$V_C = E - V_R = E (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (05)$$

Para melhor visualizar esses resultados, consideremos os gráficos de V_R e V_C das figuras 6.2a e 6.2b a seguir, que representam, respectivamente, um esboço do comportamento das tensões no capacitor e no resistor em função do tempo.

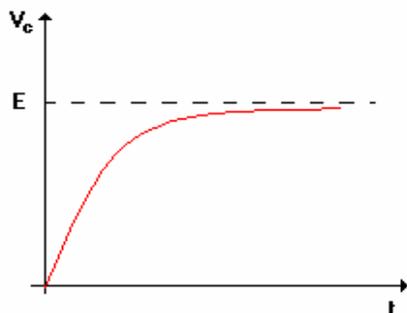


Figura 6.2a

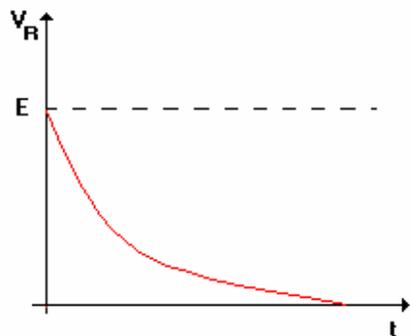


Figura 6.2b

Depois de um tempo muito longo (idealmente $t \rightarrow \infty$), se mudarmos a chave inversora da posição 1 para a 3, retiramos a fonte do circuito. O capacitor então está com uma tensão E aplicada a seus terminais. Consequentemente, ele irá **descarregar** produzindo uma corrente no sentido contrário ao sentido do carregamento. Vamos então examinar essa descarga através da lei das malhas:

$$R \cdot \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0 \quad (06)$$

Resolvendo para q ,

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (07)$$

onde, q_0 é a Carga do capacitor no início da descarga. No nosso caso $q_0 = CE$.

Resolvendo agora para a corrente, ou seja, derivando a equação 07, obtem-se

$$i = -\frac{q_0}{RC} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = -i_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (08)$$

É importante observar que as equações 07 e 08 foram deduzidas considerando que o início da descarga foi em $t=0$. Nesse caso teremos a tensão no capacitor igual a tensão no resistor, que fornecerá o seguinte esboço:

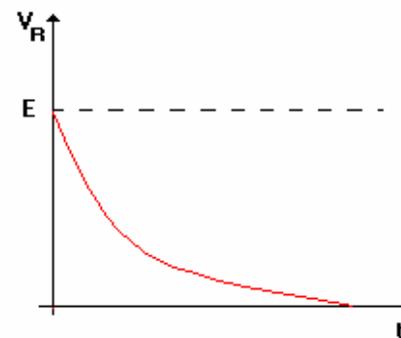


Figura 6.3

Como um resumo das equações apresentadas temos a seguinte tabela:

	Tempo	Carregamento	Descarregamento
Carga	Geral	$I = \frac{E}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	$I = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$
	$t=0$	$I = 0$	$I = I_0$
	$t \rightarrow \infty$	$I = \frac{E}{R}$	$I = 0$
Corrente	Geral	$i = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$	$i = -i_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$
	$t=0$	$i = \frac{E}{R}$	$i = -i_0$
	$t \rightarrow \infty$	$i = 0$	$i = 0$

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1- Materiais necessários

- Fonte de tensão contínua DC variável de 0 a 30 V.
- Capacitor de 1.000 μ F e 40V.
- Resistor de 22 K Ω .
- Voltímetro.
- Miliamperímetro (0,1 mA)
- Cronômetro.
- Placa de circuito.
- Chave inversora.
- Chave simples.

Monte o circuito representado na figura 6.4a.

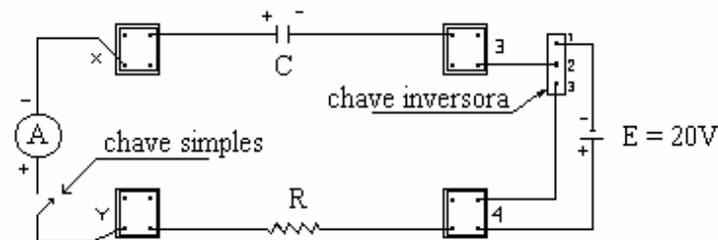


Figura 6.4a

Cujo circuito equivalente é:

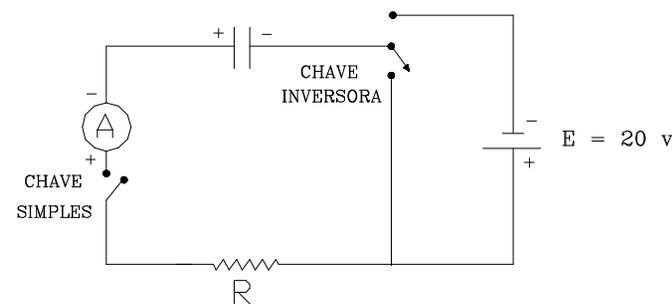


Figura 6.4b

4.2 - Medidas de corrente - (carga)

- Com voltímetro na escala 30V (DC) retire 20V da sua fonte para alimentar o circuito.
- Ligue a chave inversora na posição 1 de modo a conectar a fonte ao circuito.
- Prepare o cronômetro, marque a partir do instante em que a chave simples for ligada ao circuito, o tempo necessário para a corrente atingir os valores apresentados na tabela 1. Repita duas vezes a operação pondo de cada vez o capacitor em curto , antes de ligar a chave simples . Para isto, retire o terminal do ponto 2 (da chave inversora) e coloque-o em A por alguns segundos.

4.3- Medidas de corrente - (descarga)

- Desligue a chave simples e não descarregue o capacitor.
- Para garantir que o capacitor está completamente carregado retire o terminal da fonte do ponto B e ligue-o ao ponto A por alguns segundos com a chave inversora na posição 1.
- Ponha a chave inversora na posição vertical (2) retirando a fonte (volte com o terminal do ponto A para o ponto B).
- Em seguida, inverte, inverte os terminais do miliamperímetro nos pontos nos pontos x e y pois sabemos que a corrente de descarga é em sentido contrário.
- Ligue a chave inversora na posição 3.
- Prepare o cronômetro e ligue a chave simples marcando o tempo necessário para a corrente atingir os valores da tabela 2. Note que a corrente no circuito é proveniente somente da descarga do capacitor.
- Carregue novamente o capacitor. Primeiro através da resistência (30 segundos aproximadamente) depois diretamente com a fonte tirando do ponto B e colocando-o no ponto A. Ou seja, repetir todo o procedimento anterior.

Não esqueça de inverter os terminais do miliamperímetro, tanto na carga quanto na descarga, ou melhor, olhar a polaridade correta.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

- Calcule $\ln I$ e os tempos médios (t_m) a partir dos valores tabelados.
- Construa os seguintes gráficos em papel milimetrado :
 - Na carga, I x t_m .
 - Na descarga, I x t_m .
- Em seguida , faça o gráfico :
 - $\ln I$ x t_m (na carga)
- O gráfico do item (c) deve ser linear pois na equação

$$I(t) = \frac{\varepsilon}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\ln(I) = \ln\left(\frac{\varepsilon}{R}\right) - \frac{1}{\tau} \cdot t$$

ou seja,

$$y = y_0 - \frac{1}{\tau} \cdot t$$

é a equação de uma reta.

Portanto, esta equação nos permite calcular graficamente a constante τ . Faça isso e compare com o valor previamente previsto.

e) Determine $V_R(t)$ e $V_C(t)$ no processo de carga, utilizando os valores de ε e σ . Faça isso para $t = 0s$ e $t = \infty s$

TABELA 1 - CARGA

I(mA)	t ₁ (s)	t ₂ (s)	t _m (s)	ln I
0.8				
0.7				
0.6				
0.5				
0.4				
0.3				
0.2				
0.1				

TABELA 2 - DESCARGA

I(mA)	t ₁ (s)	t ₂ (s)	t _m (s)	ln I
0.8				
0.7				
0.6				
0.5				
0.4				
0.3				
0.2				
0.1				

6. QUESTÕES E EXERCÍCIOS

- a) Mostre que o tempo necessário para que a carga atinja 63% do seu valor de equilíbrio é igual a constante de tempo capacitiva do circuito RC.
- b) Quanto vezes maior do que a constante de tempo é o tempo que devemos esperar, após ser ligado o circuito RC, para que a carga do capacitor atinja 90% do valor de equilíbrio.
- c) Um capacitor de $50 \mu\text{F}$, inicialmente descarregado, é ligado em série a um resistor de $1,6 \text{ k}\Omega$ e a uma fonte de tensão contínua de 200 V . Determine:
- I) A intensidade inicial da corrente $I(0)$.
 - II) A equação da corrente em função do tempo.
 - III) A equação da carga do capacitor em função do tempo
 - IV) A energia armazenada no condensador no instante $t = RC$ (Obs. $E = \frac{1}{2} CV^2$).

CAPÍTULO - VII

1. INSTRUMENTOS DE MEDIDAS: OSCILOSCÓPIO.

2. OBJETIVO

Aprender a efetuar medidas de Tensões, Frequências e Diferença de Fase de sinais usando osciloscópios.

3. INTRODUÇÃO TEÓRICA

3.1 - Introdução

No estudo dos sinais, e particularmente os sinais elétricos (Tensão, Corrente, etc.), existem 3 grandezas fundamentais para que se possa determinar o comportamento dos sistemas frente a aplicação desses sinais: Amplitude, Frequência e Fase.

Um instrumento de extrema importância na medição e determinação dessas grandezas é o Osciloscópio. Diante disso, nesta introdução, você vai aprender a:

- Manusear os controles básicos de um osciloscópio;
- Fazer medidas de Tensão e Frequência;
- Determinar a defasagem entre sinais através da técnica das Figuras de Lissajous.

3.2 - Osciloscópio

O osciloscópio é um aparelho cuja função básica é visualizar formas de onda e fenômenos transitórios (pulsos). Ele foi inventado em 1897 por Ferdinand Braun.

Qualquer grandeza física que varie com o tempo de forma cíclica ou transitória, com instrumentos apropriados, pode ser visualizado na tela do osciloscópio.

As imagens na tela de um osciloscópio são formados unicamente pelo movimento rápido de um ponto, tanto no eixo vertical como no horizontal. Quando o movimento do ponto é rápido a imagem que se observa na tela é uma linha.

O osciloscópio é um equipamento utilizado em várias áreas, como na manutenção de equipamentos médicos, náuticos, de aviação, telecomunicações, automóveis, etc., sem falar que é um instrumento essencial para um profissional de eletrônica.

3.2.1 - Estrutura externa

A figura 7.1 mostra o osciloscópio Peak Tech, modelo 2020GN 20MHz, utilizado no Laboratório de Ensino de Física do DFTE. Nela, podemos visualizar as Pontas de Prova que são utilizadas para interligar o osciloscópio aos pontos de medida. Elas são de dois tipos: 1 x 1 - o valor medido é o mesmo valor apresentado na tela; 10 x 1 - o valor medido é 10 vezes o valor apresentado na tela (ponta de prova atenuadora).

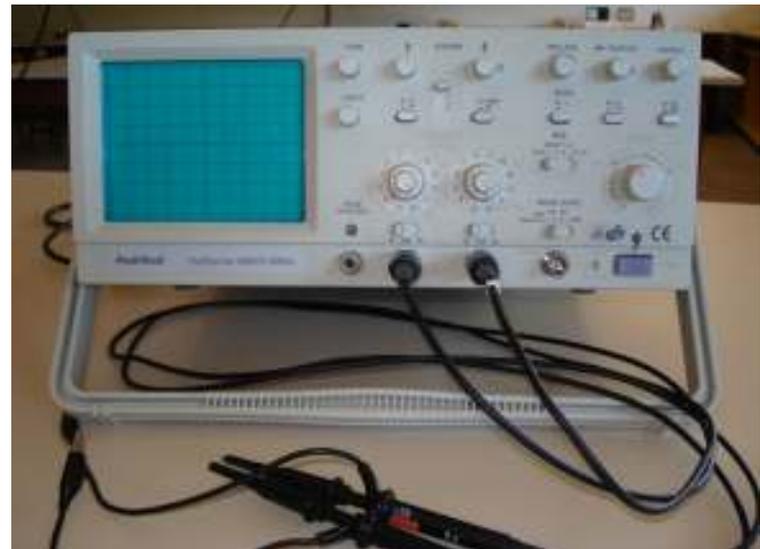


Figura 7.1- Osciloscópio de duplo canal(traç) utilizado no Laboratório do DFTE

Os principais controles do osciloscópio e suas respectivas funções estão especificados na figura 7.2.

Botão Liga / Desliga: Botão lilás, indicado pela letra L.

Canais de entrada dos sinais a serem medidos: Canal 1(X) e Canal 2(Y) – Indicados por Ex e Ey que são, respectivamente, as duas entradas para os sinais de tensão. Ambas as entradas possuem as mesmas características e os mesmos controles.

3.2.2 - Osciloscópio de simples traço e duplo traço (um ou dois canais)

Os controles do painel do equipamento são também mostrados na figura 7.2 e podem ser divididos em quatro grupos:

- Controle de Ajuste do Traço ou Ponto na Tela:
Intensidade – Indicado pela letra A, ajusta a luminosidade da imagem.
Foco – Indicado pela letra B, ajusta a nitidez da imagem.

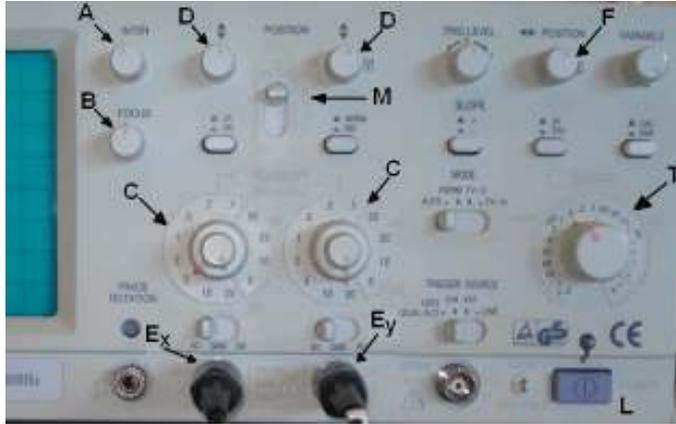


Figura 7.2- Parte do osciloscópio, exibindo seus principais controles

- Controle de Ganho vertical:
Chave seletora de ganho vertical – Indicado pela letra C, aumenta ou diminui a escala de medida da amplitude do sinal.
Ajuste fino de ganho vertical – Botão localizado no centro da chave seletora de sinal, aumenta ou diminui a amplitude do sinal com mais precisão.
Posição vertical – Botões indicados com a letra D, movimentam a figura para cima e para baixo.
- Controle de Atuação Horizontal:
Chave seletora de ganho de tempo - ajusta o tempo de deslocamento (ao longo do eixo horizontal). Esse controle está indicada na figura 7.2 pela letra T.
Posição horizontal – indicado pela letra F, movimenta a figura horizontalmente.
- Controles de Entrada e Sincronismo:

Permitem fixar a forma de onda na tela do osciloscópio. São usados principalmente para a observação de sinais alternados.

Basicamente não há diferenças entre o osciloscópio de um canal e o de dois canais. Há somente na aparência externa, mas no que diz respeito aos controles e às funções eles são praticamente iguais. O osciloscópio de duplo traço possui entradas.

Para operar o osciloscópio de duplo traço temos o controle “modo”, representado pela letra M, que nos permite:

CH 1 - trabalhar apenas com o canal 1.

CH 2 - trabalhar apenas com o canal 2.

DUAL - trabalhar com os dois canais simultaneamente.

ADD - trabalha com a soma dos dois canais. Há também o controle que inverte o sinal de um dos canais do osciloscópio. Se quisermos trabalhar com a subtração dos dois canais, invertemos um deles e acionamos ADD.

3.2.3 - Estrutura interna

A estrutura interna ou diagrama de blocos do osciloscópio é mostrado na fig. 7.3. Para conhecermos melhor o osciloscópio devemos partir de seu elemento básico que é o TRC ou Tubo de Raios Catódicos. Neste tubo existe um filamento que é aquecido próximo a um cátodo (eletrodo negativo) e faz com que este forneça elétrons. O feixe de elétrons que é produzido, passa pelas placas de controle da intensidade, placas de foco e defletoras e se choca contra a tela fluorescente, produzindo um ponto luminoso. Se entre as placas de deflexão vertical for aplicada uma tensão, o feixe sofrerá um desvio vertical.

Supondo uma tensão variável e periódica aplicada às placas de deflexão vertical, o feixe será desviado para cima e para baixo periodicamente, tantas vezes por segundo quanto a frequência da tensão, como mostra a fig. 7.3.

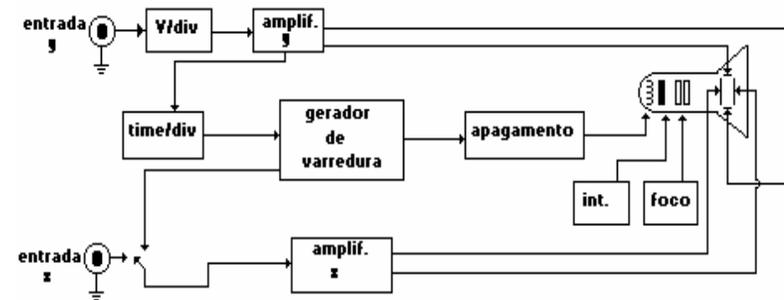


Figura 7.3 - Diagrama de Blocos do Osciloscópio

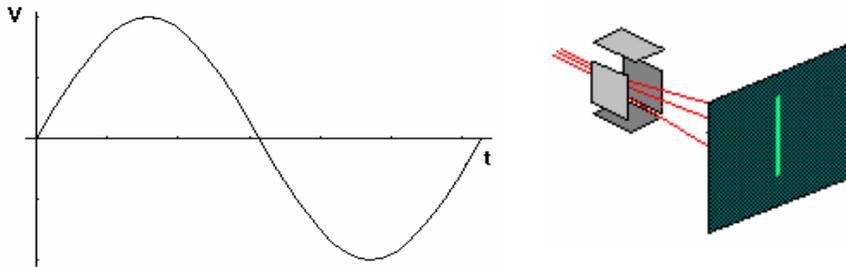


Figura 7.4 - Senóide produzindo deflexão vertical

Essa tensão poderá ser determinada, utilizando-se o painel quadriculado existente defronte da tela. O controle do atenuador vertical fornece a proporcionalidade (ou escala) V/div ou mV/div do eixo vertical central da tela. Para que haja traçado na tela, é necessário que o feixe se desloque no sentido horizontal. Aplica-se então, nas placas de deflexão horizontal, uma tensão que, devido a sua forma, é denominada Dente de Serra ou tensão de Varredura, conforme fig. 7.5.

Enquanto as placas de deflexão vertical desviam o feixe verticalmente, as placas de deflexão horizontal desviam horizontalmente, de acordo com a tensão dente de serra. Se a tensão de varredura (ou dente de serra) tiver a mesma frequência que a tensão vertical, aparecerá na tela um ciclo completo da tensão vertical, conforme a fig. 7.6.

O seletor de varredura ou Sweep permite a leitura do período (ou frequência) e conseqüentemente da frequência (ou período) da tensão vertical, pois fornece a proporcionalidade tempo por divisão: s/div, ms/div (ou Hz/div, KHz/div) do eixo horizontal central da tela.

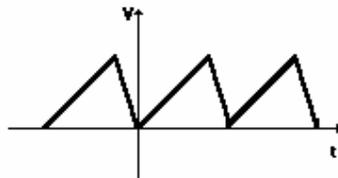


Figura 7.5 - Dente de Serra provocando deflexão horizontal

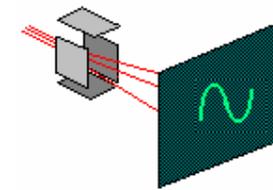


Figura 7.6 - Resultado da superposição das deflexões horizontal e vertical

3.3 - Medida de tensão

Sob condições normais de operação, o sinal a ser medido é injetado na entrada vertical e a varredura horizontal ou “sweep” é feita internamente.

A maioria dos modelos do osciloscópio possui atenuador vertical calibrado, isto é, apresenta uma escala direta, e a amplitude do sinal pode ser medido com boa precisão.

A escala vertical é normalmente calibrada em V/div e mV/div. A fig. 7.7 mostra um sinal em uma tela de osciloscópio. Para medir o valor de pico a pico da forma de onda, determinam-se quantas divisões ocupa na vertical e em seguida multiplica-se o número de divisões verticais pela sensibilidade.

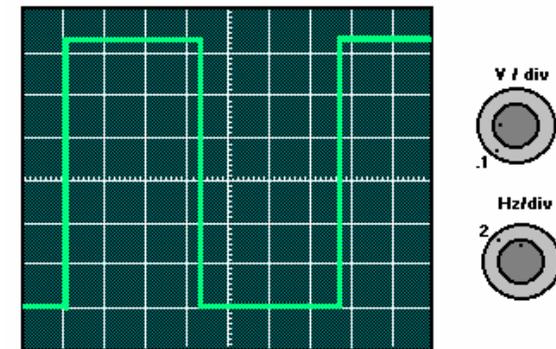


Figura 7.7: Onda quadrada

Por exemplo: o sinal da figura 7.7 apresenta 6,4div e o atenuador vertical tem sensibilidade 0,1 V/div, logo o valor pico a pico será:

$$V_{pp} = 0,64 \text{ V (Tensão Pico à Pico)}$$

$$f = 13,6 \text{ Hz.}$$

No entanto, a medida de tensão usual é o valor eficaz ou rms (*root mean square*). Considere a seguir um sinal de tensão alternada do tipo senoidal, por exemplo, a tensão alternada da rede residencial (ver figura 7.8 a seguir).

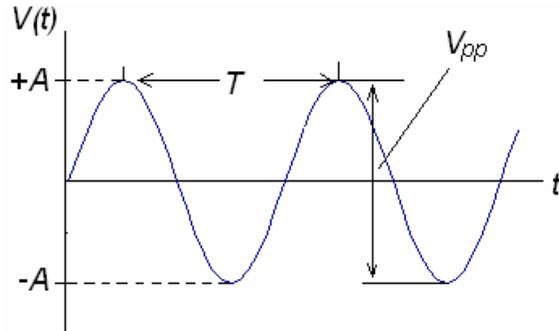


Figura 7.8: Sinal senoidal

Podemos representar esse sinal pela equação:

$$V(t) = A \sin(2\pi ft + \phi) \quad \text{onde: } A = \text{amplitude do sinal}$$

$$f = \text{freqüência}$$

$$\phi = \text{fase do sinal}$$

Para calcularmos o valor eficaz ou efetivo V_{ef} da tensão a partir do valor de pico a pico, calculamos o seu valor medio quadrático (rms), através de:

$$V_{ef} = V_{rms} = \frac{A}{\sqrt{2}} \quad \text{ou, observando na figura 8.8, que } A = \frac{V_{pp}}{2}$$

$$V_{ef} = V_{rms} = \frac{V_{pp}}{2\sqrt{2}}$$

3.4 - Medida de freqüência

Pode-se medir a freqüência do sinal usando a escala do seletor de varredura. Observa-se o sinal na tela e medem-se, na horizontal, quantas divisões ocupam um ciclo do sinal na tela. Em seguida multiplica-se o número de divisões horizontais pela sensibilidade do seletor. O valor encontrado será a freqüência do sinal observado.

A fig. 7.7 mostra um sinal cujo ciclo (período) T ocupa 6,8 div. A sensibilidade do seletor é 2 Hz/div. Sabendo que $T = 1/f$, onde f é a freqüência do sinal, teremos:

Para o nosso osciloscópio, temos no seletor de varredura várias faixas de tempo. Procure uma faixa de freqüência adequada para a medida do seu sinal.

3.5 – Medida de Diferença de Fase

Nos circuitos onde aparecem capacitores e indutores surgem tensões senoidais de mesma freqüência, mas defasadas entre si de um determinado ângulo. Dependendo do sinal utilizado como referência a defasagem pode ser positiva (sinal adiantado) ou negativa (sinal atrasado).

São dois os métodos utilizados para medir diferenças de fase entre dois sinais de tensão. Os métodos Direto e das Figuras de Lissajous.

3.5.1 – O método direto

A figura 7.9 abaixo exhibe dois sinais de tensão, exibindo diferença de fase entre eles. Sendo T_d o período da defasagem e T_s o período dos sinais, a equação a seguir fornece diretamente a medida da diferença de fase entre os sinais

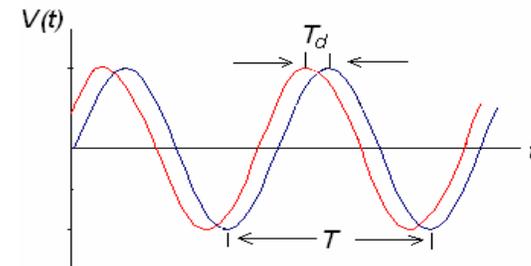


Figura 7.9: Sinal senoidal

$$\phi = \frac{T_d}{T_s} \cdot 360^\circ$$

Onde, T_s é o período dos sinais.

3.5.2 – Método das Figuras de Lissajous

Este método consiste em compor perpendicularmente os dois sinais em questão, injetando-se um sinal na entrada horizontal e outro na vertical do osciloscópio.

Se os dois sinais têm a mesma frequência, as figuras obtidas são elipses, cujos formatos dependem do ângulo de defasagem existente entre os sinais.

Deixa-se como exercício para o estudante provar a afirmativa acima, isto é, mostrar que sendo $V_x = V_{ox} \text{sen} \omega t$ e $V_y = V_{oy} \text{sen}(\omega t + \phi)$, a composição destes sinais dará como resultado a equação geral de uma elipse:

$$\frac{V_x^2}{V_{0x}^2} + \frac{V_y^2}{V_{0y}^2} - \frac{2V_x V_y}{V_{0x} V_{0y}} \cos \phi = \text{sen}^2 \phi$$

É neste aspecto que se baseia o método das figuras de Lissajous, que reproduz na tela do osciloscópio a figura da elipse resultante da composição dos dois sinais elétricos, representada pela equação acima. Para calcularmos o valor do ângulo de defasagem, devemos medir os comprimentos $2a$ e $2b$ como mostra a figura 7.10 a seguir:

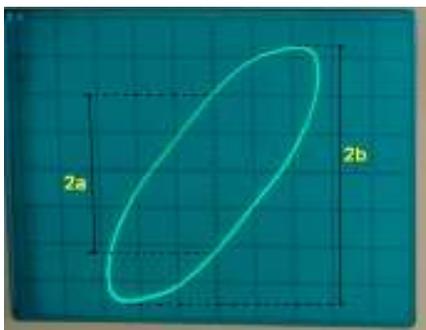


Figura 7.10: Composição de dois sinais defasados.

É também deixado ao estudante mostrar que o ângulo de defasagem entre os dois sinais pode ser obtido a partir das equações para V_x e V_y acima definidos.

$$\text{sen} \phi = \frac{2a}{2b} \quad \text{onde } a \text{ e } b \text{ estão representados na figura acima}$$

Observe que quando $\phi = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \dots$ $a = b$ e a figura é um círculo e enquanto quando $\phi = 0, \pi, 2\pi, \dots$ a figura resultante é uma reta.

Quando comparamos sinais com frequências diferentes, outros métodos podem ser utilizados. Neste caso, as figuras obtidas são mais complicadas e para a determinação da relação matemática entre as frequências, aplica-se o Método das Tangências ou o Método das Secantes. No entanto, as descrições de tais métodos estão fora do escopo deste texto.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 - Medidas de tensão e frequências

4.1.1 - Material necessário

- Osciloscópio Peak Tech, modelo 2020GN 20MHz;
- Mútimetro digital Minipa, modelo ET-2082Dawer;
- Resistores 680Ω , 820Ω ;
- Transformador Leybold;
- Chave simples;
- Fios para ligação.

4.1.2 - Ajustes Preliminares

- Ligar o osciloscópio (observando a tensão da rede) e regular a luminosidade. Evite trabalhar com o aparelho na posição de máxima luminosidade.
- Ajustar o foco do feixe.
- Ajustar o posicionamento vertical e horizontal.
- Colocar a ponta de prova na entrada vertical.
- Selecionar uma posição para a chave comutadora do coeficiente de atenuação (vertical) em função da amplitude do sinal a ser observado.
- A chave comutadora CA - CC - GND deve ser posicionada adequadamente, em função do tipo de sinal a ser analisado.
- Selecionar a chave comutadora de modo de sincronismo para o tipo desejado.
- Selecionar uma posição para a chave de variação da varredura interna (horizontal) em função da frequência do sinal a ser analisado. O traço indicador que parte da chave, leva a dois números que correspondem às frequências limites da faixa escolhida.

- i) O potenciômetro para ajuste manual da frequência de varredura possibilita o ajuste fino da frequência, dentro dos limites da faixa. Quando estiver fechado, refere-se ao limite inferior.
- j) Se, mediante ajuste manual da frequência de varredura não for conseguido o sincronismo, ajustar o controle de nível.
- l) Ajustar o potenciômetro de ganho em função da expansão desejada.

4.1.3 - Procedimento

- a) Monte o circuito da figura 7.11, abaixo:

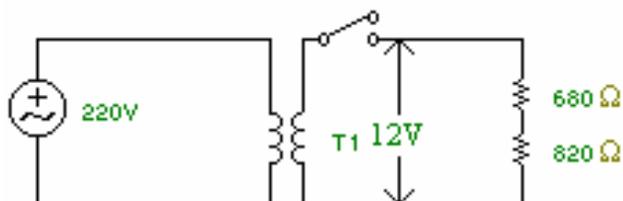


Figura 7.11: Circuito linear de corrente alternada.

- b) Após a aprovação do professor, ligue o transformador. Meça e anote com o voltímetro as tensões eficazes nos resistores e anote na tabela 1.
- c) Com o osciloscópio meça as tensões pico a pico nos resistores e anote na tabela. Coloque o atenuador vertical do osciloscópio na escala mais alta.
- d) Calcule as tensões eficazes nos resistores a partir das tensões pico a pico medidas e complete a tabela 01.
- e) Meça a frequência e o período da tensão de cada resistor e anote na tabela.
- f) Calcule o erro relativo e percentual, considerando a frequência da rede como sendo de 60 Hz.

4.2 - Medidas de defasagem através dos métodos Direto e das figuras de Lissajous

4.2.a - Material necessário

- Osciloscópio Peak Tech, modelo 2020GN 20MHz;
- Década de capacitores;
- Resistor de 3,3 KΩ 8,2 KΩ;

- Transformador Leybold;
- Chave simples;
- Placa de Circuitos
- Fios de ligação;
- Mútimetro digital Minipa, modelo ET-2082;

4.2.b - Procedimento

- a) Monte o circuito da figura a seguir:

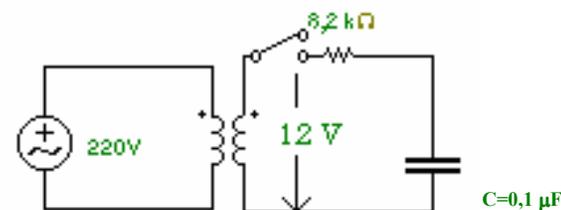


Figura 7.12: Circuito RC em corrente alternada.

- b) Com as pontas de prova do osciloscópio, observe a tensão no capacitor e a tensão de entrada do secundário (cuidado, a tensão a ser medida é a tensão de saída do transformador). Meça o período T_s destas ondas; portanto use o osciloscópio de duplo canal.
- c) Use o osciloscópio de duplo canal para medir o período de defasagem T_d entre as duas ondas. Calcule o ângulo de defasagem entre as duas ondas pelo método direto.
- d) Utilizando o modo xy do osciloscópio, obtenha a figura de Lissajous correspondente à composição dos dois sinais e calcule o ângulo de defasagem. Compare-o com o calculado no item anterior.
- e) Repita o procedimento do item a até o item d para os seguintes pares de RC:

$$R = 8,2 \text{ k}\Omega \quad C = 1,0 \text{ }\mu\text{F}$$

$$R = 3,3 \text{ K}\Omega \quad C = 1,0 \text{ }\mu\text{F}$$

$$R = 3,3 \text{ K}\Omega \quad C = 0,4 \text{ }\mu\text{F}$$

(Use portanto a década de capacitores.)

- f) Preencha a tabela 2 no item 6.

- g) Com a relação $\text{sen}\phi = \frac{2a}{2b}$ calcule $\text{sen}\phi$ e ϕ completando a tabela 2.

5 – FOLHA DE DADOS

TABELA 1

R_i	$R (\Omega)$	$T (s)$	$F (Hz)$	osciloscópio		voltímetro
				V_{pp}	V_{ef}	V_{ef}
R_1						
R_2						

TABELA 2

$C1$ (μF)	$R1$ ($k\Omega$)	Valores medidos		Defasagem		T_d	T_s	V_c	V_s
		2 a	2 b	$sen\phi$	ϕ				
0,1	8,2								
1,0	3,3								
0,4	3,3								
1,0	8,2								

6. QUESTÕES

- Qual o procedimento para se obter uma figura de Lissalous em um osciloscópio?
- Por que foi necessário desligar a varredura do osciloscópio?
- O que é defasagem?
- Quais as vantagens de se usar o osciloscópio como voltímetro?
- Se variarmos o seletor a frequência da onda variará?
- Se variarmos o atenuador vertical a tensão pico a pico variará?
- Pode-se medir a corrente com o osciloscópio? Em que caso?
- Quantas divisões um sinal senoidal ocupará na tela se a tensão eficaz for 120 V e a escala for 50 V/div?
- Um sinal de 560 KHz é observado num osciloscópio. O sweep marca 0,5 ms/div. Quantas divisões ocupa um ciclo desse sinal?
- Prove que, quando a diferença é de 0° ou 180° , a figura de Lissajous é uma reta.
- Que aplicações têm, na vida prática, as figuras de Lissajous?

CAPÍTULO - VIII

1 - CURVA DE HISTERESE

2. OBJETIVOS:

Possibilitar o entendimento de fenômenos que ocorrem em materiais magnéticos, bem como familiarizar o aluno com as grandezas físicas envolvidas e mostrar a importância do estudo do fenômeno de Histerese em um núcleo de transformador.

3. INTRODUÇÃO TEÓRICA

3.1. Introdução

Desde a antiguidade que o homem conhece os materiais magnéticos. Apesar disso não faz muito tempo que ele aprendeu a utilizar esses fenômenos em benefício próprio. A utilização desses fenômenos só foi possível a partir de conhecimentos físicos e matemáticos agrupados que originaram a teoria eletromagnética hoje existente.

Importantes quantidades físicas como Campo Magnético (H), Densidade de Fluxo Magnético (B) e Permeabilidade Magnética foram estabelecidas e a partir daí grandes passos tecnológicos foram tomados. Hoje são utilizados materiais magnéticos em uma grande quantidade de utilitários e por isso é importante o conhecimento desses materiais para propiciar o contínuo desenvolvimento tecnológico de que o mundo necessita.

O Laço de Histerese ou curva BxH é um importante dado a ser obtido para o conhecimento dos materiais magnéticos. A determinação dessa curva torna-se imprescindível em qualquer aplicação e o seu conhecimento é vital para engenheiros, físicos e estudiosos de outras áreas.

3.2 - Materiais Ferromagnéticos

À temperatura ambiente, o ferromagnetismo manifesta-se em metais como: ferro, cobalto, níquel, gadolínio, disprósio e em ligas destes metais entre si e com outros metais. Nestas substâncias, a aplicação de um campo magnético externo pode provocar um alto grau de alinhamento nos momentos atômicos, que pode permanecer mesmo na ausência do campo magnetizante. Este fenômeno ocorre porque os dipolos magnéticos atômicos destas substâncias exercem fortes forças sobre os seus vizinhos, de modo que sobre uma pequena região do espaço chamada **domínio**, os momentos

ficam alinhados paralelamente, mesmo na ausência de campo magnético externo. Estas interações entre os dipolos são previstas pela mecânica quântica e não têm uma explicação clássica. Acima de certa temperatura, a **temperatura de Curie**, estas forças desaparecem e a substância ferromagnética torna-se paramagnética com momento magnético resultante nulo.

Sabe-se, da Teoria Eletromagnética, que a Densidade de Fluxo Magnético ou Indução Magnética B está diretamente relacionada com a intensidade de campo magnético H aplicado, pela seguinte equação:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (1)$$

onde μ é a permeabilidade magnética do meio em questão. O fato é que em alguns materiais, denominados de materiais ferromagnéticos, μ não é uma constante, ou seja ela depende do valor de H. Ora, se μ depende de H então é de se esperar que o gráfico B x H não seja uma reta, o que é de fato uma realidade. Então é necessário saber o comportamento dessa curva para poder, por exemplo, construir um núcleo de transformador.

A explicação para este fato está associada ao material em questão. Os materiais ferromagnéticos têm a propriedade de influenciar o campo magnético envolvido, causando uma indução magnética muito maior do que aquela produzida pelo campo. No vácuo o valor de B é dado por:

$$\vec{B}_{\text{vácuo}} = \mu_0 \cdot \vec{H} \quad (2)$$

Para um ferromagneto com o mesmo campo H aplicado o valor será:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}) \quad (3)$$

onde, M é chamado vetor de Magnetização do material.

O fenômeno descrito acima pode ser estudado colocando-se o material ferromagnético no interior de um solenóide e aumentando-se gradualmente a corrente elétrica nas espiras. Admitindo-se que o solenóide é suficientemente longo para se desprezar os efeitos terminais, o campo magnético **H** no centro do solenóide está relacionado à corrente por

$$H = nI \quad (4)$$

onde n é o número de espiras por unidade de comprimento e I a corrente elétrica. A indução magnética **B** é dada pela equação (3) e pode ser medida, por exemplo, usando-se uma bobina secundária enrolada em torno do material ferromagnético dentro do solenóide. A figura 8.1 mostra o gráfico de B contra H. À medida que H aumenta, a partir de zero, B aumenta, também a partir de zero, seguindo, a princípio,

um crescimento linear e a seguir um aumento rápido e finalmente ocorre um nivelamento em que qualquer aumento adicional de H não provoca mais aumento em B . O material atinge um estado de **saturação**. Esta curva se chama **curva de magnetização**. Quando H diminui, a curva de magnetização não se retrai e B cai mais lentamente do que na subida. Quando $H = 0$, a indução B não é zero e tem um valor que se chama indução **remanente** B_r ; o material ferromagnético se tornou assim permanentemente magnetizado e os ímãs permanentes usados na prática (autofalantes, motores, etc.) são feitos desta forma. Invertendo a corrente no solenóide, de modo a inverter a direção do campo H , a indução B diminui gradualmente até atingir zero. O valor de H necessário para reduzir B a zero é o campo **coercitivo** H_c . A partir deste ponto para valores de H cada vez maiores neste sentido uma outra curva de magnetização é traçada em sentido inverso até atingir a região saturação. Aumentando-se H desde H_{min} até H , obtém-se um outro ramo da curva de magnetização; a curva completa se chama ciclo de **histerese**.

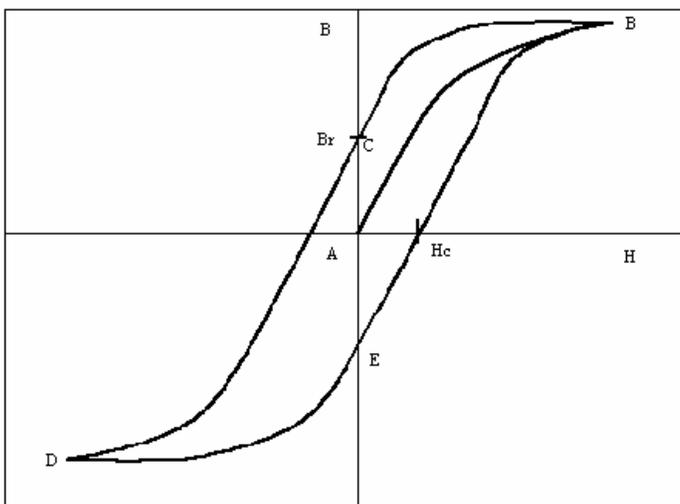


Figura 8.1: Curva de indução magnética (ab) e ciclo de histerese (bcdeb) para uma amostra ferromagnética.

Se examinarmos detalhadamente uma curva de magnetização (ab) podemos observar que o aumento de B com H se faz de uma maneira especial: superposto ao aumento geral de B existem flutuações internas no campo, produzindo saltos na indução magnética B (figura 8.2); este efeito se chama **efeito Barkhausen**.

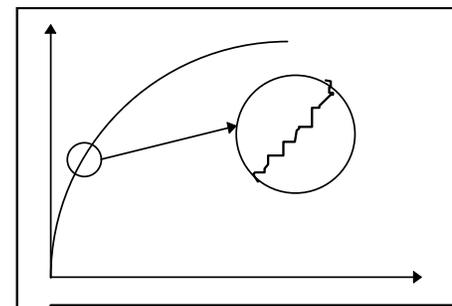


Figura 8.2: Curva de indução magnética, mostrando o efeito Barkhausen

A explicação para o comportamento descrito acima pode ser dada em termos de estrutura de **domínios**. Os materiais ferromagnéticos são constituídos de muitos **domínios** e em cada um deles os momentos magnéticos estão alinhados no mesmo sentido. Num material desmagnetizado, diferentes domínios apontam em diferentes direções, distribuídas ao acaso, produzindo assim um momento magnético total nulo (Figura 8.3).

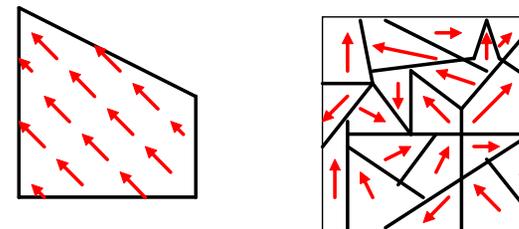


Figura 8.3: Estrutura de domínios de um material ferromagnético

Entretanto, quando aplica-se um campo externo a este material, todos os domínios tendem a alinhar-se na direção do campo. Isto implica movimento dos domínios e, portanto, dispêndio de energia. Esta é a origem do efeito Barkhausen; as pequenas flutuações na curva de indução magnética são devidas ao movimento das paredes de domínios. Além disso, as curvas de histerese são devidas ao fato de que após atingir a saturação os domínios e microcristais estão totalmente alinhados e se diminuirmos o campo externo eles não vão se desorganizar completamente, sendo necessário uma força coerciva para desalinhá-los completamente.

3.3. Descrição da Técnica de obtenção do Laço de Histerese

Basicamente, a construção da curva BxH se obtém a partir das medidas de valores de B a partir de valores de H aplicados ao material. Contudo, medir valores de B e H diretamente torna-se muito difícil, já que estas duas grandezas podem variar muito, tanto no espaço como no tempo. Apesar disso, essas grandezas estão intimamente correlacionadas com outras duas grandezas facilmente medidas: Corrente e Tensão. A idéia então seria a de montar um circuito que se pudesse obter essas grandezas e depois relacioná-las com as grandezas desejadas. Assim, uma boa idéia seria o circuito como mostrado abaixo:

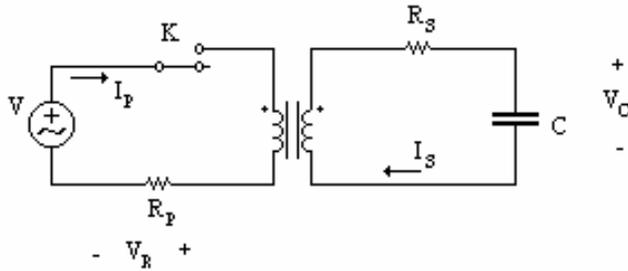


Figura 8.4 - Circuito para obter a curva B x H

A partir da obtenção de $V_r(t)$ e $V_c(t)$ pode-se traçar uma curva, semelhante a curva de histerese, porém não correspondente a mesma. A curva de histerese seria então obtida multiplicando-se a curva V_c x V_r pelos devidos fatores de escala obtidos no item posterior.

O bom funcionamento desse circuito é devido ao seguinte: a tensão alternada V faz com que haja, no enrolamento secundário do transformador uma tensão induzida proporcional a taxa de variação de B no núcleo do transformador. Dessa forma, para a obtenção de B bastaria um circuito integrador, o que é feito pelo capacitor. Assim, sem fazer nenhum cálculo já se sabe que a tensão V_c está relacionada com B .

Por outro lado, a tensão V_r está diretamente relacionada com o campo H , já que tanto H como V_r dependem da corrente I_p . Basta então agora determinar essas duas relações necessárias. Outra vantagem desse circuito é que ele pode ser utilizado tanto para núcleos já magnetizados, como para aqueles ainda não magnetizados, já que a repetição periódica da tensão alternada tende a estabilizar o processo de

magnetização, tornando este um ciclo periódico, não importando se já havia magnetismo residual.

3.4. Análise do circuito utilizado para obtenção de relações importantes

a) Determinação de B

Pela Lei de Faraday:

$$v_s = -\frac{d\phi}{dt}; \quad (05)$$

mas como

$$\phi = N_s \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Considerando B constante em relação a S , obtém-se:

$$\phi = N_s B S$$

Substituindo na equação 05 :

$$v_s = -N_s \cdot \frac{d(B \cdot S)}{dt}$$

$$v_s = -N_s \cdot S \cdot \frac{dB}{dt}$$

Integrando ambos os membros:

$$\int v_s \cdot dt = -N_s \cdot S \cdot \int \frac{dB}{dt} \cdot dt$$

$$B = -\frac{\int v_s \cdot dt}{N_s \cdot S}$$

Aplicando a Lei de Kirchoff ao circuito do secundário, tem-se:

$$v_s - v_c - R_s \cdot i_s = 0$$

$$v_s = v_c + R_s \cdot i_s$$

$$\int v_s \cdot dt = \int v_c \cdot dt + R_s \cdot \int i_s \cdot dt$$

$$\int v_s \cdot dt = \int v_c \cdot dt + R_s \cdot C \cdot \frac{1}{C} \cdot \int i_s \cdot dt$$

$$\int v_s \cdot dt = \int v_c \cdot dt + R_s \cdot C \cdot v_c \quad (06)$$

Analisando o primeiro termo do lado direito da equação 06, observa-se que, se v_C é da forma:

$$v_C = v_{C0} \cdot \text{sen}(w.t + \theta)$$

O que de fato é, já que a fonte do circuito tem essa forma, então esse termo deve ser o seguinte:

$$\int v_C dt = v_{C0} \cdot \frac{1}{w} \cdot \text{sen}(wt + \theta + 90^\circ) = v_{C0} \cdot \frac{T}{2\pi} \cdot \text{sen}(wt + \theta + 90^\circ)$$

Observando bem esse termo e a equação 06, chega-se a conclusão que ele será desprezível quando:

$$T \ll R_S \cdot C$$

Assim:

$$B(t) = -\frac{R_S \cdot C}{N_S \cdot S} \cdot v_C(t) \quad (07)$$

b) Determinação de H

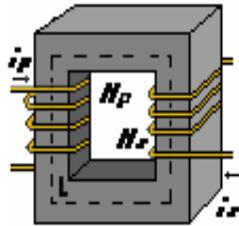


Figura 8.5- Transformador

Utilizando a Lei Circuital de Ampère:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$$

Considerando H como constante em todo o percurso:

$$H \cdot l = N_p i_p + N_s i_s$$

$$H = \frac{N_p i_p + N_s i_s}{l}$$

Considerando ainda um transformador ideal onde a relação abaixo é válida:

$$i_s = \frac{N_s}{N_p} \cdot i_p$$

Então,

$$H = \frac{N_p \cdot i_p + \frac{N_s^2}{N_p}}{l} = \frac{\left(N_p + \frac{N_s^2}{N_p}\right) i_p}{l} = \frac{\left(\frac{N_p^2 + N_s^2}{N_p}\right) i_p}{l}$$

Pela Lei de Ohm aplicada a R_p :

$$v_r = R_p \cdot i_p \quad \Rightarrow \quad i_p = \frac{v_r}{R_p}$$

$$\Rightarrow H(t) = \frac{\left(\frac{N_p^2 + N_s^2}{N_p}\right)}{l \cdot R_p} \cdot v_r(t) \quad (08)$$

No caso de $N_p \gg N_s$ então:

$$\Rightarrow H(t) = \frac{N_p}{l \cdot R_p} \cdot v_r(t) \quad (09)$$

Tem-se então as duas equações necessárias para as relações entre B e v_C , e H e v_r .

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1- Material necessário

- Transformador Leybold - Várias saídas;
- Prancheta de ligação;
- Resistores (5W e 1KW);
- Capacitor de 100mF;
- Chave simples;
- Osciloscópio

4.2- Procedimento

- a) Monte o circuito da figura 8.4 tendo o cuidado de manter a chave K aberta e utilizando a própria rede ($V=220V$) como fonte de tensão alternada;
- b) Com a utilização do osciloscópio, obtenha as curvas $v_r(t)$ e $v_C(t)$
- c) Faça um esboço das duas curvas;

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

- a) Transcreva os pontos das curvas de $V_r(t)$ e $V_c(t)$ obtidas no osciloscópio para o papel milimetrado. Use as equações 3 e 5 e trace um gráfico de $B \times H$. c) determine B_r e H_c da curva acima.
- b) Determine a permeabilidade relativa μ do material em todos os pontos da curva que você traçou acima e faça um gráfico de $\mu \times H$.
- c) Coloque o sinal $V_r(t)$ na entrada horizontal X (ou externa para o Osciloscópio de 1 canal) e $V_c(t)$ na vertical Y. Gire a chave seletora de ganho de tempo para posição XY e observe a forma da curva obtida. Ajuste a chave seletora de ganho vertical de modo a obter uma curva análoga aquela da figura 8.1. Esta é uma curva de histerese onde os eixos ordenados e coordenados estão em volts.
- d) Obtenha visualmente no mínimo vinte pontos da curva de histerese acima e repasse-a para papel milimetrado.

X										
Y										

- g) Traçando uma reta entre a origem e o ponto de saturação, determine um valor médio para a permeabilidade relativa do material. Compare-o com os valores obtidos no item anterior.
- h) Indique algumas fontes de erro nesse método de obtenção da curva $B \times H$.

5. QUESTÕES:

- a) Explique porque um ímã permanente atrai objetos não magnetizados, como pregos, por exemplo.
- b) Um núcleo toroidal de material ferromagnético com raios internos de 5 cm e 6 cm, respectivamente, é enrolado com 400 espiras. (1) Qual deve ser o valor da corrente no enrolamento para se obter um campo de $2 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$? (2) Enrolando-se no toróide uma bobina secundária de 50 espiras e resistência de 8Ω , qual a corrente nesta bobina se $B_M = 800 B_0$, depois que se liga a corrente no primário?

CAPÍTULO – IX

1. CIRCUITOS LR e LRC

2. OBJETIVOS

Verificar a dependência temporal da corrente durante os processos de “carga” e “descarga” (no indutor) num circuito LR.

3. INTRODUÇÃO TEÓRICA

3.1 - O Indutor

Vimos no estudo do circuito RC que o capacitor é um elemento de circuito que armazena cargas em suas placas, ou seja, simplesmente o capacitor armazena energia no campo elétrico existente entre essas placas. Qual seria então o elemento de circuito que poderia armazenar energia em um campo magnético?

A resposta para a questão acima é um elemento chamado Indutor. Sabemos que quando uma corrente percorre um fio condutor provoca a existência de um campo magnético a sua volta. Este por sua vez pode ser confinado a uma região do espaço dependendo da maneira como colocamos os fios condutores. Algumas configurações que confinam o campo magnético em seu interior são mostradas nas figuras abaixo:

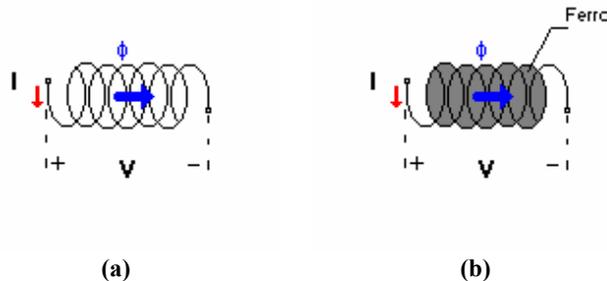


Figura 9.1- Indutores mais comuns

Analogamente ao capacitor, encontramos no indutor relações matemáticas importantes para o estudo desses elementos de circuito elétrico. As mais importantes para a nossa experiência estão mostradas abaixo:

$$\text{Indutância} \quad L = \frac{\phi}{I} \quad (01)$$

onde L é um valor que depende das características físicas do indutor e do meio em questão. Sua unidade no SI é o Henry (H) e seu seus submúltiplos em potência de 10 como o mH e o μH .

A figura 9.1b mostra um indutor com núcleo de ferro. Em algumas aplicações praticas introduz-se um material diferente do ar para aumentar a indutância. Materiais como o ferro e suas ligas especiais confinam quase que totalmente o fluxo magnético ao interior do indutor, aumentando sua indutância por um fator da ordem de 1000.

Veremos mais tarde, quando comprovarmos experimentalmente a Lei de Faradey, que ela relaciona a variação do fluxo magnético com uma tensão induzida, ou seja:

$$V = -\frac{d\phi}{dt} \quad (02)$$

Não iremos nos prender a essa equação por enquanto. Interessa-nos apenas encontrar uma relação entre a tensão e a corrente no indutor, pois são essas as grandezas de interesse nos circuitos elétricos. Assim, de 01 e 02:

$$\phi = L.I \Rightarrow \frac{d\phi}{dt} = L \cdot \frac{dI}{dt} \\ v = L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (03)$$

Onde: V é a tensão no indutor e I é a corrente que passa pelo mesmo.

Observe que o sinal de menos foi dispensado desde que se observe que assim como acontece com o resistor ou o capacitor, o indutor é um elemento passivo no circuito e assim ocorre uma queda de tensão quando a corrente passa por ele.

3.2 - Circuitos LRC

3.2.1 - Circuitos LR

No estudo dos circuitos RC, vimos que o capacitor sofre processos de carga e descarga. Estes processos foram assim designados, pois cargas elétricas são transferidas entre as placas do capacitor nesses processos. Já no caso dos circuitos LR não temos “cargas magnéticas” sendo transferidas, pois estas não existem. O emprego então das expressões carga e descarga nos objetivos desta experiência foram apenas para evidenciar semelhanças entre os dois tipos de circuitos, apesar das palavras empregadas não representarem bem o processo real.

Vamos então analisar o que acontece em um circuito LR sendo alimentado por uma fonte de tensão contínua. A única observação importante a ser feita é sobre o comportamento do indutor. O indutor é um elemento que não permite uma variação brusca na corrente que passa por ele. Isso pode ser observado matematicamente na expressão 02, pois se ocorresse variação brusca na corrente, haveria uma descontinuidade no gráfico de I em função do tempo, o que levaria a um valor de derivada indeterminado nesse ponto e, portanto, um valor de tensão indeterminado no indutor, o que não pode existir na prática.

Façamos então a análise do circuito da figura 9.2. Aplicando a Lei das Malhas temos:

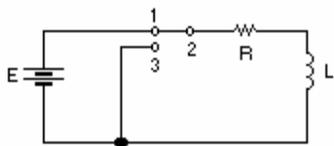


Figura 9.2 - Circuito LR

$$E - R \cdot I - L \cdot \frac{dI}{dt} = 0$$

$$\frac{dI}{dt} + \frac{R}{L} \cdot I = \frac{E}{L}$$

Esta é uma equação diferencial ordinária cuja solução nos fornecerá $I = f(t)$.

Do estudo das equações diferenciais pode ser mostrado que:

$$I = \frac{E}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{L/R}}) \quad (03)$$

Onde foi adotado que em $t=0$ não havia corrente circulando no circuito, pois o indutor não permite mudança brusca na corrente.

Assim como foi definida uma constante de tempo para o circuito RC, também podemos definir uma constante de tempo indutiva como sendo:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (04)$$

Obviamente determinada a corrente no circuito torna-se simples a determinação das tensões no indutor e no resistor, que serão dadas por:

$$V_R = R \cdot I = E \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (05)$$

$$V_L = E - V_R = E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (06)$$

Para melhor visualizar esses resultados (o que pode ser feito com o osciloscópio), consideremos o esboço do gráfico de V_R e V_L :

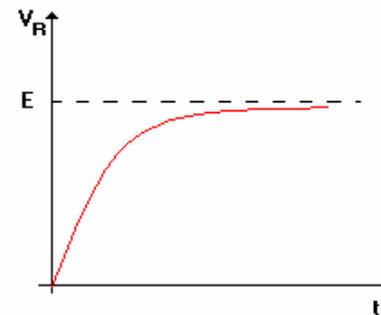


Figura 9.3a

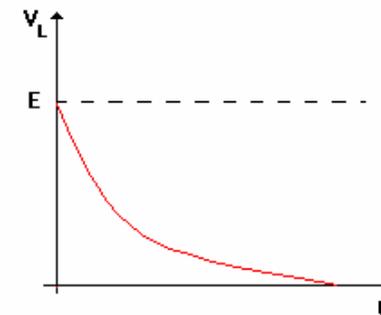


Figura 9.3b

Após um tempo muito longo (idealmente $t \rightarrow \infty$), se mudarmos a chave inversora da posição 1 para a 3, retiramos a fonte do circuito. O indutor então não permitirá a mudança brusca na corrente iniciando então um processo de “descarga” do indutor. Na realidade no período de “carga” o indutor armazena energia no seu

campo magnético e depois devolve essa energia para o circuito de “descarga” fazendo assim que não haja mudança brusca na corrente.

Tomando novamente a equação de malha do circuito (agora sem E):

$$L \cdot \frac{dI}{dt} + R \cdot I = 0 \quad (07)$$

Resolvendo para I:

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (08)$$

onde, I_0 =Corrente no indutor na mudança de chave. No nosso caso $I_0=E/R$.

No processo de descarga, tanto a tensão no indutor igual a quanto a tensão no resistor que fornecerão os esboços apresentados na figura 9.3c, a seguir.

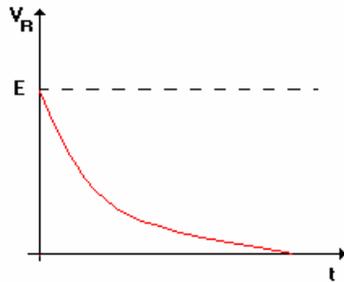


Figura 9.3c

Tabela 01- Resumo das equações formuladas para o circuito RL

	Tempo	“Carregamento”	“Descarregamento”
Corrente	Geral	$I = \frac{E}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$	$I = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$
	t = 0	$I = 0$	$I = I_0$
	t → ∞	$I = \frac{E}{R}$	$I = 0$

3.2.2 - Circuitos LRC

Os circuitos osciladores são de importância fundamental em aplicações tecnológicas atuais, variando de sintonizadores, ressoadores, filtros de frequência e outras aplicações. Os circuitos RL e RLC estão entre aqueles que são a base para tais aplicações.

O surgimento de oscilações num circuito RLC simples podem ser explicado da análise da figura a seguir:

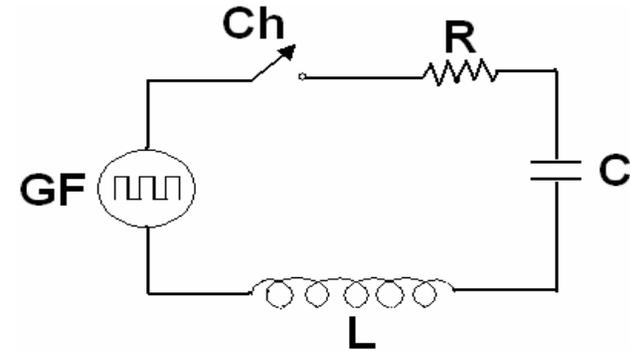


Figura 9.4

Pela Lei das malhas, temos:

$$R \cdot I + \frac{q}{C} + L \cdot \frac{dI}{dt} = 0 \quad (08)$$

derivando a equação (09) em relação ao tempo, usando $I = \frac{dq}{dt}$ e re-arranjando seus termos, ficamos com

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dI}{dt} + \frac{1}{LC} I = 0 \quad (10)$$

Cuja solução é dada por:

$$I(t) = I_0 e^{-\gamma t} \text{sen}(\omega' t + \phi) \quad (11)$$

Logo, a tensão no resistor será dada por:

$$V_R(t) = Ee^{-\gamma t} \text{sen}(\omega' t + \phi) \quad (12)$$

Onde: $\gamma = \frac{R}{2L}$ e $\omega' = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$

O termo $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ é a frequência natural de oscilação do circuito (não amortecida), de forma que $\omega' = \sqrt{\omega^2 - \gamma^2}$ é a frequência de oscilação do circuito e γ é o fator de amortecimento do circuito.

A equação 11 é a conhecida equação de oscilações forçadas e ela descreve apropriadamente o amortecimento, no tempo, das oscilações do circuito RLC. Ela é análoga a equação que fornece o deslocamento de uma massa em função do tempo num movimento harmônico amortecido.

Observamos que a frequência ω' é estritamente menor do que ω . Convém ainda notar que quando $\omega \gg \gamma$, a equação 10 apresenta soluções oscilantes amortecidas.

Por outro lado, quando $\omega = \gamma$, temos $\omega' = 0$. Neste caso, o circuito deixa de oscilar e atingimos a condição necessária para a ocorrência de uma *ressonância*.

Nos nossos experimentos com circuitos RLC, trataremos apenas de casos em que o valor de R é tão pequeno, de forma que possamos considerar $\omega' = \omega$ para a frequência de oscilação, sem cometer erros apreciáveis. Este procedimento nos permite observar a existência de um maior número de oscilações no circuito.

A literatura é rica na descrição de circuitos ressonantes e suas aplicações. Para uma discussão simples, o aluno pode consultar o Halliday-Resnick, Vol II, Eletromagnetismo.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. MATERIAL UTILIZADO

- Indutor de L=11,0 mH;
- Chave simples S;
- Gerador de funções GF;
- Osciloscópio Peak Tech, modelo 2020GN 20MHz

- Década de Capacitores;
- Década de Resistores;
- Placa de Circuitos.

4.2 - CIRCUITOS RL

4.2.1 - Procedimento

Como foi visto anteriormente, a constante de tempo do circuito RL é o quociente entre a indutância L e a resistência R. Contudo, para se observar o comportamento da corrente ao mudarmos as chaves no circuito da figura 9.2 seria necessário ou uma indutância muito alta ou uma resistência muito baixa. Para verificar isso, considere um valor de $\tau=10s$ e calcule os valores de R e L necessários utilizando, respectivamente, os valores de L e R disponíveis na sua bancada.

O que pode ser feito para solucionar este problema é utilizarmos um gerador de onda quadrada que simulará o chaveamento rápido necessário no circuito. Podemos então utilizar o osciloscópio para observar o comportamento das tensões no circuito. Assim, proceda da seguinte maneira:

1. Monte, na sua bancada, o circuito da figura a seguir:

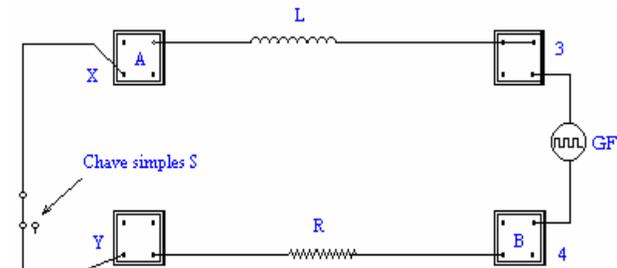


Figura 9.5

cujo circuito equivalente é:

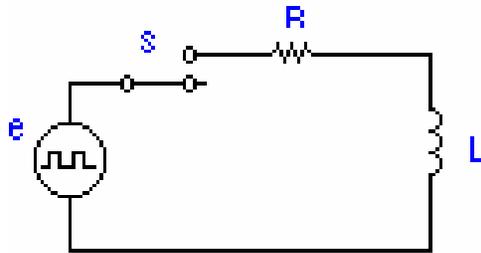


Figura 9.6

2. Utilize $R=100\ \Omega$ e, após a aprovação do professor, ligue o gerador e ajuste-o para que forneça $2V_{pp}$ e 3 KHz.
3. Ligue a chave S, meça com o osciloscópio e anote as formas de carga e descarga do indutor e da tensão do resistor.
4. Troque R pelo resistor de 1 K Ω e repita o procedimento do item anterior.

4.3 - CIRCUITOS RLC

4.3.1 - Procedimento

1. Monte o circuito da figura 9.7, cujo circuito equivalente é dado na figura 9.4. Utilize os valores de $R=100\Omega$, $L=11\text{mH}$, $C=0,01\mu\text{F}$ e $GF=1\text{kHz}$.
2. Meça o período das oscilações e calcule sua frequência. Compare o valor obtido com aquele calculado pela equação para ω' no resistor.
3. Varie lentamente e individualmente os valores de R e C. No osciloscópio, observe os efeitos dessa variação no sinal capturado no resistor (amplitude, frequência, amortecimento) e compare com as equações para γ e ω' . Discuta os resultados.

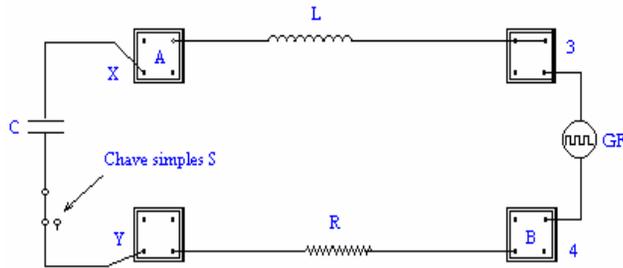


Figura 9.7

5. QUESTÕES

1. No circuito abaixo, ao desligarmos a chave S, haverá um faiscamento entre seus contatos. Por que?

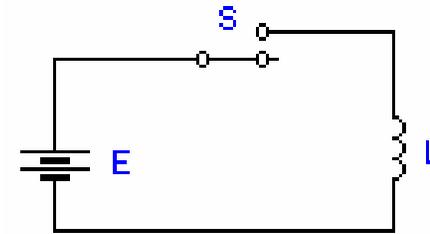


Figura 9.8

2. Por que o circuito RL modifica a forma da onda quadrada?
3. Que aplicações pode ter um circuito de carga e descarga de um indutor?
4. Determine a constante de tempo através do gráfico obtido no item 5 do procedimento. Este valor está de acordo com o calculado?
5. Porque as formas de onda são diferentes quando mudamos o valor do resistor em um circuito RL?
6. Explique a diferença entre um circuito oscilante livre e um circuito com oscilação amortecida.
7. Considere um circuito RLC no qual $R=1,5\Omega$, $L=12\text{mH}$ e $C=1,6\mu\text{F}$. Responda:
 - a) Quando tempo deverá se passar para que a amplitude da oscilação se reduza a 50% do seu valor inicial?
 - b) Quantas oscilações ocorreram neste intervalo de tempo?
8. Calcule o valor da resistência R que deve ser conectada ao circuito RLC afim de que a carga máxima do capacitor decresça até 99% do valor inicial em 50 ciclos. Considere $L=220\text{mH}$ e $C=12\mu\text{F}$.

CAPÍTULO X

1. MÁQUINAS ELÉTRICAS

2. OBJETIVOS:

Entender os princípios de funcionamento de uma máquina elétrica utilizando-se das leis de indução eletromagnética.

3. INTRODUÇÃO TEÓRICA:

3.1 - Introdução

O estudo do eletromagnetismo remota do século XIX, onde grandes estudiosos se interessaram pelo assunto e que praticamente foram responsáveis pela revolução tecnológica ocorrida neste século. Desde uma simples lâmpada até a comunicação de dados na internet via fibra ótica, o eletromagnetismo está presente, e daí a importância de estudá-lo para melhor compreender o mundo a nossa volta.

3.2 - As Equações de Maxwell

Muitos estudos importantes foram realizados durante o século passado. O eletromagnetismo estava em “moda”, e muitos pesquisadores, de todas as áreas científicas, se interessaram pelo assunto. Mas, sobretudo, as contribuições de estudiosos como Carl Friedrich Gauss, Heinrich Friedrich Lenz, André Marie Ampère e Michael Faraday foram fundamentais. Este último foi o responsável pela elaboração da Lei de Indução que será amplamente utilizada nesta experiência e que basicamente levou ao uso tão difundido da eletricidade como fonte de energia.

Depois destes estudos, o físico James Clerk Maxwell percebeu que poderia agrupar todos os conhecimentos já formulados e provados em quatro equações que maravilhosamente fechariam toda a teoria já desenvolvida. Estas equações simplesmente uniam de vez os estudos, antes isolados, de eletricidade e magnetismo, que agora compunham um único assunto, mas que era tão abrangente que até hoje suas equações são utilizadas em pesquisas e desenvolvimento tecnológico.

As quatro equações que Maxwell chegou estão colocadas na tabela a seguir, nas formas integral e diferencial:

Equações de Maxwell ¹		
	Forma Integral	Forma Diferencial
01	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q / \epsilon_0$	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$
02	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$
03	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - d\phi_B / dt$	$\nabla \times \vec{E} = - \partial \vec{B} / \partial t$
04	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} + \mu_0 i$	$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}$

Não nos cabe aqui formular um tratado sobre as equações de Maxwell, mas é interessante conhecermos um pouco do significado físico dessas equações, para que elas não se tornem tão aparentemente complicadas pela sua forma matemática.

Para poder termos uma idéia do que sejam essas equações, é necessário que saibamos o que significam fisicamente cada operador matemático empregado nelas. A forma diferencial nos mostra melhor o significado das equações, pois apresentam operadores com significado físico bem definido. Então, por exemplo, a equação 01 nos diz que o divergente da densidade de fluxo elétrico é igual a densidade volumétrica de carga em qualquer ponto do espaço. Ora, a operação divergente, como o próprio nome sugere, significa que naquele ponto algo surge ou chega, daí tiramos a conclusão que onde há densidade de carga, e conseqüentemente cargas, há o aparecimento de densidade de fluxo elétrico e conseqüentemente campo elétrico. Podemos utilizar esse raciocínio para as demais equações, lembrando que a operação rotacional, da equação 03, por exemplo, significa o aparecimento de uma grandeza que tem uma distribuição circular, como o campo magnético em um fio (veremos isso mais tarde).

A importância das equações de Maxwell está curiosamente baseada em sua complexidade matemática. Apesar de ser bastante difícil, em certas situações, aplicá-las, estas equações são a base do desenvolvimento de outras equações mais simples e diretas de serem aplicadas no cotidiano das ciências ou da engenharia. Colocadas sob as formas integral e diferencial podemos, com as devidas condições de contorno, estabelecer leis e equações para diversas situações particulares.

3.3 - Lei de Ampère

A equação 04 apresentada na tabela 01 é uma generalização da lei formulada por Ampère. A Lei de Ampère, inicialmente formulada, considerava que não havia

¹ Note as semelhanças e diferenças existentes entre campo elétrico e campo magnético: observe que o campo elétrico é originado a partir de cargas, enquanto o campo magnético a partir de corrente elétrica. Contudo, só existe carga elétrica. Não existe carga magnética.

relação entre campo magnético e campo elétrico. Por isso, ela se apresentava da seguinte forma:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i \quad (05)$$

É através desta expressão que podemos determinar a disposição da densidade de fluxo magnético \mathbf{B} no espaço para diversas configurações de uso prático como por exemplo um fio percorrido por uma corrente ou uma bobina de corrente.

Não nos cabe aqui apresentar todas as deduções para as configurações de campo magnético para as estruturas práticas que iremos utilizar. Nos deteremos apenas em apresentar os resultados já intensivamente determinados por vários estudiosos e autores. Assim, apresentamos a seguinte tabela:

Configuração	Equação	Figura
Fio fino, retilíneo e infinito percorrido por uma corrente i , com eixo no centro do fio.	$B(r) = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$	1-a
Solenóide ideal (considerado infinito), com N espiras por unidade de comprimento, percorrido por uma corrente i .	$B = \mu_0 \cdot N \cdot i$	1-b
Solenóide finito, com n espiras, percorrido por uma corrente i .	$B = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot i}{2 \cdot R}$	1-c

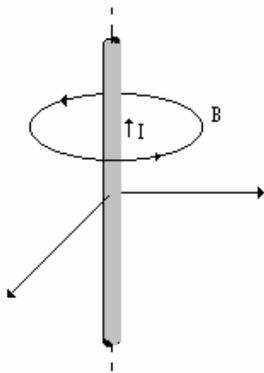


Figura 10.1a

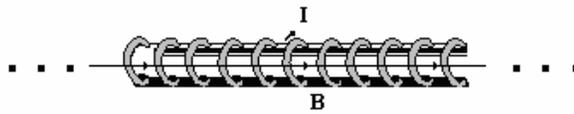


Figura 10.1b

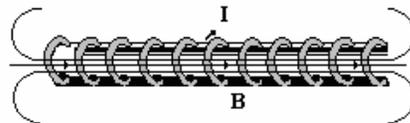


Figura 10.1c

Figura 10.1: campo magnético gerado por; (a) um fio de corrente (b) uma espira infinita (c) uma espira finita

É importante dizer que estas equações representam apenas o módulo de \mathbf{B} . Contudo, a direção de \mathbf{B} pode ser determinada (ou imaginada, dependendo da complexidade da configuração) com auxílio da Regra da Mão Direita, que consiste no seguinte:

Toma-se o polegar direito e aponta-se na direção e sentido da corrente que provoca o aparecimento do campo. Gira-se então a mão de tal forma a manter o polegar na mesma direção. O sentido para onde aponta os outros dedos é o sentido do campo magnético.

Antes de falarmos um pouco sobre a Lei de Faraday, é importante acrescentarmos o comportamento de uma espira de corrente dentro de um campo magnético como mostrado na figura abaixo:

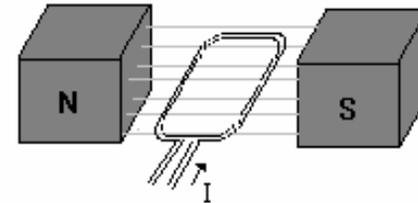


Figura 10.2: espira de corrente na presença de um campo magnético uniforme.

A espira por si só já produz um campo magnético. É de se esperar, então, que haja uma interação entre o campo produzido pela espira e o campo já existente (produzido, por exemplo, por ímãs). De fato, os dois campos tendem a se alinhar e se a espira estiver solta, o que veremos mais tarde na prática ser verdade, esta sofrerá um torque para que haja o alinhamento entre os campos. Esta é uma das conseqüências mais importantes para o estudo das máquinas elétricas, já que se pode perceber a transformação de energia envolvida.

3.4 - Lei de Faraday

A equação 03 da tabela 01 representa a Lei de Indução de Faraday. Como já dito anteriormente, ela é de grande importância, sobretudo na geração de energia elétrica. Escrevendo esta equação sobre a forma de potencial elétrico chegamos:

$$V = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad (06)$$

Onde V representa a diferença de potencial entre dois pontos quaisquer da superfície sobre a qual varia o fluxo de \mathbf{B} .

A importância desta relação está no fato de que se variarmos o fluxo do campo magnético em uma região, iremos produzir uma diferença de potencial. Uma diferença de potencial, como já sabemos implica em energia, e se for bem aproveitada pode, por exemplo, abastecer uma cidade.

Mas como fazemos para variar o fluxo magnético em uma determinada região do espaço? É simples, basta analisarmos um pouco a equação do fluxo magnético:

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int B \cdot dA \cdot \cos(\vec{B}, d\vec{A}) \quad (07)$$

Está claro, por essa relação que existem três formas de se variar o fluxo em relação ao tempo:

- Variar o campo magnético (**B**);
- Variar a área atravessada pelo fluxo;
- Variar o ângulo entre a área e o campo magnético.

Na prática, e iremos ver isso mais adiante, não se varia a área em que o fluxo está atravessando pois os motores e geradores são dimensionados com um certo tamanho fixo e torna-se difícil alterar essa área em plena operação. O valor de **B** também é geralmente fixo e obtido com o uso de ímãs. Resta-nos então variar o ângulo entre **B** e **dA**. Observando a figura 10.2, vemos que isso pode acontecer facilmente se girarmos a espira no campo magnético. O fluxo iria então variar e consequentemente teríamos uma tensão induzida nos terminais da espira.

Mas e o sinal negativo da Lei de Faraday? Este sinal é importante e é consequência de outra lei denominada Lei de Lenz. Esta lei simplesmente afirma, grosseiramente, que a natureza não permite variações sem alguma resposta. De fato, o sinal negativo quer dizer que aparecerá uma tensão induzida que fará oposição a variação do fluxo, de modo que ele não varie abruptamente.

4 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL:

4.1 - Material utilizado

- Bobinas L_1 ($R_1 = 4,1K\Omega$; $n_1 = 10^4$) e L_2 ($R_2 = 1,2K\Omega$; $n_2 = 1,5 \times 10^4$);
- Ímãs;
- Amperímetro demonstrativo Leybold;
- Fonte DC (0 - 30V);
- Placa de circuito;
- Máquina elétrica Leybold;
- Resistor;
- Multiteste Leybold;
- Chave simples;

- Fios para conexão.

4.2 - Procedimento

4.2.a. Verificação das Leis (demonstração)

Lei de Ampère:

a) Montando o circuito da figura abaixo, podemos comprovar a lei de Ampère observando que quando a bobina é percorrida por uma corrente (chave S ligada) a bússola tende a se alinhar com o campo magnético produzido pela corrente.

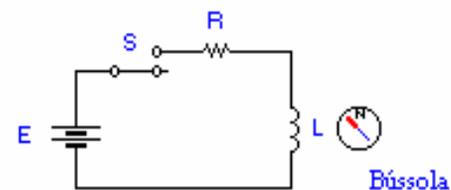


Figura 10.4: Demonstração da Lei de Ampère

Onde:

$E = 20V$

$R = 4,1K\Omega$

L é uma bobina de 10^4 espiras e raio 6,5cm.

b) Podemos também mudar L e observar o que ocorre com a agulha da bússola, bem como inverter a polaridade da fonte e ver o que acontece.

$E = 20V$

$R = 1,2K\Omega$

L é uma bobina de $1,5 \times 10^4$ espiras e raio 2,5cm.

Lei de Faraday:

a) Com o circuito da figura abaixo montado, aproxime um ímã da bobina L e observe o ponteiro do amperímetro.

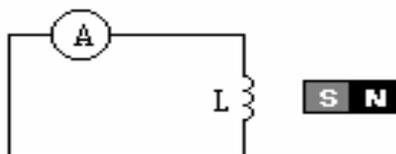


Figura 10.5: Demonstração da Lei de Faraday

- b) Mantenha o ímã em um local fixo e próximo a bobina. Mude o ângulo entre a bobina e o ímã e observe o que acontece ao amperímetro.
- c) Observe a lei de Lenz através desse experimento.

4.2.b. O Gerador

- a) Observe a máquina elétrica, composta por motor e gerador, montada na sua bancada (figura abaixo).

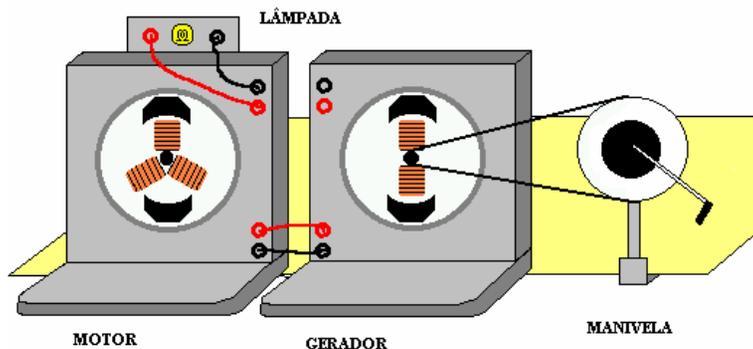


Figura 10.6: motor e gerador

- b) Gire a manivela e observe que a lâmpada acende.
- c) Ligue o multímetro em paralelo com a lâmpada e observe que existe uma f.e.m. induzida de alguns volts nos seus terminais. Meça essa voltagem.

4.2.c. O Motor

- a) Observe a máquina elétrica montada na sua bancada, e pela figura 10.6 identifique o motor.
- b) Veja que o motor não recebe energia de nenhuma fonte externa a não ser o nosso gerador. Gire então a manivela e veja que parte da energia fornecida pelo gerador faz girar o motor.

5. QUESTÕES:

5.1 Verificação das Leis

Explique o significado físico da equação 02 da tabela 01. Qual a implicação mais importante que ela traz quando comparada com a equação 01?

5.2 O Gerador

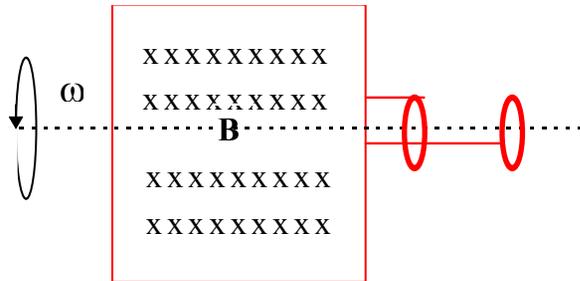
- a) Veja que as polaridades dos ímãs estão invertidas. Explique porque.
- b) Se \mathbf{B} é um campo magnético estático (não varia com o tempo), como se explica o surgimento de uma f.e.m. induzida no item 4.2.b
- c) A que lei do eletromagnetismo aplica-se esta experiência?
- d) Faça uma comparação com o item “a” da Lei de Faraday

5.3 O Motor

- a) A que se deve o movimento do rotor tripolar?
- b) Fale sobre as formas de energia e transformações que são observadas no sistema.
- c) Associe o sistema construído no laboratório (Máquina Elétrica) com o sistema de produção e consumo de energia do seu conhecimento na vida real.

6. EXERCÍCIOS

1) Um gerador de corrente alternada é construída com uma bobina de lado a e N espiras. A bobina está ligada a anéis coletores (figura --) e gira com uma frequência angular ω na presença de uma indução magnética uniforme \mathbf{B} .



- Mostre que a f.e.m induzida que aparece entre os dois anéis coletores é $\varepsilon = N B a^2 \text{sen} \omega t$.
- Se $a = 2 \text{ cm}$, $N = 1000$ e $\mathbf{B} = 2 \text{ T}$, qual a frequência angular ω de rotação da bobina para que a f.e.m máxima seja de $311,127 \text{ V}$?
- Projete uma bobina para a qual a V_{ef} seja 220 V quando girada a 60 ciclos por segundo na presença de uma indução magnética de 5000 Gauss .

2) Encontre uma expressão para o torque sofrido por uma bobina circular de raio r e N espiras percorrendo uma corrente i na presença de uma indução magnética uniforme \mathbf{B} perpendicular ao plano das espiras.