UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – CAMPUS DE RIO CLARO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

LABORATÓRIO DE FÍSICA EXPERIMENTAL

para

Ciências da Computação

Autoria: Prof. Fábio S. de Vicente / Prof. Dante Luis Chinaglia
Curso: Laboratório de Física Experimental – FSI 1907 / FSI 2008
Turma: Bacharelado em Ciências da Computação

2014

Sumário

Experimento Zero **-** Dispositivos de Circuito 03

Experimento 1 – Amperímetro (Parte A) 15

Experimento 2 – Amperímetro (Parte B) 19

Experimento 3 - Voltímetro...25

Experimento 4 - Ohmímetro..29

Experimento 5 – A Lei de Ohm – Associação de Resistores 31

Experimento 6 – A Variação da Resistência com a Temperatura 34

Experimento 7 – Mapeamento de Equipotenciais e Linhas de Força 39

Experimento 8 – A Carga Armazenada por um Capacitor..46

Experimento 9 – Carga e descarga de um capacitor..52

Experimento 10 – Corrente Alternada..58

Experimento 11 – Corrente Alternada (continuação)...67

Experimento 12 – O Osciloscópio..75

Experimento Zero

Dispositivos de Circuito

I - Resistores:

1 - Introdução

Resistores são elementos de circuito empregados para limitar a passagem da corrente elétrica. Podem ainda, ser utilizados como elementos divisores de tensão. Na maioria das aplicações, os resistores atuam de forma passiva, ou seja, mantêm o valor de sua resistência fixa mesmo que ocorram modificações na corrente ou tensão do circuito, ou ainda, qualquer outra condição externa como temperatura, umidade, ou pressão atmosférica. Além da forma passiva, podem atuar de forma ativa em circuitos elétricos modificando seu valor de resistência com a variação de uma determinada grandeza física como, por exemplo, a diferença de potencial (ddp) em seus terminais, a luz sobre ele incidente, etc.

A finalidade para a qual um dado resistor é construído depende basicamente de sua característica construtiva como, por exemplo, o formato, modo de encapsulamento e principalmente do material resistivo empregado. Há uma variedade muito grande de materiais que são empregados na construção dos resistores sendo os mais comuns os metais, o carbono e os óxidos metálicos.

2 - Classificação dos Resistores

2a. Resistores fixos:

Resistores fixos possuem valor de resistência constante, sendo estes os mais empregados nas montagens eletrônicas. Podem ser construídos com fios metálicos, filmes de carbono ou filmes metálico.

2.a.a. Resistores de fio metálico:

Nestes resistores um fio metálico, geralmente uma liga de níquel-cromo ou níquel-cobre, é enrolado sobre um pequeno tubo de porcelana. Para facilitar a conexão deste com o circuito externo dois terminais são fixados nas extremidades do tubo. Finalmente, uma camada de esmalte, resina epóxi, ou silicone, é utilizada para recobrir o sistema, garantido estabilidade mecânica e proteção contra umidade (figura 1). Este tipo de resistor é indicado para situações de alta dissipação de energia ou valores muito exatos de resistências. São pouco indicados para circuitos de corrente alternada, notadamente os que operam em altas freqüências, pois nestas condições podem ser expressivos os valores de sua reatância indutiva.

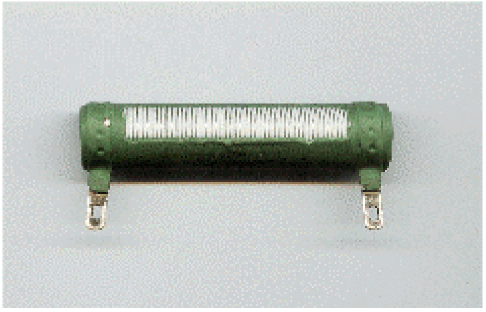


Figura 1 – Resistor de fio metálico.

2.a.b. Resistores de filme de carbono:

Na figura 2 pode-se observar os detalhes construtivos de um resistor de filme de carbono.

Neste tipo de resistor, uma fina camada de carbono é depositada sobre um cilindro de porcelana. Terminais fixados às extremidades deste cilindro possibilitam a ligação deste com o circuito externo. O valor da resistência é ajustado removendo-se, com uma ponta apropriada, parte do filme de carbono depositado. Esta remoção é feita de forma espiral, como se fosse uma rosca, de forma que o valor final da resistência depende do passo da espiral, ou seja, quanto menor este passo, maior será o valor da resistência obtida (figura 3). Durante o processo de fabricação os terminais do resistor são ligados a um ohmímetro, sendo executada a espiral até um valor de resistência pré-determinado. Neste instante o processo é interrompido, o resistor é descartado, um novo resistor é introduzido e o processo reiniciado. Numa outra etapa, o resistor é recoberto com uma camada de esmalte ou resina epóxi. Isso garante que valor da resistência não se modifique por ação de agentes externos, como por exemplo, poeira e umidade. Finalmente, faixas coloridas transversais são pintadas para indicar o valor nominal de sua resistência.

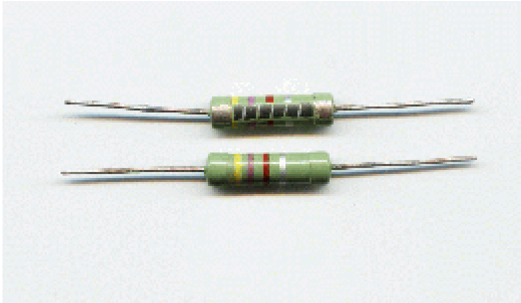


Figura 2 – Resistores de filme de carbono.

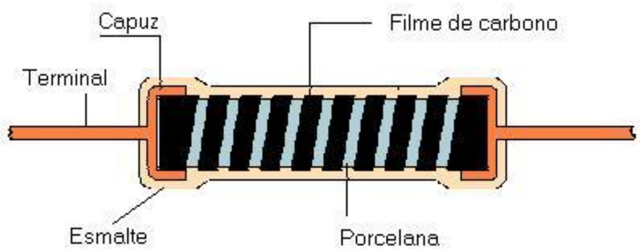


Figura 3 – Detalhes construtivos de um resistor de carbono.

Os resistores de filme de carbono são baratos, compactos e pouco suscetíveis quando empregados em circuitos de corrente alternada. No entanto, são pouco indicados para aplicações de alta potência possuindo ainda baixa estabilidade térmica. A estabilidade dos resistores com a temperatura é dependente do material com o qual o resistor é construído. A maior parte dos materiais, principalmente os metálicos, apresenta aumento de sua resistividade com a temperatura, ou seja, possuem **coeficiente de temperatura (β), positivo**. Entretanto, alguns materiais como os semicondutores, apresentam **coeficiente de temperatura negativo**, isto é, a resistividade destes materiais decresce com o aumento da temperatura. Na figura 4, pode-se observar a dependência da resistência com a temperatura para um resistor de carbono. Note que a temperatura ambiente é ponto de mínimo desta curva. Com isso, para estes tipos de resistores, temos um coeficiente de temperatura positivo para temperaturas superiores a ambiente e um coeficiente negativo para temperaturas inferiores a ambiente.

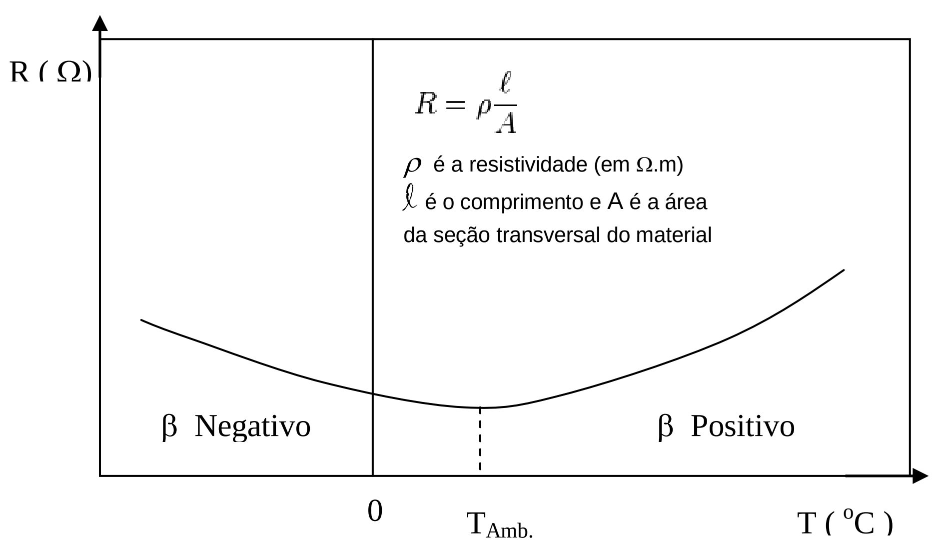
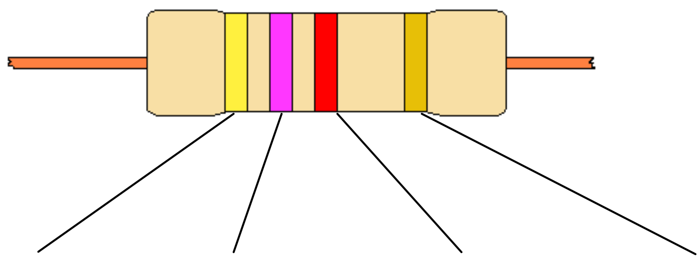


Figura 4 – Característica da resistência com a temperatura para um resistor de filme de carbono.

2.a.c - Determinação dos valores nominais dos resistores de filme de carbono - Código de cores

Os valores nominais dos resistores são determinados através de um código de cores impresso sob a forma de faixas em sua superfície. Os valores nominais possíveis de serem encontrados no mercado são determinados por padrões adotados pelos fabricantes. Estes padrões dependem da tolerância de cada conjunto de resistores e são definidos de forma que haja uma pequena sobreposição de valores entre os vizinhos próximos. Assim, por exemplo, para o padrão E12 utilizado para resistores com tolerância de 10%, resistores vizinhos de 100 Ω e 120 Ω, podem se sobrepor com um valor máximo de (100+10% = 110 Ω e 120-10% = 108 Ω) 2 Ω.



Cor	1º algarismo	2º algarismo	Multiplicador	Tolerância
Preto	0	0	1	-
Marrom	1	1	10	1%
Vermelho	2	2	100	2%
Laranja	3	3	1 000	-
Amarelo	4	4	10 000	-
Verde	5	5	100 000	-
Azul	6	6	1 000 000	-
Violeta	7	7	-	-
Cinza	8	8	-	-
Branco	9	9	-	-
Prata	-	-	0,01	± 10%
Ouro	-	-	0,1	±5%

OBS: As faixas mais próxima da borda do resistor deve ficar sempre do lado esquerdo para se realizar a leitura. A leitura é feita sempre da esquerda para direita.

Resistores de filme metálicos fabricados com tolerância de 1% ou 2% usam freqüentemente 3 faixas coloridas para os algarismos significativos, 1 para o multiplicador e 1 faixa para a tolerância, num total de 5 faixas. Assim, por exemplo, um resistor com as faixas; marrom, vermelho, preto, marrom, marrom, equivale a um resistor de valor nominal de 1,2 kΩ com 1% de tolerância.

2.a.d - Potência dissipada pelos resistores:

A potência máxima que pode ser dissipada pelos resistores depende não somente dos materiais empregados na sua construção, mas também de suas características construtivas. Em geral, resistores de fio metálico são empregados em circuitos que exijam maior dissipação de potência. Além disso, resistores de maiores dimensões podem dissipar maior potência que os menores. É comum a associação do tamanho do resistor com o valor de sua resistência, ou seja, pensa-se que quanto maior o resistor maior será sua resistência. Na verdade, o tamanho ou a forma geométrica de um resistor está associada à potência que este pode dissipar sem sofrer danos. Na figura 5, apresentamos alguns exemplos para os resistores de filme de carbono.

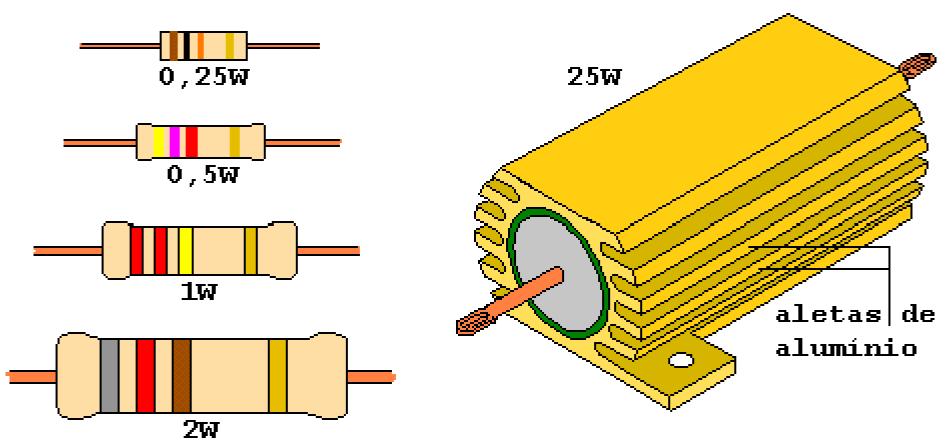


Figura 5 - **Exemplos de resistores com diferentes capacidades de dissipar potência.**

2.b – Resistores Ajustáveis

Resistores ajustáveis são empregados em circuitos em que valores precisos de corrente ou tensão possam ser ajustados e ainda, uma vez obtido o valor desejado não haja necessidade de reajustes freqüentes. São conhecidos também como *Trimpot* e, como os resistores fixos, podem ser confeccionados dos mais diversos materiais. Na figura 6, são mostrados os resistores ajustáveis mais comumente encontrados no mercado. O funcionamento destes componentes de circuito baseia-se em um cursor móvel que desliza sobre uma pista de material resistivo, que pode ser um fio metálico enrolado como uma bobina (neste caso chamado de reostato), um filme metálico ou um filme de carbono. Na figura 7, podem-se observar os detalhes internos de um resistor ajustável confeccionado com filme de carbono, *trimpot*.

Figura 6 – Exemplos de resistores ajustáveis.

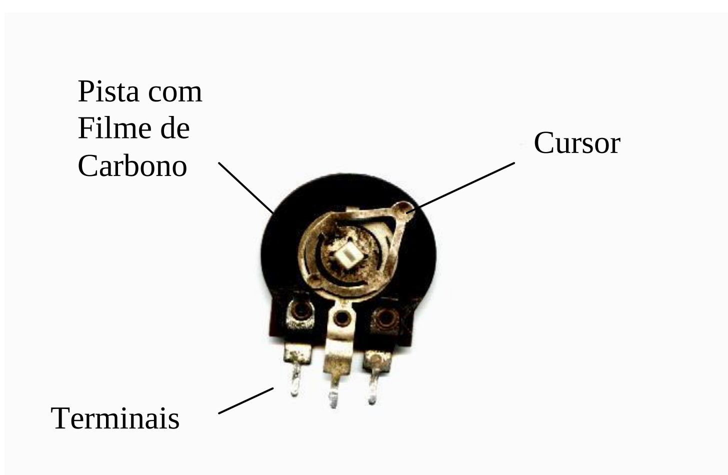


Figura 7 – Detalhes construtivos de um resistor ajustável.

2c - Resistores Variáveis

Resistores variáveis, também chamados de potenciômetros, são empregados em circuitos que necessitem freqüentes ajustes de corrente ou tensão. Construtivamente são muito parecidos com os resistores ajustáveis, como pode ser observado na figura 8. Estes, no entanto, possuem uma haste ligada a seu cursor para a colocação de um botão (knob) e uma porca que possibilita sua fixação em painel. Podem ser ainda lineares (LIN), com variação de resistência proporcional ao deslocamento angular do cursor, ou logarítmicos (LOG) com a variação de sua resistência proporcional ao logaritmo do deslocamento angular.

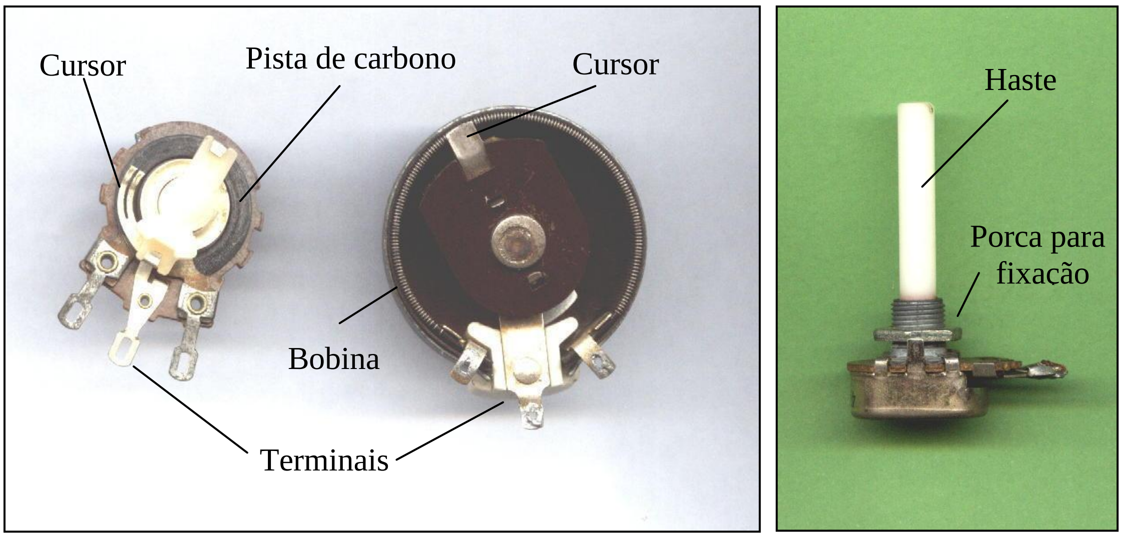
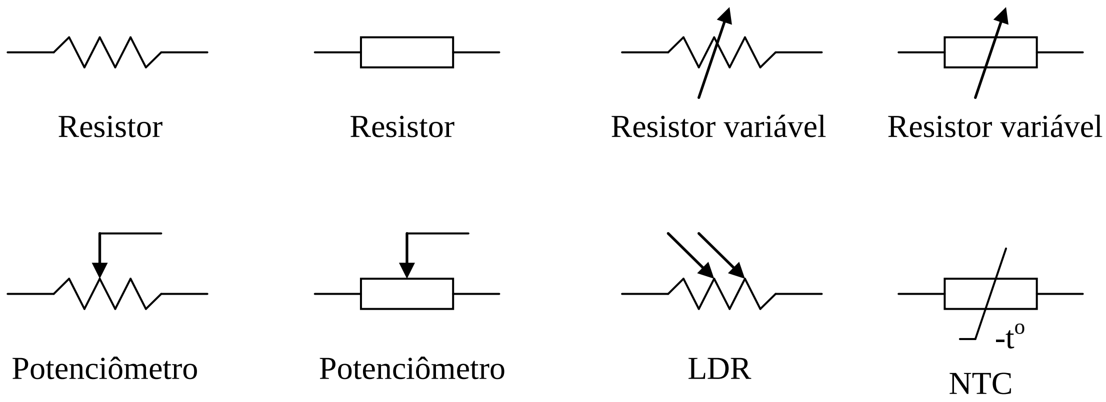


Figura 8 – Detalhes construtivos dos resistores variáveis.

2d - Outros tipos de resistores

Até o momento mostramos alguns exemplos de resistores chamados passivos, ou seja, não modificam sua resistência com a mudança de alguma condição externa ou mesmo interna ao circuito. Existem, no entanto, no mercado uma série de resistores que atuam de forma ativa modificando, por exemplo, sua resistência com a incidência de luz, chamados de LDR (Light Dependent Resistor), com a variação da temperatura, chamados de Termistores (NTC ou PTC (Negative or Positive Temperature Coeficient)), com a variação da ddp em seus terminais, chamados de varistor ou VDR (Voltage Dependent Resistor), etc. Geralmente, estes resistores são construídos com materiais semicondutores.

2e – Simbologia



II - Capacitores

1 - Introdução

Normalmente, definem-se capacitores como elementos de circuito capazes de armazenar carga elétrica. A quantidade da carga armazenada para um capacitor de placas paralelas é diretamente proporcional a área das placas, à constante dielétrica do meio que separa as placas, ao potencial aplicado, e inversamente proporcional à distância entre as placas (A relação entre a área, a distância e o material dielétrico entre as placas é definida como capacitância). No entanto, em muitas aplicações práticas, essa característica pode estar associada a outras que dependem do modo como o capacitor é utilizado. Como veremos no decorrer deste curso, capacitores empregados em circuitos de corrente alternada apresentam reatância capacitiva, ou seja, oposição à passagem da corrente, que depende da freqüência do sinal utilizado. Além disso, modificam a fase entre o sinal da corrente e da tensão no circuito, alterando a potência dissipada no mesmo. Essas características conferem aos capacitores uma grande variedade de aplicações, como por exemplo, em filtros e sintonizadores de sinais.

2 - Classificação dos Capacitores

Como os resistores, os capacitores podem ser classificados em: Fixos, Ajustáveis e Variáveis. Cada uma dessas classes pode ser subdividida em outras subclasses, quando se leva em consideração o material utilizado como dielétrico.

2.a – Capacitores Fixos

Como nos resistores, os capacitores fixos são a grande maioria destes elementos de circuito. Construtivamente são muito parecidos entre si, tendo como diferença básica o material utilizado como dielétrico. Assim, como exemplos mais importantes destes temos:

Capacitores de Cerâmica: Possuem dielétrico de cerâmica. Caracterizam-se por apresentar baixos valores de capacitância e altos valores de tensão nominal.

Capacitores de Poliéster: Possuem dielétrico de Poliéster (polímero, Poli-(estireno)). Apresentam valores de capacitância intermediários e altos valores de tensão nominal.

Capacitores Eletrolíticos: O dielétrico é um eletrólito especial de alto valor de constante dielétrica. Capacitores feitos destes materiais apresentam altos valores de capacitância e baixos valores de tensão nominal. Diferente dos anteriores, estes apresentam dimensões relativamente grandes e são restritivos quanto à polaridade em seus terminais, ou seja, existe polaridade definida para cada terminal.

Capacitores de Tântalo: Possuem dielétrico com altíssima constante dielétrica sendo por isso muito pequeno e de altos valores de capacitância. Como os eletrolíticos são restritivos quanto à polaridade de seus terminais.

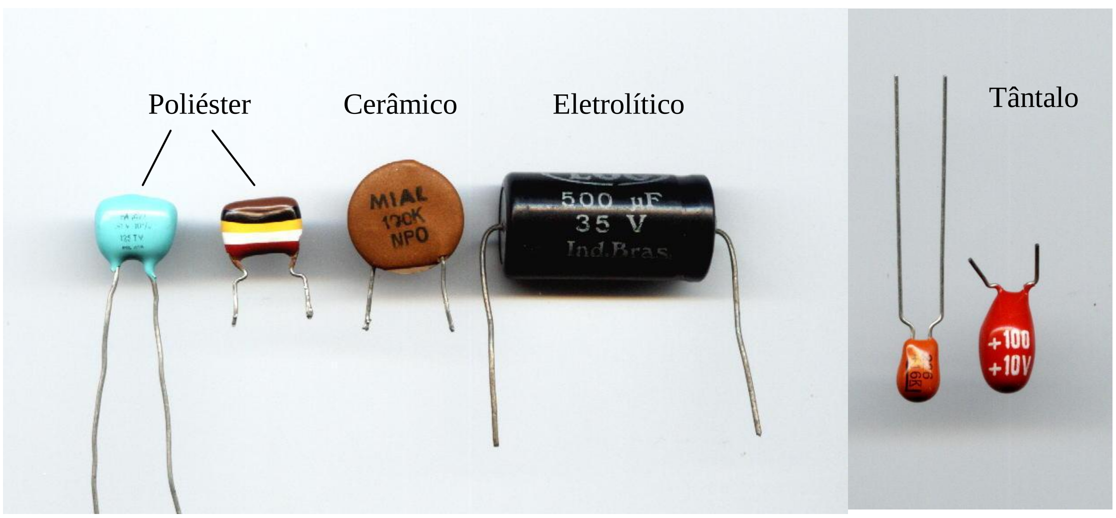


Figura 9 – Exemplos de capacitores Fixos.

2.b – Capacitores Ajustáveis:

Capacitores ajustáveis são muito incomuns nos dias atuais. No entanto, podem ser encontrados em algumas aplicações muito especiais. Estes são construídos com placas paralelas de distância ajustável. Assim, girando-se um pequeno parafuso, pode-se ajustar a distância entre as placas e conseqüentemente, a capacitância do sistema. Pode-se ainda, introduzir um material dielétrico entre as placas (como por exemplo, mica) para evitar o contato entre elas e ainda aumentar a capacitância do sistema. Estes capacitores apresentam geralmente baixos valores de capacitância e elevados valores de tensão.

2.c – Capacitores Variáveis:

São, geralmente, construídos utilizando-se dois conjuntos de placas paralelas que se sobrepõem umas as outras pelo movimento de rotação. Estes, em geral, utilizam como dielétrico o ar e por isso apresentam pequenos valores de capacitância. Na figura 10 pode-se observar um exemplo deste tipo de capacitor.

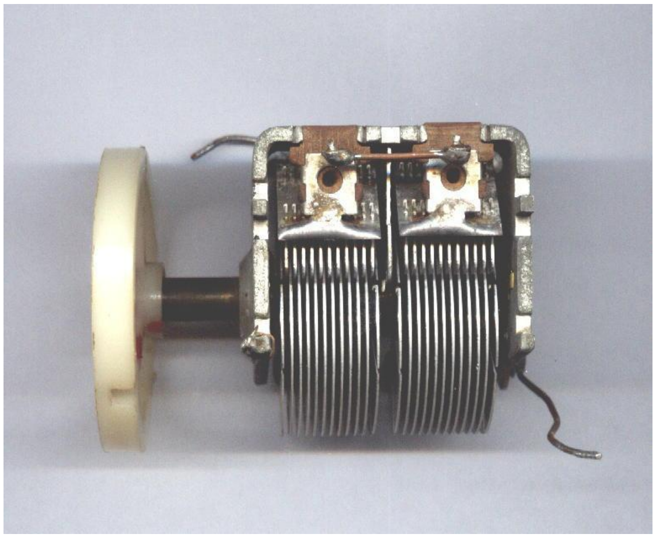
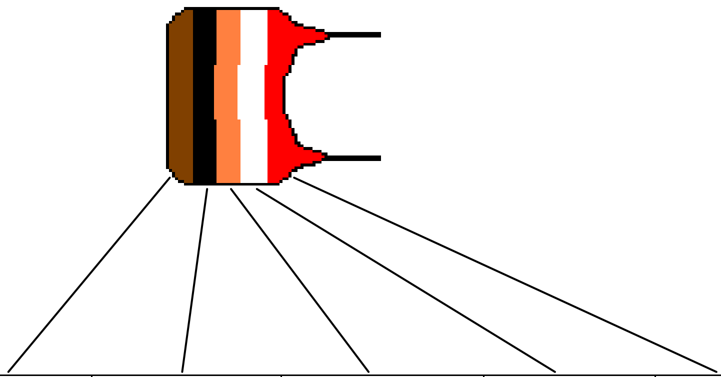


Figura 10 – Capacitor variável de placas paralelas.

Determinação dos valores nominais – Código de cores.

Geralmente, a maior parte dos capacitores apresenta o valor nominal de sua capacitância, tensão máxima de operação e tolerância expressa numericamente sobre sua superfície. No entanto, existem alguns fabricantes que utilizam o código de cores para este fim. Veja na figura a seguir, como proceder para determinar o valor nominal destes capacitores.



Cor	1º algarismo	2º algarismo	Multiplicador	Tolerância	Tensão max.
Preto	0	0	1	± 20%	-
Marrom	1	1	10		-
Vermelho	2	2	100		250 V
Laranja	3	3	1 000		-
Amarelo	4	4	10 000		400 V
Verde	5	5	100 000		-
Azul	6	6	1 000 000		630 V
Violeta	7	7	-		-
Cinza	8	8	-		-
Branco	9	9	-	± 10%	-
Prata	-	-	0,01		-
Ouro	-	-	0,1		-

Obs. Os valores obtidos para os capacitores pela tabela devem ser multiplicados por 10^{-12}, para se obter o valor da capacitância em Farad. Para capacitores comerciais mais comuns este valor será de Microfarad (μF ou 10^{-6} F), Nanofarad (nF ou 10^{-9} F), ou Picofarad (pF ou 10^{-12} F).

Questões

1 - Que funções os resistores podem desempenhar num circuito?

2 – Nas figuras 6 e 8 podemos observar que os resistores ajustáveis e variáveis apresentam 3 terminais. Explique sua utilização num circuito para controle de corrente ou controle de tensão. Ver exemplo da Figura 11.

3 - O que é o coeficiente de temperatura de um resistor?

4 - Como será o coeficiente de temperatura para um resistor construído com fio metálico? E para um construído com material semicondutor? Que propriedade dos materiais está relacionada? (dica: CONDUTORES SEMICONDUTORES e ISOLANTES. Resistividade (ρ) é o inverso de Condutividade (σ)).

5 – Determine, utilizando o código de cores, os valores nominais e a tolerância, para o conjunto de resistores que lhes foi entregue. Determine a potência que pode ser dissipada por cada resistor, comparando sua dimensão com o conjunto padrão do laboratório.

6 – Determine as características nominais dos potenciômetros que lhes foi entregue.

7 – Finalmente determine os valores nominais do conjunto de capacitores que lhes foi entregue.

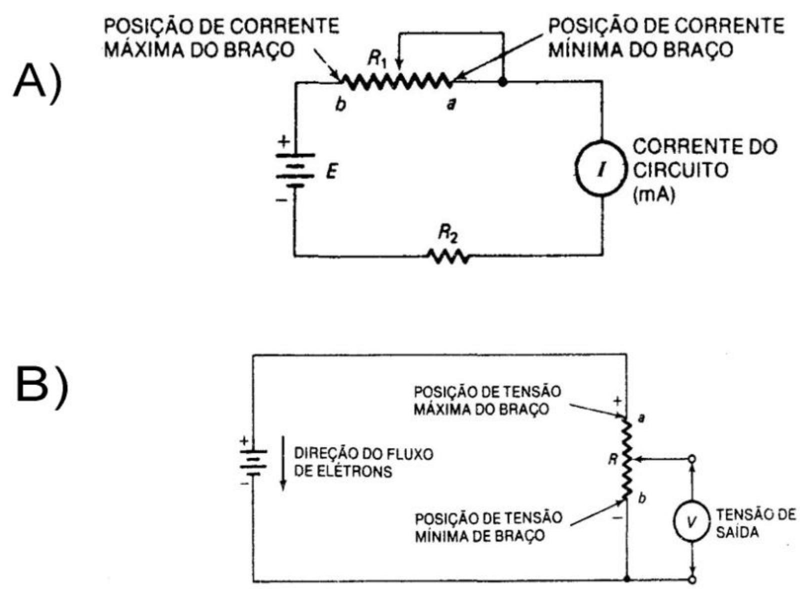


Figura 11 - Exemplos de circuitos com resistores variáveis. A) para controle de corrente, B) para controle de tensão de saída em um ramo do circuito.

Experimento 1

AMPERÍMETRO (PARTE A)

O amperímetro é um dispositivo construído para indicar a intensidade de corrente que flui através dele. O amperímetro de D'Arsonval é o tipo mais comum e consiste de uma bobina móvel, uma mola e um imã permanente. Quando uma corrente circula pela bobina, aparece um torque magnético que a faz girar. Fixando-se, então, um ponteiro à bobina móvel, é possível obter uma indicação da intensidade da corrente que a atravessa, pois a amplitude do deslocamento angular sofrido pelo ponteiro (solidário à bobina) está relacionada com a corrente que atravessa a bobina.

Um amperímetro ideal tem duas propriedades básicas:

a) A sua resistência interna é zero e
b) A deflexão de seu ponteiro é diretamente proporcional à corrente que atravessa a bobina, o que significa dizer que, se a corrente dobrar, a deflexão também dobrará, e assim sucessivamente.

Desde que sua resistência interna é zero, não pode perturbar a corrente num ramo qualquer de um circuito no qual seja inserido. Um amperímetro real por outro lado, tem sempre alguma resistência interna (resistência associada ao fio com o qual se enrolou a bobina móvel) e, além disso, a deflexão sofrida pelo ponteiro nem sempre é exatamente proporcional à intensidade da corrente que atravessa a bobina. Contudo os amperímetros REAIS podem aproximar-se do amperímetro IDEAL. Para isto procura-se projetar o amperímetro com resistência interna tão baixa quanto possível e de modo que a deflexão do ponteiro cresça quase linearmente com a corrente. Naturalmente a resistência interna baixa torna o instrumento suscetível de ser danificado quando usado de maneira indevida (por quê?).

Um dos objetivos de uma parte desta prática é familiarizá-lo com o medidor de corrente de modo que possa, em cada situação, empregá-lo corretamente, sem o risco de danificá-lo. Outro objetivo é mostrar de que modo a resistência interna do instrumento interfere na precisão da medida de uma corrente. Começaremos com um miliamperímetro.

1.1- Medida de intensidade de corrente por meio de um miliamperímetro.

Você acaba de ver que, para um amperímetro real se aproximar do ideal, deverá ter, em primeiro lugar, resistência interna tão pequena quanto possível. **Considere, portanto, numa primeira aproximação, a resistência interna do miliamperímetro igual a zero nos cálculos que serão pedidos em seguida.**

Q_1. Examine a escala do seu instrumento. Qual a máxima e a mínima corrente que pode indicar sem sofrer danos? Qual é o valor de uma divisão?

Q_2. Considerando agora o circuito ao lado, fig. 1.1 e usando a lei de Ohm, determine o valor mínimo de R para que a corrente não ultrapasse o valor máximo permitido para o seu instrumento.

Q_3. Consultando o código de cores, escolha (no seu conjunto) uma resistência R maior que $R_{mín}$, que será usada em seguida para montar o circuito da Fig.1.1.

a) Por que R deve ser maior que $R_{mín}$?

b) Que valor espera ler no miliamperímetro quando ligar a chave?

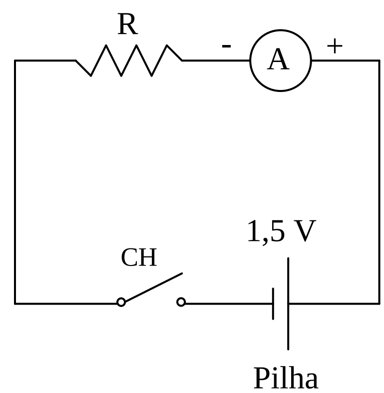


Figura 1.1

Uma vez montado o circuito da Fig.1.1 conecte a bateria e leia a corrente. Anote esse valor e compare-o com aquele previamente calculado em Q_3, item b.

c) Calcule o desvio percentual entre os dois valores usando a expressão.

$$\sigma_{\%} = \frac{|Valor_{esperado} - Valor_{medido}|}{Valor_{esperado}} x\,100\% \qquad \textbf{(1)}$$

Q_4. Que fatores podem ser responsáveis por esse desvio?

Q_5. Meça mais 3 correntes com outros valores de R (maiores que R_{min}) até familiarizar-se com a escala do medidor. Em cada caso calcule o desvio percentual entre o valor esperado e o valor medido.

Exercício 1

Considere uma pilha, uma resistência R e um amperímetro, todos ligados em série. Mostre que se i é uma corrente que circula por esse circuito e i' a corrente que circulava antes da inserção do amperímetro, a razão i/i' é dada por $R/(R + R_A)$ onde R_A é a resistência interna do amperímetro.

(Sugestão: Aplique a lei de Ohm para o circuito **sem o amperímetro** e, depois, para o circuito **com o amperímetro**).

Exercício 2

Vamos definir **PRECISÃO** pela relação

$$P_r = \frac{i'}{i} = \frac{R}{R + R_A} \qquad \textbf{(2)}$$

(Suponha que o instrumento esteja corretamente calibrado).

Se $R_A = 0$ e $i = i'$, a precisão de sua leitura será 1 (ou 100%). Se $R = R_A$, a precisão será 0,5 (50%). Mostre que, se $R = 100R_A$, a precisão P_r será no mínimo igual a 0,99 (ou 99%).

1.2 - Medida da resistência interna (TEORIA).

Para determinar a resistência interna de um amperímetro, pode-se usar o circuito esquematizado na fig.1.2, onde AA é um amperímetro auxiliar e A é o amperímetro do qual se quer determinar a resistência interna (R_A), i é a corrente que passa por AA, i_A a que passa por A e i_S a que passa pela resistência R_S em paralelo com o amperímetro A. Portanto $i_S + i_A = i$.

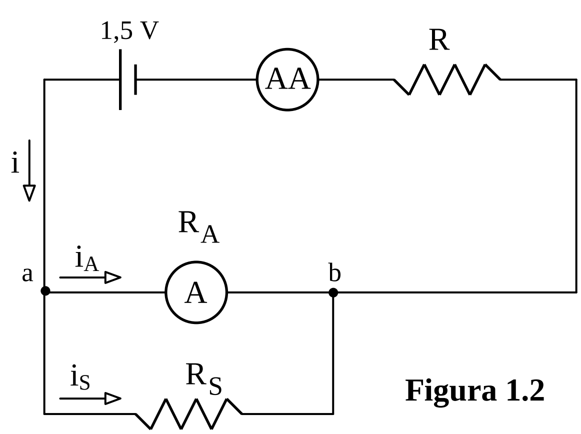


Figura 1.2

Aplicando a lei de Ohm no ramo a-b temos:

$$R_A\, i_A = R_S\, i_S = R_S\left(i - i_A\right) \quad \text{ou} \quad R_A = R_S\,\frac{i - i_A}{i_A} \qquad \textbf{(3)}$$

Veja que, se $R_S >> R_A$ a corrente i será aproximadamente igual a i_A, e a diferença $i - i_A$ poderá ser da mesma ordem de grandeza do erro que você comete ao ler as correntes; neste caso o valor de R_A, calculado pela expressão (3), será muito pouco confiável. Um argumento análogo mostra que o resultado também será pouco confiável, quando $R_S << R_A$, ou seja, quando $i >> i_A$. Por isso, é boa norma escolher R_S da mesma ordem de grandeza que R_A, (ou $R_S \cong R_A$) o que é equivalente a dizer que poderá escolher R_S de modo que $i \cong 2i_A$. (Veja que, se $R_S = R_A$, $i = 2i_A$). Com isso esperamos obter um resultado melhor. Na prática podemos, então, ajustar R_S até que $i \cong 2i_A$.

PRÁTICA:

i) Depois que o instrutor fornecer o amperímetro auxiliar (AA) monte o circuito da Fig.1.2 O amperímetro A, do qual você quer determinar a resistência interna R_A, é o mesmo que você empregou na prática anterior. Escolha $R > R_{min}$, calculado na Q_2 do item 1.1.

Q_6. Escolha R_S de modo que o amperímetro A indique uma corrente da ordem da metade da corrente máxima medida no amperímetro AA (R_S deverá estar entre 10 e 100 Ω). Ligando a chave CH, leia i e i_A e determine R_A a partir da relação (3). Faça 3 medidas no mínimo.

R_S (Ω)	i (mA)	i_A (mA)	R_A (Ω)
20			
40			
60			

Q_7. Repita a experiência, escolhendo na caixa de resistores padronizados, uma resistência R_S que faça $i = 2i_A$.

Q_8. Olhe atentamente para o mostrador de seu miliamperímetro, pois talvez contenha alguma inscrição que lhe permita saber qual é sua resistência interna. Se conseguir isto, compare esse valor com aquele que você determinou a partir da relação (3).

Q_9. Utilizando os dados da questão Q_5 determine a precisão de cada uma das três medidas realizadas. Qual foi realizada com maior e menor precisão?

Experimento 2

AMPERÍMETRO (PARTE B)

MEDIDA DE CORRENTE MAIOR DO QUE A INDICADA NO FUNDO DE ESCALA DO MEDIDOR

2.1 - Duplicação da escala.

Vejamos como um medidor de corrente de fundo de escala i_F pode medir correntes de até duas vezes i_F.

Imagine uma resistência R_S em paralelo com o medidor e de valor igual ao de sua resistência interna R_A (O resistor R_S em paralelo com R_A é chamado "shunt").

Na situação imaginada a corrente que passa pelo medidor será igual a que passa pelo shunt, pois $R_A = R_S$. O conjunto constituído pelo medidor de resistência interna R_A (corrente de fundo de escala i_F) e mais o shunt R_S formam um **novo medidor** capaz de medir corrente máxima igual a duas vezes i_F.

O miliamperímetro que você vem utilizando tem capacidade de medir uma corrente de fundo de escala (i_F) de 1 mA e resistência interna R_A em torno de 50 Ω, como já foi visto na última aula. Se colocar uma resistência R_S = 50 Ω em paralelo com esse miliamperímetro você poderá medir correntes de até 2mA. O conjunto (miliamperímetro + shunt) constitui, agora, um novo miliamperímetro com fundo de escala 2 mA e resistência equivalente de 25 Ω. Naturalmente a resistência interna muda porque, quando colocar o conjunto num circuito para medir uma corrente, o circuito "enxergará" a resistência equivalente às duas resistências de 50 Ω em paralelo.

PRÁTICA (Multiplicando o fundo de Escala por 2x):

Monte o circuito da Fig.2.1, escolhendo R_S = 50 Ω e R = 1 KΩ. Use a escala do multímetro digital para leitura de corrente em 20mA. Para obter Rs de 50 Ω ligue 2 resistores de 100 Ω em paralelo no mesmo suporte conector.

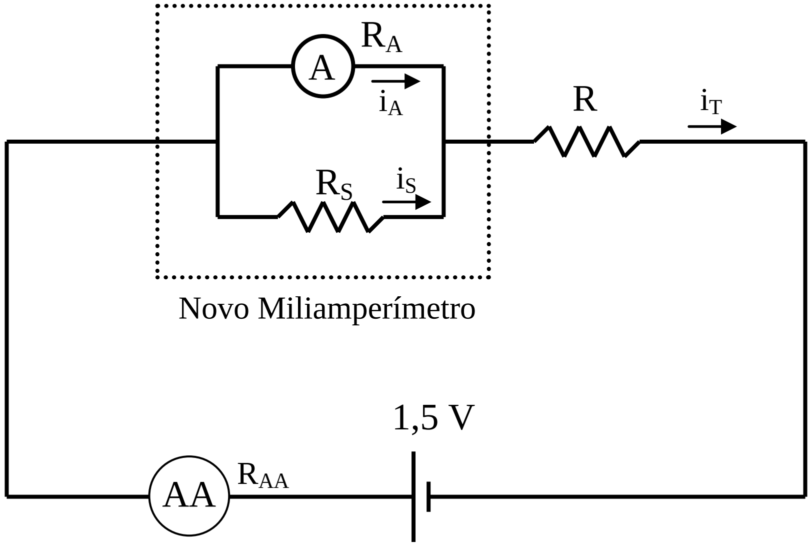


Figura - 2.1

Q_1. Considerando a figura 2.1 (R_A=Rs=50 Ω e i_F=1mA e V=1,5V), faça os cálculos e mostre por que R deve ser maior que 750 Ω?

Q_2. Calcule os valores nominais para i_A e i_T com R_A=Rs=50 Ω, R = 1 KΩ, e V=1,5 volts

Q_{3a}. a) Que corrente você lê no miliamperímetro (i_A)?

b) Que corrente passa pelo shunt?

c) Que corrente passa pelo resistor R (i_T)?

d) Os valores medidos estão dentro dos valores nominais calculados em Q_2?

Conclusão: Para determinar a corrente total medida pelo *Novo Miliamperímetro* construído, basta .... a corrente lida no medidor A.

Q_{3b}. Com o mesmo circuito da figura 2.1 , use agora a escala do multímetro digital em 2 mA.

a) Que corrente você lê no miliamperímetro (i_A)?

b) Que corrente passa pelo resistor R (i_T)?

c) Observe que os valores medidos para i_A e i_T NÃO estão mais dentro dos valores nominais calculados em Q_2. **Dica:** Determine a Resistência Interna (R_{AA}) do Miliamperímetro Digital para esta escala de 2 mA, considerando R_A=Rs=50 Ω, R = 1 KΩ, e V=1,5 volts e o valor medido de i_T.

Q_4. Repita a Q_2 escolhendo R respectivamente igual a 820, 2200, e 5600 Ω. Compare os valores medidos com os valores que esperava obter. Complete a tabela abaixo.

R (Ω)	**I_S (mA) calculado**	**I_A (mA) medido**	**I_R (mA) medido**	**I_R (mA) calculado**	**$\delta_{\%}$**
820					
2200					
5600					

Q_5. Escolha um resistor com resistência R maior que 1500 Ω (Por exemplo, R = 2200 Ω). Leia a corrente no medidor. Retire o shunt e leia outra vez a corrente.

a) Que relação existe entre as duas leituras?

b) Para esta experiência, em particular, R poderia ser menor que 1500 Ω? Porque?

2.2 - TEORIA: Multiplicação da escala de um amperímetro por um fator qualquer.

Se quisermos medir corrente de intensidade k vezes maior que a indicada pelo fundo de escala do medidor, devemos ter a seguinte distribuição de correntes:

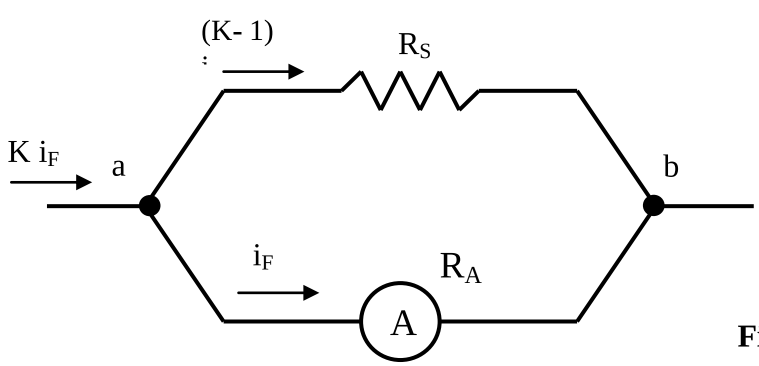


Figura 2.2

Pela Lei de Ohm a queda de tensão entre os pontos **a** e **b** é:

$$V_a - V_b = R_A i_F = R_S \cdot (k-1) \cdot i_F \quad \text{ou} \quad \mathrm{R_S} = \frac{R_A}{k-1} \qquad \textbf{(1)}$$

Portanto, se tivermos um medidor cujo fundo de escala é i_F e quisermos multiplicar esse fundo de escala pelo fator k, deveremos ligar em paralelo com o mesmo um resistor de valor igual a $R_A/(k-1)$.

PRÁTICA (Multiplicando o fundo de Escala por 10x):

Q_6. Calcule o shunt necessário para multiplicar a escala de seu medidor por 10.

Q_7. Sabendo que a resistência de um certo fio de cobre é de 2,2 Ω/m, calcule o comprimento desse fio necessário para construir um shunt com a resistência calculada em Q_5.

Q_8. Uma vez construído o shunt (com o auxílio do técnico), ligue-o em paralelo com o miliamperímetro. A seguir monte o circuito da Fig.2.1, escolhendo R maior que 150 Ω. Por exemplo, R = 220 Ω. Por que R deve ser maior que 150 ohms?

Q_9.

a) Que corrente você lê no miliamperímetro?

b) Que corrente passa pelo shunt?

c) Que corrente passa pelo resistor R?

d) A corrente medida pelo novo miliamperímetro será então i =..

e) Esse era o valor que você esperava?

Conclusão:

Para determinar a corrente medida pelo *Novo Miliamperímetro* construído, basta .... a corrente lida no medidor A.

Q_{10}. Repita as medidas da **Q_9** escolhendo agora R respectivamente igual a 270, 470 e 680 Ω. Compare os valores encontrados com os que você esperava.

Exercício 1:

Faça um esquema de um miliamperímetro com 4 escalas. Use uma chave rotativa de várias posições para selecionar o shunt adequado a cada situação.

Exercício 2:

Demonstre que, se um miliamperímetro de resistência interna R_A for shuntado de modo a multiplicar sua escala por uma constante k, terá sua resistência interna reduzida para R_A/k.

2.3 - Condutância específica de um amperímetro. Definições:

1. Condutância é o inverso da resistência. Por exemplo: a resistência de 10 Ω tem uma condutância de 0,1 $ohms^{-1}$ ($ohms^{-1}$ é definido também como Siemens (S) ou mho).

$$C = \frac{1}{R_A} \qquad \textbf{(2)}$$

2. Condutância específica de um amperímetro é o valor da condutância por ampere do fundo de escala. Um instrumento de R_A = 400 ohms e fundo de escala de $50x10^{-6}$A, tem condutância específica igual a (1/400 ohms):($50x10^{-6}$A) = 50 ohms /ampere = 50 $volt^{-1}$.

$$C_{esp} = \frac{C}{i_F} = \frac{1}{R_A\, i_F} \quad ou \quad C_{esp} = \frac{1}{R_{eq}\, I_F} \qquad \textbf{(3)}$$

Q_{11}. Calcule a condutância específica de seu miliamperímetro sem shunt.

Q_{11}. Calcule a condutância específica do miliamperímetro shuntado nas escalas 2X e 10X. Demonstre que a condutância específica é constante, isto é, independe do shunt utilizado.

Q_{11}. Existe alguma relação entre a condutância específica de um amperímetro e a queda de tensão através do mesmo, quando se faz uma leitura de corrente igual à indicada no fundo de escala? Qual é essa relação?

Q_{14}. Qual a relação entre os termos: Resistência e Resistividade. Condutância e Condutividade. (ver Figura 4).

Experimento 3

VOLTÍMETRO

3.1 - O Voltímetro

Vejamos como um miliamperímetro pode ser transformado em um voltímetro, isto é, em um aparelho para medir diferença de potencial.

3.2 - Medida de tensões até 10 volts

Imagine um resistor R = 10 kΩ em série com um miliamperímetro de fundo de escala 1mA (Fig. 3.1).

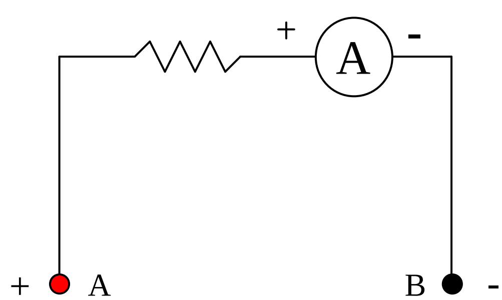


Figura 3.1

Q$_1$. Nesta questão, despreze a resistência do miliamperímetro.

(a) Se aplicarmos uma tensão de 10 volts aos terminais A e B , qual será a posição do ponteiro do miliamperímetro?

(b) E se a tensão for de 5 volts?

(c) E se for de 1 volt?

Q$_2$. (a) Se a corrente indicada for 0,20mA, qual terá sido a tensão aplicada?

(b) E se for 0,45mA?

Agora acho que percebeu que esse conjunto (resistência em série com o miliamperímetro) constitui um voltímetro com fundo de escala de 10 volts. A soma da resistência R, com a resistência interna R_A, do amperímetro é designada **RESISTÊNCIA INTERNA** do voltímetro.

(c) A seguir meça as diferenças de potencial (as tensões) dos arranjos de que se seguem, utilizando a montagem sugerida pela Fig.3.1.

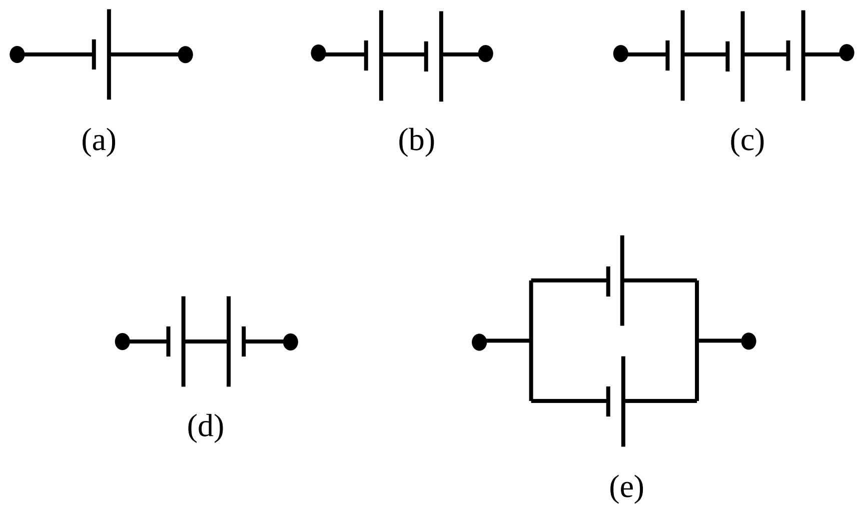


Figura - 3.2

Q_3. Compare os circuitos (a) e (e). Em que situação é mais interessante utilizar a montagem e em vez da a ?

Q_4. Como você faria para medir a tensão de 10 pilhas em série? Projete um novo voltímetro que seja adequado para isso.

3.3 - Medida de tensões até 5 volts

Substitua na Fig. 3.1 o resistor de 10kΩ por um de 5kΩ.

Q_5. Qual será agora o fundo de escala de seu **voltímetro**?

Q_6. Que corrente lerá se a tensão for 3 volts?

Q_7. Que tensão terá sido aplicada se a corrente lida for 0,33 mA?

Q_8. Utilizando o seu voltímetro, de fundo de escala 5 volts, meça as tensões nos arranjos (a) , (b) e (c) da figura 3.2.

Q_9. Como procederia para transformar o seu miliamperímetro num voltímetro com fundo de escala de 2 volts.? Neste caso você levaria em conta a resistência do miliamperímetro?

Q_{10}. E como faria para transformar o seu miliamperímetro num voltímetro com fundo de escala de 50mV?

3.4 - Escala qualquer

Q_{11}. Mostre que, para transformar um amperímetro com fundo de escala i_F num voltímetro com fundo de escala U_F, basta acrescentar em série com o mesmo um resistor $R = U_F/i_F$, desde que R seja muito maior que a resistência interna do amperímetro.

Q_{12}. Faça um diagrama esquemático de um voltímetro com 4 escalas, que use uma chave rotativa para selecioná-las.

3.5 - Resistência interna por unidade de tensão do fundo de escala ("sensibilidade")

É comum em voltímetros com múltiplas escalas definir a **resistência interna por unidade de tensão de fundo de escala**. Por exemplo, a escala de 6 volts de um voltímetro pode corresponder a uma resistência interna de 12 kΩ. Teríamos então para o mesmo, uma resistência por unidade de tensão de fundo de escala de:

$$\frac{12000}{6} = 2000\,\frac{\text{ohms}}{\text{volts}} = 2000A^{-1}$$

Já que o consumo de corrente deve ser sempre o mesmo para todas as escalas, este aparelho deve ter, para a escala de 120 volts, a resistência interna de $\frac{12000}{6} = \frac{X}{120}$, onde X = 240 kΩ.

Conhecendo os valores das resistências por unidade de tensão do aparelho, podemos ter uma idéia de sua qualidade e compará-lo com outros voltímetros.

Q_{13}. a) Qual a resistência interna de cada voltímetro que construiu?

b) Qual o fundo de escala de cada voltímetro que construiu?

c) Calcule a resistência interna por unidade de tensão de fundo de escala dos dois voltímetros que você construiu. Que conclusão pode tirar dos resultados?

Q_{14}. Baseado na Lei de Ohm ($U = R\,.\,i$), mostre que a sensibilidade de um voltímetro, dada por $S = \frac{R_i}{U_F}$, depende apenas da corrente de fundo de escala i_F do amperímetro utilizado.

Experimento 4

OHMÍMETRO

4.1 - Ohmímetro

Monte o circuito indicado na figura abaixo. Para fundo de escala 1mA use R = 1 kΩ e P = 1 kΩ ou 5 kΩ.

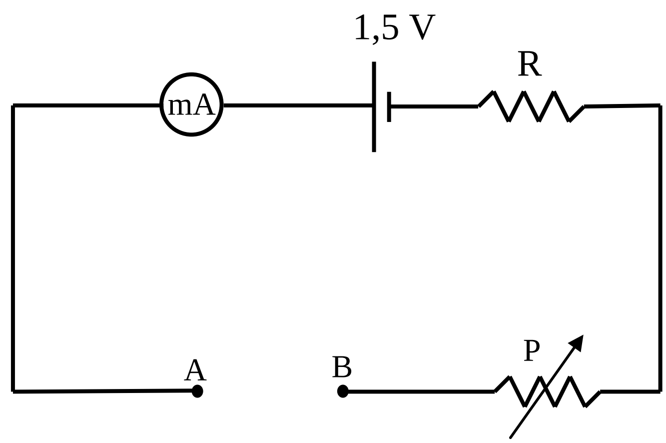


Figura - 4.1

Ligando os pontos A e B com um fio (de resistência nula), ajuste a resistência variável P de modo que o ponteiro fique na última divisão da escala. Completando este ajuste, retire o fio. Observe que, tendo interrompido o circuito entre A e B (criando, portanto, uma resistência infinita), o ponteiro cai para zero. Colocando entre A e B um resistor com resistência qualquer, o ponteiro do medidor ocupará uma posição intermediária. Assim, se registrar as posições do ponteiro para diferentes resistores inseridos entre A e B, poderá construir um gráfico de **resistência** contra **corrente**. A curva obtida, chamada **curva de calibração**, permitirá a você determinar a resistência de um resistor desconhecido, colocado entre os pontos A e B. A **curva de calibração** e o circuito da Fig.4.1 constituem o **ohmímetro**.

PRÁTICA:

Construa uma curva de calibração para o seu instrumento, utilizando uma caixa de resistores de precisão. Para isso, complete a tabela abaixo.

Corrente I (mA)	**Resistência R_X (Ω)**	**Converter p/ mm**	
		I	**Rx**
1,00			
0,94			
0,88			
0,82			
0,76			
0,70			
0,64			
0,58			

Corrente I (mA)	**Resistência R_X (Ω)**	**Converter p/ mm**	
		I	**Rx**
0,52			
0,46			
0,40			
0,34			
0,28			
0,22			
0,16			
0,12			

Q_1. Em que região da curva suas leituras serão feitas com menor precisão?

Você acaba de construir um **ohmímetro** utilizando um miliamperímetro. Os extremos da escala de resistência são zero e infinito.

Q_2. A seguir meça algumas resistências com o **ohmímetro** que você construiu, e compare os resultados com os valores nominais dos resistores utilizados.

Problema:

Imagine que a pilha de 1,5 V da Figura 4.1 seja substituída por uma bateria de 22,5 V e que os resistores R e P sejam substituídos por outros de valores adequados à nova situação. O que mudaria com relação à faixa de resistências que poderiam ser medidas? Explique.

Q_3. Finalmente, observe as escalas de resistências de um multímetro digital comercial, para se familiarizar com elas. Meça a seguir algumas resistências com este multímetro (o instrutor irá orientá-lo nisso).

Q_4. Projete e desenhe um ohmímetro com uma chave seletora para 4 escalas, para operar com baterias de 1,5V, 3V, 6V e 9V. Determine o valor das resistências R e P adequadas para cada escala.

Experimento 5

A LEI DE OHM - ASSOCIAÇÃO DE RESISTORES

5.1 - A Lei de Ohm

Se a relação entre a corrente e a tensão num resistor for constante (mantendo a temperatura e outras condições físicas inalteradas) dizemos que o resistor obedece à Lei de Ohm. Neste caso $I \propto V$ ou $I = G\,V$, onde G é a condutância do resistor. Se definir $R = 1/G$, tem-se $V = R.I$, que é a forma como a lei de Ohm é mais comumente expressa.

Experiência 1: A Lei de Ohm.

Vamos verificar se um dado resistor é ôhmico, isto é, se obedece a lei de Ohm. Para isto monte o circuito da fig. 5.1, ao lado, e obtenha alguns valores para a corrente I, variando o número de pilhas em série (no máximo 6 pilhas). Construa, finalmente, o gráfico I contra V. Despreze a resistência interna do miliamperímetro.

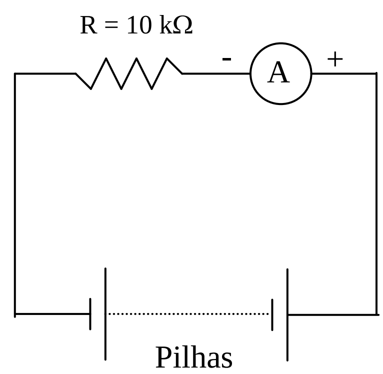


Figura 5.1

Nº de Pilhas	V (Volts)	I (mA)
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		

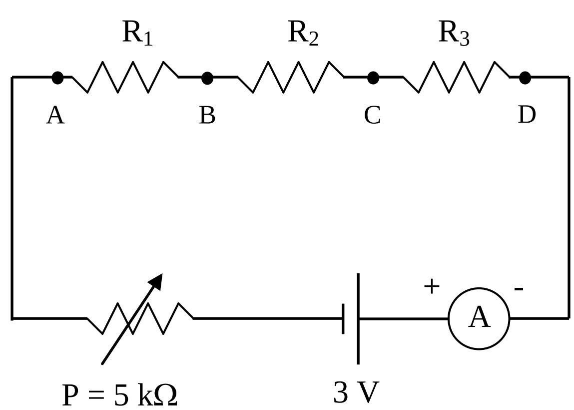


Figura 5.2

Q₁. (a) O que pode concluir do gráfico? (b) Qual é a condutância do resistor? (c) E qual a sua resistência?

5.2 – Associação de resistências em série

Experiência 2 :

Monte o circuito da Fig. 5.2, onde R_1 = 820 Ω, R_2 = 560 Ω e R_3 = 470 Ω. Meça inicialmente, a ddp. (tensão) entre A e D (V_T) e depois entre A e B (V_1), B e C (V_2), C e D (V_3). Leia a intensidade de corrente. Variando P, obtenha 3 conjuntos de medidas (para i=0,5; i=0,8; e i=1,0).

R(Ω)	**I(mA)**	**0,5**	**0,8**	**1,0**	**R=V/I (Ω)**	**$R_{Médio}$ (Ω)**
R_1 = 820		$V_{1\,(i\,=\,0,5)}$ =	$V_{1\,(i\,=\,0,8)}$ =	$V_{1\,(i\,=\,1,0)}$ =	$R_{1\,(i\,=\,0,5)}$ =	$R_{1\,Médio}$=
					$R_{1\,(i\,=\,0,8)}$ =	
					$R_{1\,(i\,=\,1,0)}$ =	
R_2 = 560		$V_{2\,(i\,=\,0,5)}$ =	$V_{2\,(i\,=\,0,8)}$ =	$V_{2\,(i\,=\,1,0)}$ =	$R_{2\,(i\,=\,0,5)}$ =	$R_{2\,Médio}$=
					$R_{2\,(i\,=\,0,8)}$ =	
					$R_{2\,(i\,=\,1,0)}$ =	
R_3 = 470		$V_{3\,(i\,=\,0,5)}$ =	$V_{3\,(i\,=\,0,8)}$ =	$V_{3\,(i\,=\,1,0)}$ =	$R_{3\,(i\,=\,0,5)}$ =	$R_{3\,Médio}$=
					$R_{3\,(i\,=\,0,8)}$ =	
					$R_{3\,(i\,=\,1,0)}$ =	
$V_T = V_1+V_2+V_3$		$V_{T\,(i\,=\,0,5)}$ =	$V_{T\,(i\,=\,0,8)}$ =	$V_{T\,(i\,=\,1,0)}$ =	R_{eq}=	$R_{eq.\,Médio}$=
					R_{eq}=	
					R_{eq}=	
V_{AD}		$V_{AD\,(i\,=\,0,5)}$ =	$V_{AD\,(i\,=\,0,8)}$ =	$V_{AD-1,0}$ =	R_{eq}=	$R_{eq.\,Médio}$=
					R_{eq}=	
					R_{eq}=	

Q_2. Compare a soma de V_{AB}, V_{BC} e V_{CD} com a tensão total V_{AD}. Era o que você esperava. O que pode concluir?

Q_3. Determine a resistência equivalente das 3 resistências em série e compare-a com a soma de R_1, R_2 e R_3 (Não use os valores nominais). O que você pode concluir?

5.3 – Associação de resistores em paralelo

Experiência 3:

Monte o circuito da Fig.5.3. Usaremos um amperímetro analógico, Engro, na escala de 3 mA para medir a corrente total e um outro de fundo de escala i_F = 1mA para ler, sucessivamente, as correntes que atravessam R_1 = 1,2 kΩ, R_2 = 1,8 kΩ e R_3 = 2,2 kΩ. Comece colocando o miliamperímetro de i_F = 1mA em série com o menor resistor, R_1.

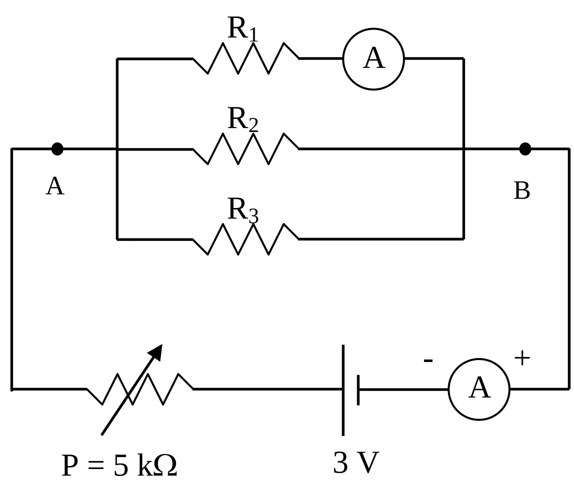


Figura 5.3

Em seguida ajuste P de modo não deixar a corrente que passa por R_1 ultrapassar o fundo de escala, ou seja 1 mA. Para isso, fixe uma corrente de 2 mA no amperímetro analógico. Anote essa corrente total e a ddp entre os pontos A e B. A ddp entre A e B deve ser medida com o multímetro digital minipa. A seguir leia as correntes passando por R_2 e R_3 trocando estes resistores com a posição inicial de R_1. A partir das correntes e da tensão determine os valores experimentais R_1, R_2 e R_3 e a resistência R_{eq} equivalente às três resistências em paralelo dividindo a ddp entre A e B e a corrente total medida pelo amperímetro analógico. Verifique se elas obedecem à relação.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Q_4. Qual é a relação entre a corrente total I e soma das correntes $i_1 + i_2 + i_3$. Era o que você esperava?

Experimento 6

A VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE UMA LÂMPADA COM A TEMPERATURA

6.1 - Introdução

Por definição a resistência R de um condutor é dada pela relação V/I. Se R for constante (gráfico de V contra I linear) dizemos que o condutor obedece à lei de Ohm ou que o condutor é ôhmico. A Lei de Ohm é uma propriedade específica de certos materiais, não sendo uma lei geral do eletromagnetismo, como o é, por exemplo, a lei de Gauss. A resistência dos metais, para temperaturas não muito elevadas, obedece à lei de Ohm. Entretanto, a resistência começará a variar à medida que a temperatura for subindo. Na prática de hoje vamos verificar isto analisando o comportamento da resistência do filamento metálico de uma lâmpada elétrica à medida que sua temperatura vai subindo.

6.2 - Procedimento Experimental

Monte o circuito da fig. 6.1, onde A é um medidor de corrente com fundo de escala de 50mA, P é um potenciômetro de 1kΩ, V é um voltímetro digital Minipa e L é uma lâmpada de 6 volts, que consome uma corrente máxima de 50mA.

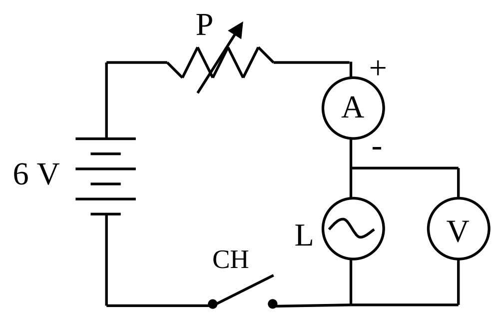


Figura 6.1

Q_1. Variando P determine vários valores de I e V, colocando-os na tabela abaixo. Comece com uma corrente de 10mA e vá até a máxima, tomando valores de 5 em 5mA. Escolha a escala de tensões no voltímetro adequada para cada situação. Assinale na tabela o ponto em que a lâmpada começa a acender (irradiando luz na parte central do filamento) e o ponto onde começa a acender completamente (filamento irradiando luz em toda sua extensão).

I (mA)	**V (V)**	**R (Ω)**
10,0		
15,0		
20,0		
25,0		
30,0		
35,0		
40,0		
45,0		

Q_2. Faça o gráfico de V versus I num papel milimetrado.

Q_3. Para cada par de valores de sua tabela calcule a resistência do filamento (lembre-se da definição de resistência). Pode-se dizer que o filamento é um resistor ôhmico?

Q_4. O gráfico do item Q_2 deve sugerir uma relação do tipo $V = AI^{\alpha}$, onde A e α são constantes para uma dada lâmpada. Essas constantes podem ser obtidas a partir do gráfico log V contra log I. Veja:

$$V = AI^{\alpha} \Rightarrow \log V = \log A + \alpha \, Log \, I \qquad (1)$$

Fazendo Y = log V, X = log I e m = log A, resulta Y = m + α X que dá uma reta num gráfico de Y contra X. De m , que é a intersecção da reta com o eixo Y, obtemos:

$$m = \log A \Rightarrow A = 10^{m} \qquad (2)$$

α, por sua vez, é a inclinação da reta:

$$\alpha = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = \frac{\log V_2 - \log V_1}{\log I_2 - \log I_1} \qquad (3)$$

As relações 2 e 3 deverão ser utilizadas toda vez que usar um papel milimetrado, isto é, quando for fazer um gráfico de log V contra log I. Neste caso deverá acrescentar mais duas colunas na sua tabela: uma para log V e outra para log I. Esse procedimento poderá ser evitado se usar um papel di-log. Neste caso o gráfico será de V contra I, pois os valores de V e I serão lançados diretamente no papel di-log. Nesse papel os logaritmos são proporcionais aos comprimentos, como veremos. Abaixo reproduzimos parte da escala horizontal de um papel di-log comum. Nessa escala, em particular, os números 3 e 20, por exemplo, seriam colocados nas verticais que estão pontilhadas na figura 6.2.

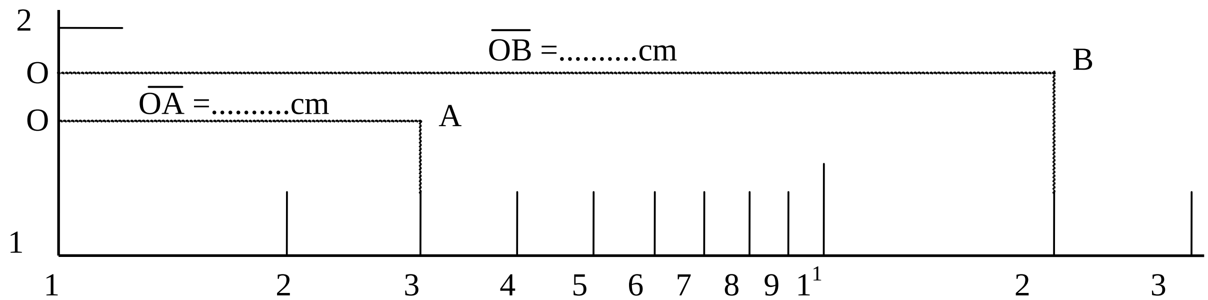


Figura 6.2

Determine, agora, usando uma calculadora, o logaritmo decimal de 3 e de 20 e compare esses valores com os comprimentos $\overline{OA}$ e $\overline{OB}$. Você verificará que, medindo $\overline{OA}$ e $\overline{OB}$ em centímetros, $\log 3 = 0{,}1 \cdot \overline{OA}$ e $\log 20 = 0{,}1 \cdot \overline{OB}$.

Veja, então, que: quando você assinala o número 3 no papel di-log tudo se passa como se tivesse colocado o log 3 num papel milimetrado, pois $0{,}1 \cdot \overline{OA} = \log 3$.

Resumindo: O logaritmo de um número, no papel di-log, é proporcional à medida algébrica do segmento que vai da potência 10^o até o número em questão.

Sejam L e h os comprimentos medidos respectivamente nos eixos vertical e horizontal. Em vista do que foi exposto, log V (eixo vertical) é proporcional a L e log I (eixo horizontal) é proporcional a h , ou

LogV = kL e **LogI =Kh**

(A constante k depende do formato do papel).

Disto resulta:

$$\alpha = \frac{\log \mathrm{V}_2 - \log \mathrm{V}_1}{\log \mathrm{I}_2 - \log \mathrm{I}_1} = \frac{kL_2 - kL_1}{kh_2 - kh_1} = \frac{k(L_2 - L_1)}{k(h_2 - h_1)} = \frac{\Delta L}{\Delta h}$$

portanto:

$$\alpha = \frac{\Delta L \ \ (\mathrm{cm})}{\Delta h \ \ (\mathrm{cm})}$$

Assim, para determinar a constante α partir de um papel di-log, basta tomar dois pontos A e B da reta, construir o triângulo retângulo (ABC) e determinar o **quociente** entre as medidas (feitas com a régua) dos catetos BC e CA.

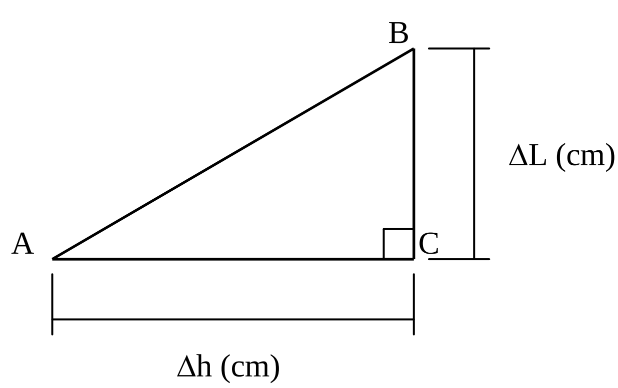


Figura 6.3

No papel di-log, a constante A também sai diretamente. Veja: Faça I = 1 na expressão 1. Então $\log V = \log A \Rightarrow V = A$. Portanto, para determinar A, basta verificar onde a reta intercepta a vertical que passa pela potência 10^0.

Q_5. Faça, então, o gráfico V versus I num papel di-log.

Q_6. A partir de que tensão o gráfico é linear?
Compare essa tensão com aquela assinalada em sua tabela, correspondente ao ponto em que a lâmpada começou a acender parcial ou totalmente.

Q_7. Calcule α e A a partir de seu gráfico e explicite a lei, dizendo a faixa de corrente para a qual ela pode ser aplicada.

Q_8. Há alguns pontos do seu gráfico que não caem sobre a reta. Você teria uma explicação para isso? (Reflita sobre o seguinte: Por que o filamento começa a emitir luz primeiro no centro? Nessa hora é possível dizer que todos os pontos do filamento estão a uma mesma temperatura? As hastes que sustentam o filamento têm algo a ver com o problema? Se o filamento fosse mais comprido, o resultado seria melhor?)

Q_9. Na figura da primeira página, poderíamos colocar o voltímetro diretamente em paralelo com o amperímetro e a lâmpada em série? Compare essa alternativa com a que utilizamos considerando as seguintes características de nosso aparelho: a) voltímetro de boa qualidade e amperímetro de má qualidade., b) voltímetro de má qualidade e amperímetro de boa qualidade, c) ambos de boa qualidade e d) ambos de má qualidade.

Experimento 7

MAPEAMENTO DE EQUIPOTÊNCIAIS E LINHAS DE FORÇA

7.1 - Objetivos

Neste experimento pretendemos determinar experimentalmente linhas equipotenciais utilizando para tanto uma cuba eletrolítica. Uma vez obtida as linhas de equipotencial poderemos determinar as linhas de força (campo elétrico) para vários arranjos experimentais.

7.2 - Introdução

O mapeamento de linhas equipotenciais é, na maior parte dos casos, uma tarefa não muito fácil de ser realizada. Esta dificuldade surge especialmente quando se utiliza como meio dielétrico um material de alta resistividade, como por exemplo, vácuo, plásticos, vidros, etc. Medidas nestes tipos de materiais exigem instrumentos especiais de altíssima sensibilidade (voltímetros, amperímetros ou eletrômetros).

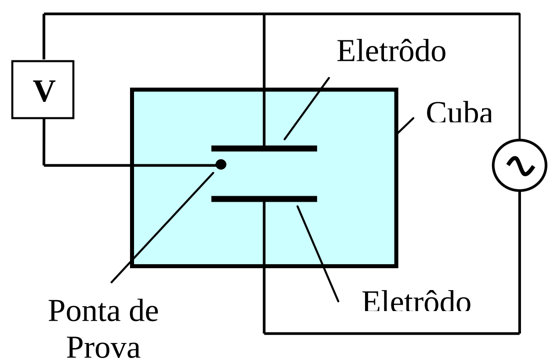


Figura 7.1

Além disso, podem ser necessárias condições especiais para a realização dessas medidas tais como: pressão controlada, ambiente com baixa umidade e atmosfera inerte.

Em nossos experimentos utilizaremos uma cuba eletrolítica que contêm apenas água. A configuração de eletrodos que se deseja estudar é parcialmente imersa na água que está contida no interior de uma cuba. Aplicando-se então uma ddp entre os mesmos, que fará surgir uma corrente iônica orientada pelo campo elétrico no meio. Através de uma referência fixa, e com o auxílio de um voltímetro (V) e uma ponta móvel pode-se determinar a equipotencial relativa à referência. Essa situação ocorrerá quando a ddp for mantida constante (veja figura 7.1).

Teoria

O potencial elétrico é uma grandeza de relevada importância no estudo da eletrostática e eletrodinâmica. Para melhor entender este conceito vamos inicialmente discutir suas origens. Quando tomamos uma carga elétrica q_0, imersa em um campo elétrico, e a deslocamos de um ponto P_1 para um ponto P_2 realizamos sobre a mesma um trabalho W. A diferença de potencial entre estes dois pontos é definida por (1):

$$V_2 - V_1 = \frac{W_{p1-p2}}{q_0} \tag{1}$$

onde V_1 e V_2 correspondem respectivamente, aos potenciais nos pontos P_1 e P_2.

Como a força elétrica que atua na carga q_0 é conservativa, este trabalho será sempre o mesmo, independente do caminho tomado para levar a carga de P_1 para P_2.

Para associar a um ponto um potencial elétrico é necessário estabelecer uma referência, onde considera-se o potencial como sendo nulo. A medida do trabalho necessário para deslocar uma carga teste deste ponto de referência até um ponto desejado fornece o potencial elétrico. Em geral, toma-se como ponto de referência um ponto no infinito. Nos casos práticos, no entanto, este ponto de referência é deslocado para as proximidades do experimento e o que se mede neste caso não é o potencial absoluto, mas sim, a diferença de potencial (ddp) ente os dois pontos considerados.

Perceba que a integral de linha do campo elétrico $\vec{E}$ em função do deslocamento infinitesimal de P_1 para P_2, também é utilizada na definição da tensão elétrica:

$$\int_{p1}^{p2} \vec{E}.dl = V_{p2-p1} = \frac{W_{p1-p2}}{q_0}$$

Podemos também relacionar o potencial e o campo elétricos pela relação

$$\vec{E} = -\nabla V \qquad (2)$$

, onde $\vec{E}$ é o vetor campo elétrico e ∇V é o gradiente do potencial. Com isso podemos concluir que as linhas equipotenciais e as linhas de campo elétrico são ortogonais entre si. Além disso, as linhas de campo elétrico têm a direção das equipotenciais decrescentes.

Princípio da carga imagem

O princípio da carga imagem diz que uma carga colocada próxima de um plano condutor infinito, tomado como potencial zero originará linhas de campo elétrico como se houvesse uma carga de sinal oposto do outro lado do plano e a mesma distância que a carga real. Pensa-se na carga fictícia como a imagem da carga real vista através de um espelho situado sobre o plano condutor.

Medida do campo elétrico

A operação experimental para a determinação do campo elétrico em um ponto P, E(P), permite apenas um valor aproximado para o mesmo. Isto porque, em virtude de erros experimentais, não podemos fazer a diferença $\Delta V = V_2 - V_1$ “tender a zero”, como manda o cálculo diferencial. Para isto, adotaremos o seguinte procedimento:

1. Obtemos duas equipotenciais, V_1 e V_2, entre as quais encontra-se o ponto P. A separação entre elas deve ser a menor possível compatível com erros experimentais.
2. Traça-se uma linha de força passando por P (uma linha de força é ortogonal às equipotenciais).
3. Mede-se sobre a linha de força, a distância Δs entre aquelas equipotenciais.
4. O quociente $|E| = (V_2 - V_1)/\Delta s$ dará o valor médio da magnitude do vetor $\vec{E}$ no ponto P.

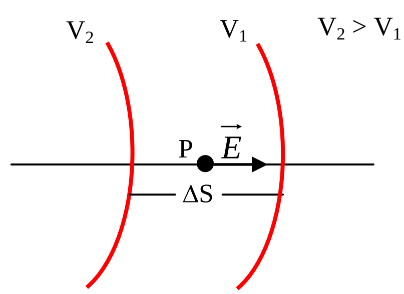


Figura 7.2

5. O vetor $\vec{E}(\text{P})$ aponta o sentido decrescente do potencial conforme mostra a figura 7.2.

Outra forma equivalente para se determinar o valor de $\left|\vec{E}\right|$, consiste em se utilizar uma sonda com duas pontas as quais é ligado um milivoltímetro conforme mostra a fig. 7.3.

A mesma mede a diferença de potencial (d.d.p.) $\Delta V = V_2 - V_1$ entre dois pontos do meio. Sendo Δs a distância entre as pontas da sonda, a razão $\Delta V/\Delta s$ dará a componente E_s do campo segundo a direção definida pelas pontas da sonda. Girando-se a mesma, a d.d.p. medida será nula quando seus terminais estiverem sobre a mesma equipotencial. Quando a leitura for máxima, o quociente $(\Delta V/\Delta s)_{max}$ dará a magnitude do campo ou gradiente do potencial no ponto P.

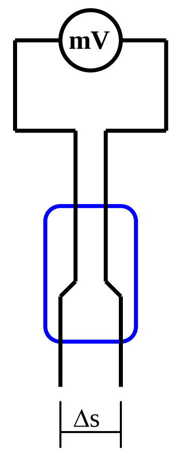


Figura 7.3

7.3 – Parte experimental – Mapeamento de Campos Eletrostáticos

1. Equipamentos e Materiais a serem utilizados:.

1. Fonte de tensão de corrente alternada (Variac).
2. Multímetro digital Minipa.
3. Eletrodos diversos.
4. Cuba eletrolítica.

2. Procedimento Experimental

A figura 7.4 esquematiza as montagens a serem utilizadas. Na cuba transparente é colocada água até completar aproximadamente 1 cm de altura. Os eletrodos, prismáticos ou cilíndricos, são ligados à fonte de voltagem que deve ser regulada para cerca de 2V a 3V. Um terminal do voltímetro permanecerá ligado a um dos eletrodos, enquanto o outro servirá como sonda (s) a ser posicionada em qualquer ponto do líquido.

Antes de realizar a experiência propriamente dita, o estudante deverá familiarizar-se com o voltímetro (multímetro) que será utilizado; fazendo algumas leituras de voltagem na escala **AC** apropriada.

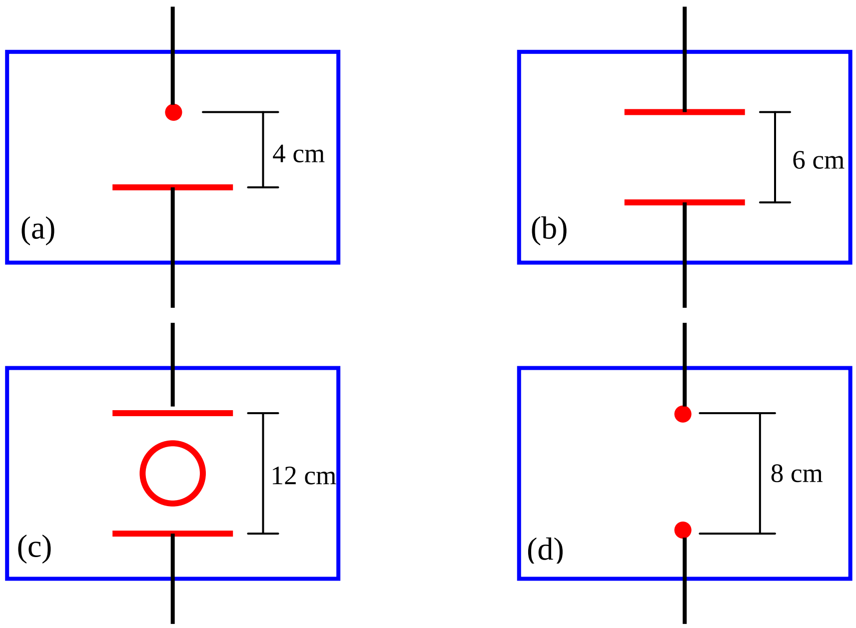


Figura 7.4

Para obter-se uma equipotencial, o procedimento é o seguinte:

(a) Conectar o terminal comum do voltímetro no eletrodo de referência, mantendo-o permanentemente ligado.

(b) O terminal '+' do voltímetro possui uma ponta metálica fina. Ao ser tocada em um ponto qualquer, P, do eletrólito, no caso a água, o voltímetro indicará a d.d.p. entre P e o eletrodo de referência já citado. Deste modo, aquele terminal se comportará como uma sonda móvel e permitirá o conhecimento do potencial, V(P), de um ponto qualquer do eletrólito.

(c) O valor de V(P), será obtido somando-se ao valor do potencial, V_t do eletrodo de referência, o valor da d.d.p. lida no voltímetro. Ao eletrodo de referência (ou a qualquer outro ponto do campo) pode-se atribuir qualquer valor para o potencial elétrico. Em nossos estudos atribuiremos o valor de potencial zero para o eletrodo de referência $V_t = 0V$. Neste caso, os valores dos potenciais dos diversos pontos serão aqueles lidos diretamente no voltímetro.

(d) O mapeamento de uma particular equipotencial será feito movendo-se a sonda de tal modo que a leitura no voltímetro permaneça constante, ou seja, a sonda percorrerá a equipotencial $V(P_0)$.

(e) Ao mesmo tempo, as coordenadas de cada ponto serão lidas em um papel milimetrado que se encontra sob a cuba. Essas coordenadas, bem como os contornos dos eletrodos, deverão ser desenhadas em outro papel milimetrado no qual serão marcados os pontos de uma mesma equipotencial.

(f) Repetir o procedimento descrito anteriormente desenhando-se um número adequado de equipotenciais necessárias ao mapeamento de campo.

(g) Desenhar um conjunto de linhas – ortogonais às equipotenciais obtidas – que constituem as linhas de força do campo.

7.4 - Tarefas

1. Para cada uma das configurações da figura 7.4:

   (a) Trace as equipotenciais e as linhas de força.

   (b) Determine o vetor E em pelo menos um ponto.

2. Desenhe uma linha fechada qualquer, γ, subdivida em N intervalos e determine diretamente o valor da soma: $\sum\left(V_{(i+1)} - V_i\right)$ ao longo do circuito.

   (a) Que valor espera obter para essa soma?

   (b) Qual o valor e significado da integral $\oint_{\gamma} \vec{E}.d\vec{l}$ ao longo do referido circuito?

3. Para qualquer montagem indicada nas fig. 7.4 (a) e 7.4 (b) desenhe, no mapa obtido para as equipotenciais, um quadrado e verifique que:

$$V_c = \frac{1}{4}\left(V_1 + V_2 + V_3 + V_4\right)$$

, onde os pontos 1,2,3 e 4 são os vértices do quadrado e o ponto C é seu centro.

4. Na montagem (c) da figura 7.4 as linhas de força são normais à superfície do anel metálico. Você sabe explicar por quê? E o potencial em seu interior, como pode ser justificado?

5. Aplique o princípio da carga imagem as figuras 7.4 (a) e 7.4 (d) e verifique se ele é verdadeiro.

Experimento 8

A CARGA ARMAZENADA POR UM CAPACITOR

8.1 - Objetivos

Nesta experiência mediremos a quantidade de carga armazenada por um capacitor em função da diferença de potencial aplicada aos seus terminais. Isto nos conduzirá à definição de **capacitância**. Aproveitaremos, também, para estudar a associação de **capacitores em série** e em **paralelo**.

8.2 - Procedimento experimental

- Medida de carga

Em nosso laboratório didático não dispomos de equipamento para medir diretamente a carga de um capacitor que tenha sido previamente carregado. Por causa disto, vamos lançar mão de um método que utiliza a técnica de carregar e descarregar um capacitor através de um medidor de corrente de forma rápida e regular; a carga será medida **indiretamente** a partir da freqüência com que o capacitor é carregado e descarregado e da corrente que atravessa o medidor. Para entender como isto será feito, comece carregando um capacitor colocando os seus terminais em contato com os bornes de uma pilha (siga as instruções do professor). Em seguida, descarregue-o através de um miliamperímetro.

Como deve ter percebido, não é possível registrar a corrente em função do tempo. Se isto tivesse sido possível, a carga seria determinada a partir da área abaixo da curva no gráfico $\underline{i}$ contra $\underline{t}$. Mas há uma maneira de resolver o problema. Se conseguirmos carregar e descarregar o capacitor, completamente, muitas vezes em cada segundo, o miliamperímetro poderá acusar uma corrente (média) estacionária.

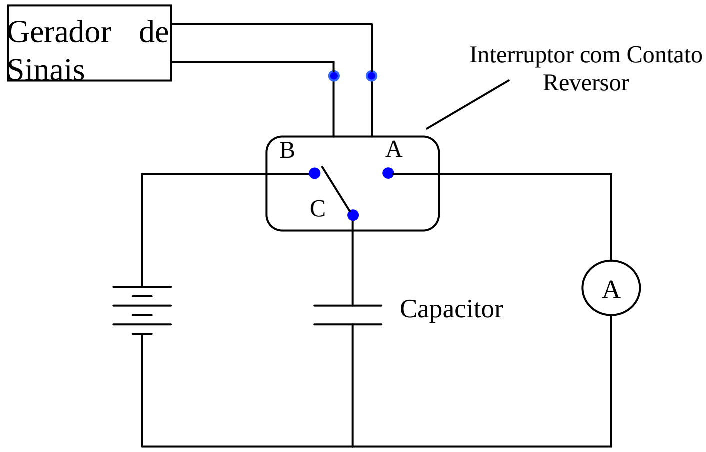


Figura 8.1

Veja como faremos isto observando o circuito representado pela Fig. 8.1.

Quando C estiver em contato com B, o capacitor estará sendo carregado; quando estiver em contato com A, estará sendo descarregado através do miliamperímetro. Se mudarmos a chave de A para B várias vezes por segundo mediremos uma corrente média no miliamperímetro que poderá ser relacionada à carga máxima do capacitor. É evidente que a mudança dos contatos de A para B não poderá ser realizada manualmente. Para isso, usamos uma chave acionada eletricamente chamada de **interruptor de lâminas com contato reversor** ou “reed switch" reversor. Este consiste numa pequena cápsula de vidro dentro da qual existe um contato normalmente fechado e um outro normalmente aberto. Esse dispositivo deve ser colocado no interior de uma bobina para poder operar (Ver fig. 8.2).

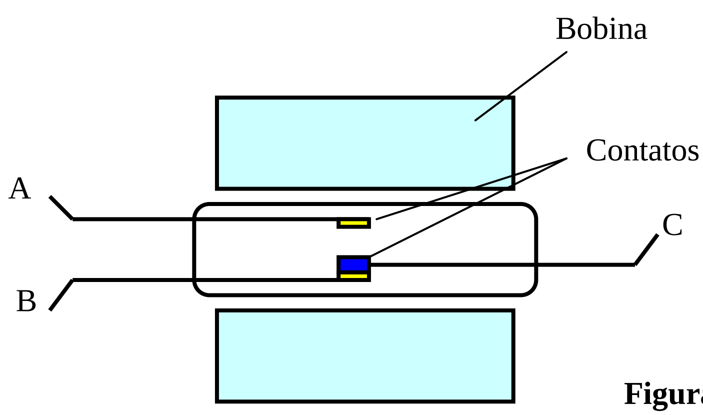


Figura 8.2

Quando nenhuma corrente flui na bobina, C está em contato com B. Quando uma corrente **suficientemente intensa** passa pela bobina, as lâminas A e C (que são feitas de material ferromagnético) tornam-se magnetizadas e atraem-se mutuamente (a lâmina B é feita de material não magnético). Se a corrente que atravessa a bobina for pulsante, a lâmina C será atraída por A tantas vezes quantos forem os pulsos que atravessarem a bobina num certo intervalo de tempo. Assim, se passarem 50 pulsos na bobina num intervalo de tempo, os contatos entre A e C fechar-se-ão e abrir-se-ão 50 vezes e, entre B e C, de modo análogo, também 50 vezes.

Note que, se operarmos o interruptor de lâminas com contato reversor com um sinal alternado, cuja forma de onda é do tipo seno ou co-seno, o sinal variará de valores negativos para positivos e os contatos A e C ficarão permanentemente ligados. Para solucionar este problema colocamos em série com nosso gerador de sinais um elemento de circuito chamado diodo. Este dispositivo deixa a corrente percorrer o circuito num único sentido, ou seja, para um determinado sentido da corrente este elemento oferece resistência praticamente nula, para o sentido inverso, oferece resistência muito alta (infinita).

Assim, usando o interruptor de lâminas com o contato reversor, um gerador de sinais e um diodo para alimentar sua bobina, a operação de carga e descarga poderá ser feita tantas vezes quantas desejarmos, desde que não excedamos o limite de funcionamento do interruptor, que é cerca de 700 hertz (700 ciclos por segundo). Se escolhermos uma freqüência de trabalho igual a f, o capacitor será carregado e descarregado f vezes em cada segundo (lembre-se da definição de freqüência). Se em cada descarga passar uma carga Q pelo miliamperímetro, a carga que passará em 1 segundo será então igual a f.Q. Mas a carga por unidade de tempo é também numericamente igual à corrente média ($i=\Delta q/\Delta t$), de modo que:

$$\mathbf{i = fQ} \qquad \text{ou} \qquad \mathbf{Q = i/f} \qquad (1)$$

- Experiência 1

Agora vamos montar o circuito da Fig. 8.1 empregando uma pilha de 1,5V e um capacitor de 1μF. Observe no interruptor de lâminas com contato reversor o valor da tensão máxima que poderá ser utilizada para alimentá-lo. Cuide para que a tensão fornecida pelo gerador de sinais não exceda a tensão máxima nominal do interruptor de lâminas com contato reversor. **Cuidado: possuímos no laboratório interruptores de lâminas com contato reversor com diferentes valores de tensão**

nominal. Não use a mesma tensão da mesa vizinha, pois os interruptores podem ser diferentes. Em caso de dúvida chame o técnico ou o professor.

Q_1 - Uma vez montado o circuito (usando apenas 1 pilha), meça a corrente que circula pelo miliamperímetro em função da freqüência. Comece com 100 Hz e vá até 600 Hz, variando de 100 em 100 hertz. Complete a tabela abaixo e faça um gráfico de i contra f em um papel milimetrado.

F (Hz)	**i (mA)**	**Q = i/f (c)**
100		
200		
300		
400		
500		
600		

Q_2 - Esse resultado é compatível com a equação 1? Justifique.

Q_3 - a) O que representa a inclinação da reta?

b) Determine a carga máxima armazenada no capacitor a partir da inclinação da reta.

Q_4 – a) A partir desse resultado é possível dizer que o capacitor se carregou (ou descarregou) completamente em cada operação de carga (ou descarga)? Ou seja: as lâminas permaneceram em contato o tempo suficiente para que o capacitor se carregasse (ou se descarregasse) completamente em cada operação de carga (ou descarga)?

b) Usando a relação Q = C V, determine o valor da capacitância C.

Experiência 2

Q_5 - Fixe agora a freqüência em 100 Hz e determine a carga armazenada pelo capacitor quando usar, no circuito da Fig. 8.1 uma única pilha. Em seguida determine a carga quando usar, respectivamente, 2, 3, 4 e 5 pilhas em série. Meça a tensão das associações das pilhas usando o multímetro digital. Coloque seus dados na tabela abaixo e faça um gráfico de Q contra V.

N^{o} de Pilhas	**V (Volts)**	**i (mA)**	**Q = i/f (C)**	**C = Q/V (μF)**
1				
2				
3				
4				
5				

Q$_6$ - A inclinação da reta nesse gráfico é, por definição, a capacitância C do capacitor. Determine, então, a inclinação da reta. Compare o valor encontrado com o valor nominal de seu capacitor. Qual é o desvio porcentual entre o valor encontrado e o valor nominal?

Veja que, neste caso, C=Q/V, pois a reta passa pela origem. Como Q=i/f, resulta, finalmente:

$$\mathbf{C=i/fV} \qquad (2)$$

Experiência 3

Q$_7$ - Parece razoável admitir que o capacitor se carregará mais lentamente se for ligado uma resistência em série com a bateria. Teste essa idéia inserindo no circuito um resistor de 270 Ω em série com a bateria. Depois repita o experimento com um resistor de 2,2 kΩ (use 1 pilha e opere com 100 Hz e depois com 600 Hz). Resuma suas observações na tabela abaixo e tente interpretá-las.

Freqüência (Hz)	**R (Ω)**	**V (V)**	**i (mA)**	**Q = i/f (C)**
100	270			
	2200			
600	270			
	2200			

8.3 - Associação em série e em paralelo

Experiência 4

Q_8 - Meça a capacitância do outro capacitor de seu conjunto, utilizando a montagem da Figura 8.1. Use 1 pilha e opere com 100 ou 200 hertz. Determine C pela fórmula $C = i/fV$ (eq. 2).

Q_9 - Ligue a seguir os dois capacitores em paralelo e meça a capacitância da associação usando f = 100 Hz e uma pilha. Compare o valor encontrado com o valor que esperava teoricamente.

Q_{10} - Repita a experiência ligando os capacitores em série (Opere com 200Hz e use 2 pilhas). Determine a capacitância da associação e compare o valor encontrado com o valor esperado teoricamente.

Experimento 9

CARGA E DESCARGA DE UM CAPACITOR

9.1 – Objetivos

Na prática anterior, mostramos que seria possível determinar a capacitância de um capacitor pela integração da curva da corrente. No entanto, notamos que em nosso laboratório não possuímos registrador suficientemente rápido para registrar os valores da corrente no tempo ou ainda, um amperímetro sensível o suficiente para medir corrente extremamente baixas (quando se associa um resistor em série com o capacitor com a finalidade de aumentar o tempo de carga). Na prática de hoje, iremos carregar e descarregar um capacitor conectado em série com um resistor, mas ao invés de medir a variação da corrente no tempo, mediremos a diferença de potencial sobre o capacitor. Para isso, utilizaremos um amplificador de ganho unitário e altíssimo valor de resistência de entrada conectado ao nosso voltímetro digital. Veremos que a partir dessa medida será possível determinar o valor da capacitância, das tensões $V_R(t)$ no resistor e V(t) no capacitor e outras grandezas do circuito.

9.2 – Teoria

Como variará no tempo a tensão $V_1(t)$ no capacitor C, inicialmente descarregado, depois que a chave S for passada para a posição a? Esta pergunta pode ser respondida lembrando que, pela lei das malhas, $V_0 = V_R(t) + V_1(t)$. Como $V_R(t) = Ri$ e $V_1(t) = q(t)/C$, resulta:

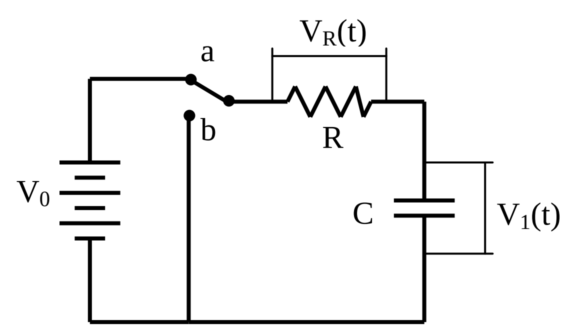


Figura 9.1

$$V_0 = Ri + q(t)/C \quad (1)$$

Essa equação contém as variáveis i e q(t) e somente poderá ser resolvida se tivermos uma outra relação entre i e q(t). Essa relação é i = dq/dt. Substituindo, então, i da eq. (1) por dq/dt, resulta

$$\mathbf{V_0 = R\,dq/dt + q(t)/C.} \qquad (2)$$

Esta é uma equação diferencial não homogênea de 1a. ordem, cuja solução é:

$$q(t) = V_0 C\left(1 - e^{-t/RC}\right) \quad \text{ou} \quad q(t)/C = V_0\left(1 - e^{-t/RC}\right). \qquad (3)$$

Como $q(t)/C = V_1(t)$ resulta, finalmente em:

(Processo de Carga) $$V_1(t) = V_0\left(1 - e^{-t/RC}\right) \qquad (4)$$

Esta equação nos mostra como varia a tensão no capacitor num circuito RC durante o processo de carga do mesmo. A grandeza RC na equação anterior tem dimensão de tempo (uma vez que o expoente deve ser adimensional), e é chamada constante de tempo capacitiva do circuito. É o tempo necessário para que a diferença de potencial no capacitor atinja 63% de seu valor final. Para constatarmos isto, basta substituir t por RC na equação anterior, obtendo $V_1(t) = V_0\,(1-e^{-1}) = 0{,}63\,V_0$, onde V_0 é a tensão no capacitor quando $t \to \infty$.

Suponha agora que a chave S da fig. 9.1 tenha sido deixada na posição a por um tempo t>>RC. O capacitor estará, então, plenamente carregado para todos os propósitos práticos.

Se a chave S for levada a seguir para a posição b (fig. 9.2), como variará a tensão $V_2(t)$ no capacitor (**processo de descarga**)?

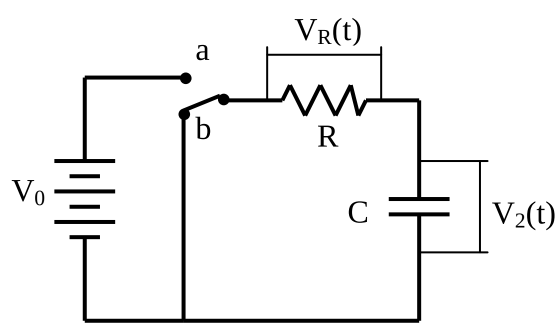


Figura 9.2

Com a chave na posição b não há f.e.m. no circuito e a lei das malhas dá simplesmente $V_R(t) + V_2(t) = 0$ ou $Ri + q(t)/C = 0$. Substituindo i por dq/dt, podemos escrever a equação diferencial: $R\,dq/dt + q(t)/C = 0$ cuja solução é:

$$q(t) = V_0 C\left(e^{-t/RC}\right) \quad \text{ou} \quad \text{q(t)/C=V}_0\left(e^{-t/RC}\right) \qquad (5)$$

Como no processo de descarga q(t)/C = V_2(t) , temos finalmente que:

(Processo de descarga) $$\text{V}_2\text{(t)=V}_0\left(e^{-t/RC}\right) \qquad (6)$$

Esta equação nos mostra como varia a tensão $V_{2(t)}$ no capacitor, num circuito RC, durante o processo de descarga do mesmo. Para t=RC, V_2(t) =V_0 e^{-1}=0,37V_0, ou seja, para t=RC, a tensão no capacitor é reduzida para 37% da tensão no início do processo de descarga.

As curvas características de tensão V_1(t) e V_2(t) no capacitor durante os processos de carga e descarga, respectivamente, são mostradas na Figura 9.3

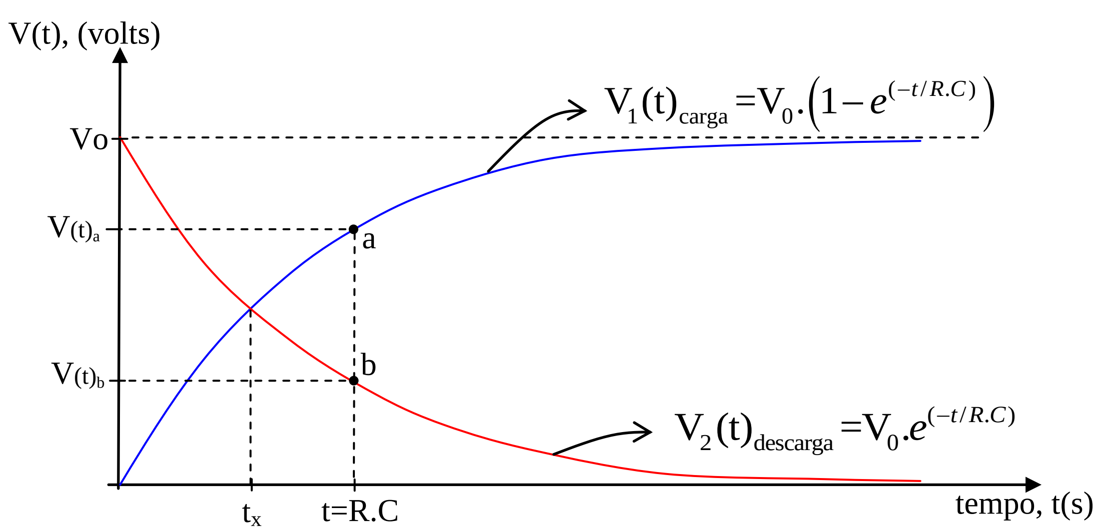


Figura 9.3

9.3 – Parte Experimental

Nesta prática você vai medir, usando um voltímetro muito especial, as tensões V_1 e V_2. O problema é a resistência interna do voltímetro comum que é muito baixa. O ENGRO, por exemplo, tem uma resistência interna de 240 kΩ na escala de 12 volts. Com uma tal resistência, um capacitor com capacitância da ordem do microfarad e carregado poderá descarregar-se rapidamente através da resistência do voltímetro, quando tentarmos medir a d.d.p. aplicada aos seus terminais. Se, por exemplo, C = 1 μF, RC = 240000×10^{-6} = 0,24s. Isto significa que a tensão no capacitor será reduzida para 37% do valor inicial em 0,24s, o que, evidentemente, impede você de tomar nota da leitura da tensão. Assim sendo, para fazer leituras de tensão nesse capacitor, é preciso utilizar um voltímetro com resistência interna maior do que aquela de um voltímetro comum, analógico como o ENGRO. Mesmo os nossos voltímetros digitais, seriam pouco confiáveis para este tipo de medidas. No entanto, a eletrônica moderna nos permite resolver este problema de modo bastante simples e barato; basta acoplar ao multímetro comum um amplificador operacional montando de forma a dar um ganho unitário. No momento, é suficiente saber que este amplificador permite aumentar um milhão de vezes (ou mais) a resistência interna do nosso voltímetro, o que significa aumentar também a constante de tempo capacitiva do circuito de medida em milhão de vezes. Assim, os 0,24s do exemplo anterior seriam multiplicados por 10^6, o que dá um tempo de aproximadamente 50 horas. Ou seja, se ligarmos esse novo voltímetro em paralelo com um capacitor de 1μF carregado, a tensão inicial no capacitor será reduzida de 63% depois de 50 horas (se não houver fugas, evidentemente).

O esquema da fig. 9.3 mostra o nosso voltímetro digital conectado ao amplificador de ganho unitário. Este conjunto é nosso NOVO voltímetro com resistência interna muito alta.

Para aprender a usá-lo, aplique os terminais A e B aos bornes de uma e depois duas pilhas em série e leia as tensões. Leia novamente essas tensões, usando agora **apenas** os terminais do voltímetro comum. Compare as leituras feitas. Faça o mesmo com um capacitor carregado.

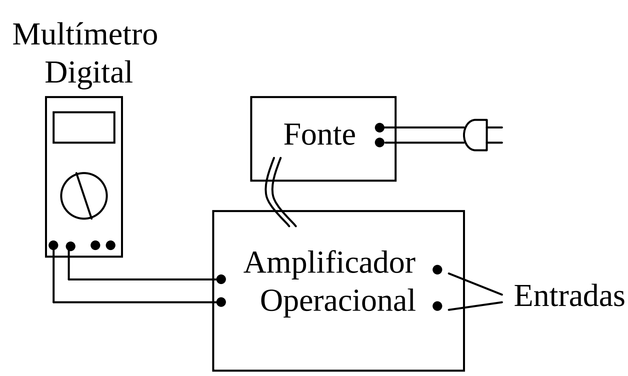


Figura 9.3

Agora vamos carregar um capacitor através de uma resistência de 33MΩ.

O circuito utilizado está indicado na fig. 9.4. Ligue um dos pólos da bateria à extremidade livre da resistência; o outro pólo estará livre para encostar e desencostar numa das extremidades do capacitor (é a nossa chave).

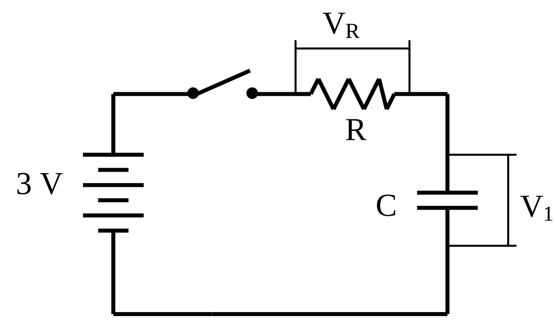


Figura 9.4

Inicialmente, feche um curto sobre o capacitor para descarregá-lo completamente. Retire o curto. Ligue, então, a chave e a cada 10 segundos leia a tensão até atingir cerca de 100s **(NÃO ZERE O CRONÔMETRO; O TEMPO DEVERÁ SER ACUMULADO).** Complete a tabela abaixo com seus resultados.

Vamos agora carregar completamente o capacitor e depois descarregá-lo através da resistência. Para isto, encoste os terminais da pilha diretamente aos terminais do capacitor, observando a polaridade. Retire a pilha e leia, então, a tensão (V_0) no voltímetro; esta será a tensão no instante t = 0.

Em seguida ligue a chave, para iniciar a descarga do capacitor, e meça a ddp V_2 a cada 10s até atingir 100s. Complete a tabela abaixo com seus resultados.

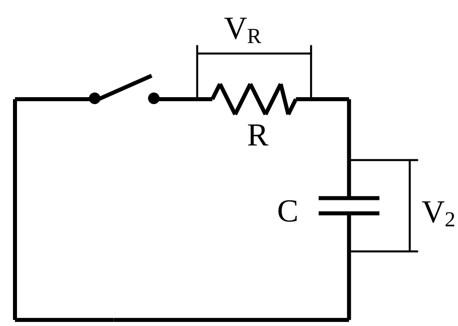


Figura 9.5

Tempo (s)	Carga, $V_{1(t)}$ (volts)	Descarga, $V_{2(t)}$ (volts)	V_1+V_2 (volts)
0			
10			
20			
30			
40			
50			
60			
70			
80			
90			
100			

9.4 - Questões:

Q_1) Com os seus dados construa, um sobre o outro, os gráficos V_1 x t para a carga e V_2 x t para a descarga.

Q_2)

a) Acrescente uma coluna de V_1+V_2 numa de suas tabelas. Compare a soma com a tensão V_o.

b) A partir das equações de carga e descarga, mostre que, para um dado instante, $V_1+V_2=V_o$.

c) Se, para um dado instante, $V_1+V_2=V_o$, então $V_1=V_2=V_o/2$ no ponto de interseção das duas curvas. Verifique se isto realmente acontece com suas curvas.

Q_3) Sabendo que no ponto de interseção $V_1=V_2=V_o/2$, determine uma relação entre R, C e t_i (t_i é a abcissa do ponto de interseção).

Q_4)

a) Determine o produto RC, a partir da relação encontrada em Q_3 e do valor de t_i que é a abcissa do ponto de interseção das duas curvas.

b) Lembrando que $R=33M\Omega$, determine C e compare o resultado com o valor nominal do capacitor.

Q_5)

Tente, a partir do gráfico de carga e da definição de constante de tempo capacitiva do circuito dada na página 53, determinar o valor da constante de tempo capacitiva, RC, do circuito.

Q_6)

a) Aplicando ln a ambos os termos da equação de descarga, verifique que é possível lançar seus dados num papel mono-log.

b) Uma vez feito isto, construa o gráfico de V_2 versus t no papel mono-log.

c) Determine, a partir dele, a constante de tempo capacitiva do circuito.

Experimento 10

CORRENTE ALTERNADA

10.1 - Gerador de f.e.m. senoidal

Um gerador de força eletromotriz (f.e.m.) senoidal fornece entre seus terminais uma tensão do tipo $V = V_m$ sen ωt onde V_m e ω são constantes. V_m é a amplitude máxima (ou valor de pico) da tensão em ambos os sentidos pois os valores máximo e mínimo de sen ωt são, respectivamente, +1 e -1. Além disso, a função **seno** passa por um ciclo completo de variação quando o ângulo avança de 2π radianos; na equação acima o ângulo avança de 2π radianos quando t avança de $2\pi/\omega$ segundos (verifique). Por isso $2\pi/\omega$ é chamado o período (T) da oscilação, pois período, por definição, é o tempo necessário para que a oscilação percorra um ciclo completo, i.e., a cada $2\pi/\omega$ segundos uma nova senoide completa é gerada. Seu recíproco, i.e., o número de oscilações por segundo, é chamado freqüência (f) da oscilação. Desta maneira

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \qquad f = \frac{\omega}{2\pi} \qquad \text{ou} \qquad \omega = 2\pi\,\mathrm{f} = \frac{2\pi}{\mathrm{T}} \qquad (1)$$

A unidade da freqüência é o hertz (Hz): 1 Hz = $1\mathrm{s}^{-1}$.

Símbolo gráfico para o gerador de f.e.m alternada.

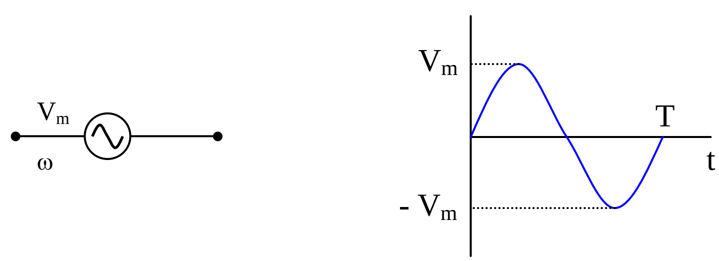


Figura 10.1

Se a tensão alternada é gerada por um alternador simples de polo duplo, então ω é a própria **velocidade angular** do rotor em radianos por segundo.

Qualquer quantidade alternada, **senoidal** pode ser representada pelo seguinte modelo geométrico:

$\overline{OP}$ na fig. 10.2 é um segmento (ou fasor, como costuma ser chamado) que nós imaginamos estar girando a uma velocidade angular constante ω, em torno do ponto O. Se $\overline{OP}$ forma um ângulo θ com a linha $\overline{OA}$, então θ = ωt, onde t é o tempo para o fasor girar de A a P. As projeções de $\overline{OP}$ sobre $\overline{OB}$ e $\overline{OA}$ são respectivamente

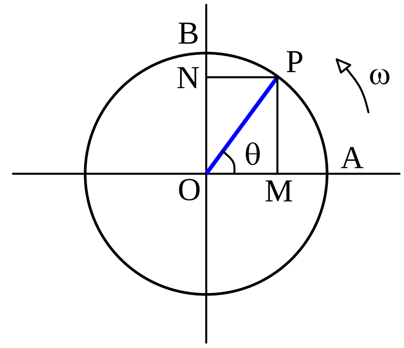


Figura 10.2

$$\overline{ON} = \overline{OP}\ \text{sen}\,\omega t \qquad e \qquad \overline{OM} = \overline{OP}\cos\omega t. \qquad (2)$$

Dizemos que $\overline{OP}$ senωt e $\overline{OP}$ cosωt são as **componentes do fasor** $\overline{OP}$ nas direções $\overline{OB}$ e $\overline{OA}$. Agora, se fizermos o comprimento do fasor $\overline{OP}$ ser proporcional ao valor de pico da quantidade alternada a ser representada, então a projeção de $\overline{OP}$ segundo uma direção convenientemente escolhida dará o seu **valor instantâneo** (fig. 10.3).

O ângulo θ neste modelo é chamado **a fase** da quantidade alternada (tensão ou corrente, por exemplo). Desta maneira, a **descrição completa** de uma quantidade alternada senoidal requer a especificação de:

i) sua freqüência;
ii) sua amplitude (valor de pico) e
iii) sua fase.

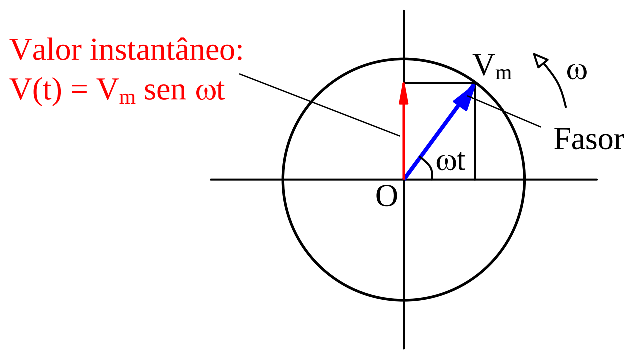


Figura 10.3

O modelo de fasor fornece um meio simples de mostrar as relações entre quantidade alternadas, como veremos logo mais.

10.2 - Comportamento dos elementos R, C em circuitos C.A.

Os estudos que serão feitos a seguir terão como hipótese inicial que os componentes de circuitos utilizados, resistores, capacitores e indutores são ideais, ou seja, não apresentam a combinação de efeitos resistivos, capacitivos e indutivos. Elementos de circuitos puros geralmente não ocorrem em nossa vida real, mas, em certas condições experimentais, podem se aproximar muito dos ideais. No decorrer dos experimentos que se seguem, será possível identificar cada uma dessas situações.

a) Resistência

A figura 10.4 representa a situação experimental na qual um resistor puro está submetido a um sinal de corrente alternada. Como em cada instante a lei de Ohm deve ser obedecida na resistência, resulta:

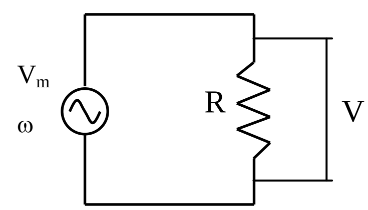


Figura 10.4

$$i = \frac{V}{R} = \frac{V_m}{R}\,\mathrm{sen}\,\omega t. \qquad (3)$$

Fazendo $V_m\ /R = I_m$,

teremos:

$$i = I_m\,\mathrm{sen}\ \omega t \qquad (4)$$

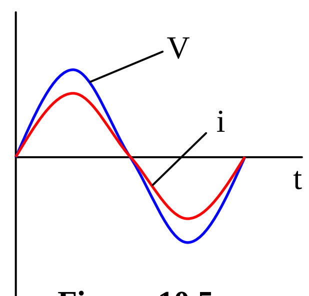


Figura 10.5

Vemos que a corrente e a tensão estão **em fase** pois ambas iniciam seus ciclos ao mesmo tempo (máximo de uma coincide com o máximo da outra e assim por diante; ou ainda: a fase de ambas é ωt).

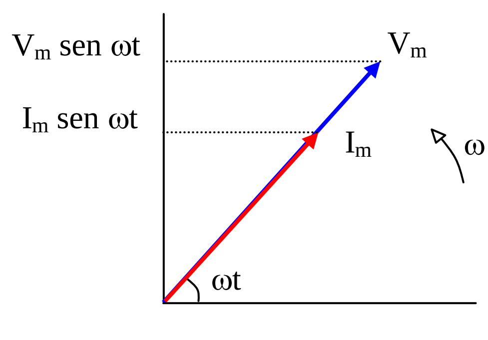


Figura 10.6

O diagrama de fasores está representado na 10.6. As flechas de comprimento V_m e I_m girando a uma velocidade angular ω representam os fasores da tensão e da corrente. Elas estão na mesma direção porque estão **em fase**.

A potência instantânea fornecida pelo gerador à resistência é dada por P = V.i, portanto P = (V_m senωt) (I_m senωt) = V_m I_m sen$^2\omega$t = (V_m I_m/2)(1-cos2ωt). A potência média dissipada será:

$$\overline{P} = \frac{1}{T}\int_0^T V\,i\;dt = \frac{1}{T}\frac{V_m I_m}{2}\int_0^{T=2\pi/\omega}\left(1-\cos 2\omega t\right)dt \qquad (5)$$

$$= \frac{1}{T}\frac{V_m I_m}{2}\cdot T = \frac{V_m I_m}{2} \quad \therefore \quad \overline{P} = \frac{V_m I_m}{2}\,. \qquad (6)$$

Podemos, com um artifício algébrico, fazer essa fórmula ficar análoga à expressão da potência fornecida por um gerador de f.e.m. constante.

Basta, para isso, definir $V_{ef} = V_m/\sqrt{2}$ e $I_{ef} = I_m/\sqrt{2}$. Assim:

$$\overline{P} = \frac{V_m I_m}{2} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}\cdot\frac{I_m}{\sqrt{2}} = V_{ef}\cdot I_{ef} \qquad (7)$$

Portanto

$$\overline{P} = V_{ef}\cdot I_{ef} \qquad (8)$$

Em outras palavras: Se um resistor de resistência R for alimentado por um gerador de f.e.m. V = V_m senωt, a potência que dissipará será igual àquela dissipada quando for alimentado por um gerador de f.e.m. constante e igual a $V_{ef} = V_m/\sqrt{2}$. Com esta definição, a tensão eficaz no resistor será dada por:

$$V_{ef,R} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{RI_m}{\sqrt{2}} = R\,I_{ef} \quad \Rightarrow \quad V_{ef,R} = R\,I_{ef} \qquad (9)$$

Isto mostra que, o fato de se ter introduzido o conceito de **valor eficaz,** permite utilizar os mesmos métodos de cálculo que foram utilizados nos circuitos de corrente contínua.

IMPORTANTE: Os **valores eficazes de tensão e corrente** são os valores obtidos **quando utiliza-se o multímetro** para a medida. Sempre que você obtiver um valor de tensão ou corrente com o multímetro (em um circuito de corrente alternada) será o valor eficaz, ou seja, $V_m/\sqrt{2}$ ou $I_m/\sqrt{2}$. Os valores V_m e I_m podem ser obtidos com um osciloscópio, que será o ultimo experimento da apostila, onde alem dos valores de tensão e corrente alternada pode-se verificar as formas de onda de cada sinal.

b) Capacitância

Em cada instante, a carga no capacitor é dada por $q = CV$, onde $dq/dt = i = C\, dV/dt$. Mas $dV/dt = V_m \omega C \cos \omega t$, logo $i = V_m \omega C \cos \omega t$. Nessa expressão $V_m \omega C$ tem dimensão de corrente, já que $\cos \omega t$ é **adimensional**. Fazendo, então , $V_m \omega C = I_m$, resulta:

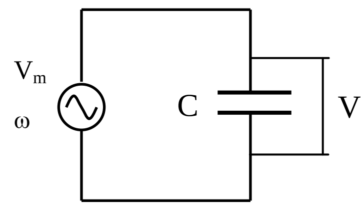


Figura 10.7

$$i = I_m \cos \omega t \qquad (10)$$

De $V_m \omega C = I_m$ resulta, também, $V_m = (1/\omega C) I_m = X_C I_m$, onde $X_C = 1/\omega C$ é definido como reatância capacitiva. Note que ela é dada em ohms. Portanto, $V_m = X_C I_m$ e ainda (dividindo-se ambos lados da equação por $\sqrt{2}$), temos:

$$V_{ef,C} = X_C I_{ef} \qquad (11)$$

Esta última expressão é idêntica à lei de Ohm.

Os gráficos para **V** e **i** estão dados na fig. 10.8. Eles nos mostram que o ciclo da corrente se inicia 1/4 de ciclo antes que o da tensão. Diz-se, neste caso, que a corrente está adiantada de 90^o com relação à tensão.

Os fasores, fig. 10.9, formam 90^o entre si porque a corrente está adiantada de 90^o com relação à tensão.

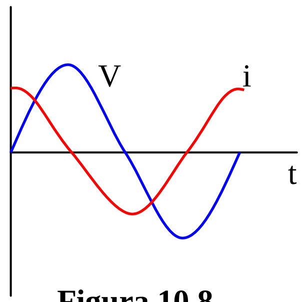


Figura 10.8

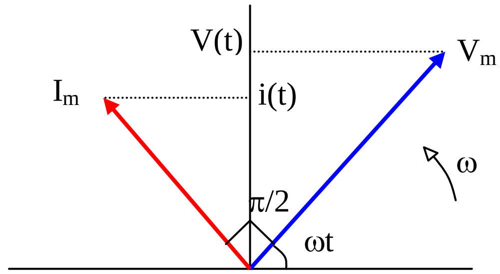


Figura 10.9

Assim,

$$i = I_m \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \qquad (12)$$

com $\phi = + \pi/2$.

ϕ é o angulo de fase entre a tensão e a corrente.

Para potência instantânea temos:

$$P = V\, i = V_m I_m \operatorname{sen} \omega t \cos \omega t = \frac{V_m I_m}{2} \operatorname{sen} 2\omega t \quad \text{e}$$

$$\overline{P} = \frac{1}{T}\int_0^T V\, i\, dt = \frac{1}{T}\int_0^T \operatorname{sen} 2\omega t\, dt = \frac{1}{T}\frac{V_m\, I_m}{2.2\omega}\left(-\cos 2\omega t\right)\Big|_0^{T=2\pi/\omega} = 0$$

$$\therefore \qquad \overline{P} = 0 \qquad (13)$$

c) Circuito RC

Considere o circuito da figura 10.10. Aplicando a Lei das Malhas neste circuito obtêm-se.

$$V(t) = V_R + V_C = Ri + q/C$$

Ou

$$Ri + \frac{1}{C}\int i\, dt = V(t) \qquad (14)$$

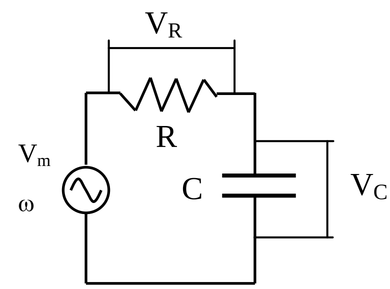


Figura 10.10

Como os elementos do circuito, V(t), R e C estão em série, a corrente em cada um é a mesma. Analisando os circuitos anteriores, verifica-se que para uma tensão oscilante temos uma corrente também oscilante e de mesma freqüência. Contudo, a corrente e a tensão podem estar defasadas. Assim, a solução geral para a equação 14 é da forma.

$$i(t) = I_m \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \qquad (15)$$

Com I_m e ϕ a serem determinados.

Podemos determinar I_m e ϕ usando um diagrama de fasores. Desta forma, nossa solução ficará completa.

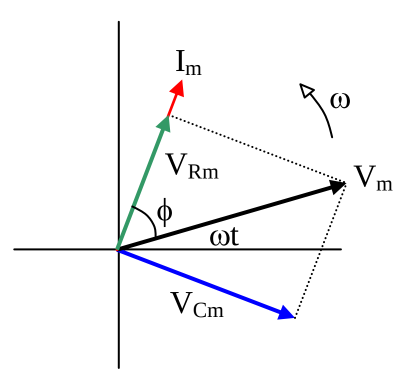


Figura 10.11

Na figura 10.11, pode-se observar o diagrama de fasores para um circuito RC. Note que, como mostrado anteriormente, a corrente e a ddp máxima do resistor, V_{Rm}, estão em fase enquanto que, V_{Cm}, que é a ddp máxima no capacitor está atrasada de $\pi/2$ em relação a corrente. V_m á a amplitude máxima do potencial aplicado. Assim, da figura 10.11 temos que:

$$V_m^2 = V_{Rm}^2 + V_{Cm}^2$$

Mas, $V_{Rm} = R\, I_m$ e $V_{Cm} = X_C\, I_m$, então,

$$V_m = \sqrt{R^2 + X_C^2}\; I_m \quad \Rightarrow \quad V_m = Z\, I_m$$

Onde Z é definido como a **impedância do circuito.**

Lembrando que dividindo-se ambos lados da equação por $\sqrt{2}$, temos a definição de valores eficazes:

$$V_{ef} = Z\, I_{ef} \qquad (16)$$

Assim, pode-se obter o valor de I_m (ou I_{ef}) a partir de valores conhecidos.

$$I_m = \frac{V_m}{Z} = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \qquad (17)$$

Do diagrama pode-se obter também o valor de ϕ:

$$Tg\phi = \frac{V_{Cm}}{V_{Rm}} = \frac{X_C}{R} \quad \Rightarrow \quad \phi = arctg\,\frac{X_C}{R} \qquad (18)$$

Num circuito RC a potência média é dada por:

$$\overline{P} = V_{ef} \cdot I_{ef} . \cos\phi \qquad (19)$$

10.3 - Parte Experimental

a) Objetivos

1. Verificar que as tensões num resistor e num capacitor em série com uma fonte de tensão do tipo $V = V_m$ sen ωt obedecem, respectivamente, as relações $V_R = R\ I$ e $V_C = X_C\ I$.
2. Verificar que a tensão eficaz total obedece a relação $V_{ef} = Z\ I_{ef}$ e que $V^2 = V_R^2 + V_C^2$.

b) Procedimento Experimental

1. Ligue o capacitor de 3,3 μF, o resistor de 470 Ω e amperímetro, fornecidos pelo professor, em série com o gerador de áudio, colocando a chave apropriada no modo tensão senoidal.
2. Fixe a freqüência em 100 Hz e ajuste a tensão de saída em 5 V.
3. Em seguida ligue o gerador ao circuito. Meça as tensões na saída do gerador (V), no resistor (V_R) e no capacitor (V_C) e a corrente do circuito I. Lembre-se que nossos voltímetros e amperímetros fornecem valores eficazes.
4. Modifique a freqüência para 200 Hz e meça novamente V, V_R, V_C e a corrente I.
5. Faça $V_R + V_C$ para as freqüências de 100 e 200 Hz. Você obteve a tensão total aplicada de 5 V? Explique o motivo da diferença.
6. Faça um diagrama de fases e determine a partir deste diagrama a tensão total V e o ângulo de fase entre a tensão e a corrente (para 100 e 200 Hz). Compare o valor de V com o fixado no item 2.
7. Varie a tensão no gerador de 1 até 6 V (de 1 em 1 volt) e meça as tensões e as correntes para f = 100 Hz. Coloque seus dados na tabela abaixo.

Tensão (V)	**V_R (V)**	**V_C (V)**	**I (mA)**

8. Construa os gráficos V x I, V_R x I e V_C x I num mesmo papel milimetrado.
9. Que conclusões pode tirar dos gráficos do item 8?
10. Que significa a inclinação de cada uma das retas obtidas?
11. A partir dessas inclinações, calcule a resistência R, a reatância capacitiva X_C e a impedância Z.
12. A partir de X_C determine a capacitância do capacitor e compare-a com seu valor nominal.
13. Determine a defasagem entre a tensão total e a corrente a partir de X_C e R.
14. Determine as amplitudes máximas da corrente e das tensões medidas no item 3.
15. Determine a potência dissipada neste circuito.

Experimento 11

CORRENTE ALTERNADA
(continuação)

11.1 - Comportamento da Indutância (L)

Seja um gerador que fornece entre seus terminais uma tensão do tipo $V = V_m \operatorname{sen}\omega t$, ligado em série com um indutor de indutância L (figura 11.1). A tensão V_L aplicada no indutor será:

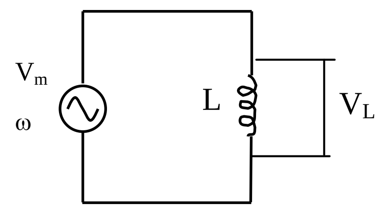


Figura 11.1

$$V_L = L\,\frac{di}{dt} = V_m \operatorname{sen}\omega t. \qquad (1)$$

(Lei das malhas e definição de indutância)

Portanto, $L di = V_m \operatorname{sen}(\omega t)\, dt$ e $i = -\dfrac{V_m}{\omega L}\cos\omega t$. (2)

Nessa expressão $V_m/\omega L$ tem dimensão de corrente já que $\cos\omega t$ é adimensional. Fazendo, então, $\dfrac{V_m}{\omega L} = I_m$ resulta:

$$i = -I_m \cos\omega t = -\,I_m \operatorname{sen}(\omega t + \pi/2) = I_m \operatorname{sen}(\omega t - \pi/2)$$

Portanto, $i = I_m \operatorname{sen}(\omega t - \pi/2)$ (3)

De $V_m/\omega L = I_m$ resulta, também, $V_m = (\omega L)\, I_m = X_L\, I_m$ onde $X_L = \omega L$ é definido como **reatância indutiva** que tem dimensão de resistência e, portanto é dado em ohms.

Logo $V_m = X_L\ I_m$ ou, dividindo a expressão por $\sqrt{2}$, $V_{ef} = X_L\ I_{ef}$, tem-se uma expressão análoga à Lei de Ohm)

Os gráficos e o diagrama de fasores para **V** e **i** são :

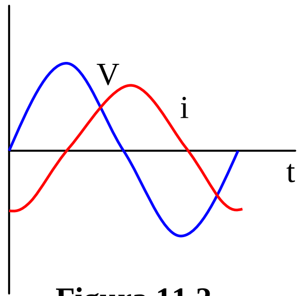


Figura 11.2

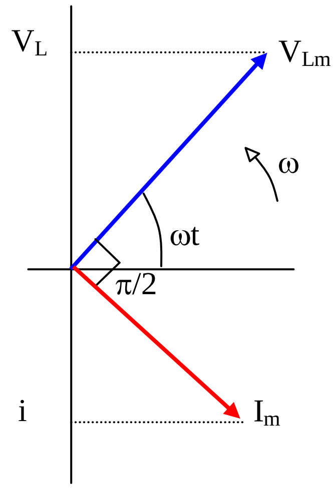


Figura 11.3

Eles nos mostram que V_{Lm} está adiantada em relação a I_m , isto é, à medida que o tempo passa, V_L atinge o seu máximo um quarto de ciclo antes de **i** fazê-lo.

Diz-se, então, que a tensão está adiantada de 90° em relação à corrente ou que a corrente está **atrasada** de 90° em relação à tensão.

Para a potência instantânea temos:

$$P = V\,i = -V_m I_m \operatorname{sen}\omega t \cos\omega t = -\frac{V_m I_m}{2}\operatorname{sen}2\omega t\,.$$

$$\overline{P} = \frac{1}{T}\int_0^T V\,i\,dt = -\frac{1}{T}\frac{V_m I_m}{2}\int_0^{T=\frac{2\pi}{\omega}} sen\,2\omega t\,dt = 0 \qquad (4)$$

portanto, $\overline{P} = 0$, como no caso do capacitor.

11.2 - O Circuito RL

Considere os elementos de circuito R e L conectados em série e submetidos a um potencial da forma $V = V_m \operatorname{sen}(\omega t)$, figura 11.4.

Nesta condição temos:

$$V_R + V_L = V \qquad (5)$$

ou

$$R\,i + L\frac{di}{dt} = V$$

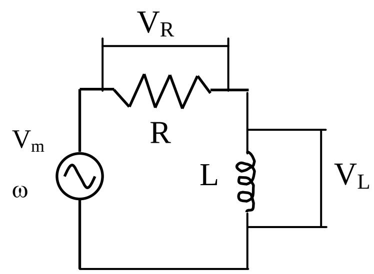


Figura 11.4

Como nos casos anteriores, pode-se supor que a solução desta equação diferencial também será oscilante e com a mesma freqüência da fonte.

$$I = I_m \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \qquad (6)$$

As grandezas desconhecidas nesta expressão, I_m e ϕ podem ser obtidas pela análise do diagrama de fasores, figura 11.5.

Da figura pode-se obter:

$$V_m^2 = V_{Rm}^2 + V_{Lm}^2 \qquad (7)$$

Lembrando que $V_{Rm} = R\, I_m$ e que $V_{Lm} = X_L\, I_m$, temos:

$$I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \quad \Rightarrow \quad I_m = \frac{V_m}{Z} \qquad (8)$$

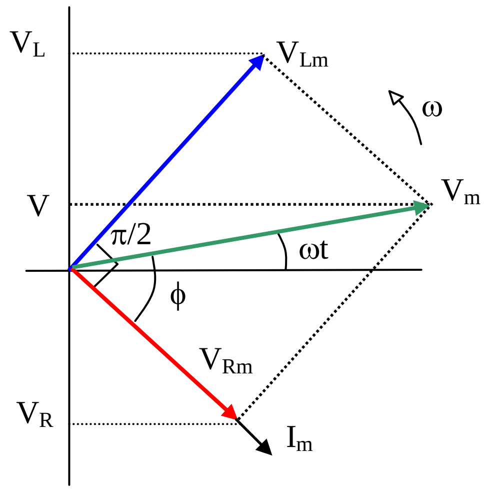


Figura 11.5

O módulo do angulo ϕ é dado por:

$$tg\,\phi = \frac{V_{Lm}}{V_{Rm}} = \frac{X_L}{R} \quad \Rightarrow \quad \phi = arctg\,\frac{X_L}{R} \qquad (9)$$

A potência dissipada neste circuito, ocorre somente no resistor sendo dada por:

$$P = V_{R,ef}\, I_{ef} \;\Rightarrow\; P = V_{ef}\, I_{ef} \cos\phi$$

11.3 - Parte Experimental I – Estudo de um Circuito RL (Caso Real)

No tratamento feito até o momento, todos elementos do circuito foram considerados ideais, ou, como já mencionamos, elementos puros. Os resistores e capacitores se aproximam muito do ideal nos limites impostos pelos nossos experimentos. No entanto, toda bobina tem uma certa resistência que pode interferir muito no resultado de nossas medidas. Nesse caso, a tensão aplicada à bobina (V_B) tem duas componentes: a primeira corresponde à tensão aplicada na indutância (V_L) e a segunda à tensão aplicada na parte resistiva da bobina $(V_{R.B})$, que está em fase com a corrente. (V_B é a tensão que se mede numa bobina não ideal, isto é, é a grandeza a qual se tem acesso diretamente).Veja como proceder na prática para este caso.

1. Monte uma bobina de 3600 espiras, um resistor de 180 Ω e o amperímetro digital em série com o gerador de áudio, colocando a chave no modo tensão senoidal.
2. Fixe a freqüência em 100 Hz.
3. Fixe a tensão de saída do gerador em 4V.
4. Em seguida, meça a tensão total (V), a tensão no resistor (V_R), a tensão na bobina (V_B) e leia a corrente I. A partir destes dados, determine a impedância do circuito (Z = V/I) e a resistência do resistor R.
5. Se a bobina fosse ideal, a corrente estaria atrasada de 90^0 em relação à tensão V_L. Como no resistor a corrente e a tensão estão em fase, o diagrama de fasores das tensões seria então semelhante ao da figura 11.5. A bobina, no entanto, possui resistência ôhmica, de modo que o diagrama para este caso deve ser diferente do apresentado na figura 11.5. Para construir o diagrama de fasores para este caso, comece desenhando no papel milimetrado, em escala e no eixo horizontal, o fasor V_R (tensão no resistor). Com o centro na origem deste fasor, trace um arco de círculo de raio V e com o centro na extremidade de V_R, trace um novo arco com raio V_B. Procedemos dessa forma, pois vimos que os fasores se adicionam como se fossem vetores. A partir do diagrama, determine $V_{R,B}$ e V_L (figura 11.6). $V_{R,B}$ representa a queda

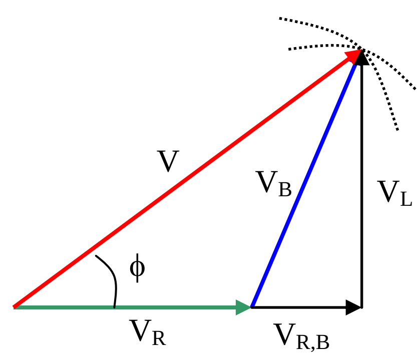


Figura 11.6

de tensão devido à resistência ôhmica da bobina e V_L a queda da tensão devido à indutância da bobina.

6. A partir do item 5, determine a resistência $R_B = V_{R,B}/ I$, a reatância indutiva $X_L = V_L/ I$ e a indutância L da bobina.
7. Determine a defasagem ϕ entre a corrente I e a tensão total aplicada V. Lembre-se que a corrente I está em fase com a tensão V_R.
8. Calcule a potência dissipada neste circuito.

11.4 - O Circuito RLC

Observe o circuito da figura 11.7. Para um dado instante vale a relação:

$$V = V_R + V_C + V_L , \qquad (10)$$

onde V, V_R , V_C e V_L , **são tensões instantâneas**.

Substituindo cada termo da eq. 10 pela expressão correspondente resulta a seguinte equação diferencial integral:

$$V_m \text{sen}\omega t = Ri + L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int idt \qquad (11)$$

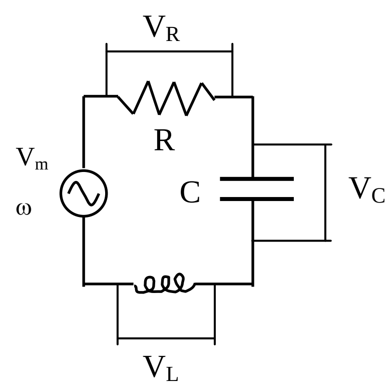


Figura 11.7

A solução (estacionária) da equação 11 pode ser encontrada por tentativa. De fato, quando havia apenas R no circuito, a solução era $i = I_m \text{sen}\omega t$; quando havia somente C, a solução era $i = I_m \text{sen}(\omega t + \pi/2)$ e, finalmente, quando havia apenas L, a solução era $i = I_m \text{sen}(\omega t-\pi/2)$. Quando os três elementos estiverem ligados em série, a solução deve ser do tipo $i = I_m \text{sen}(\omega t + \phi)$. Quando isto é feito, verifica-se que esta é realmente solução da equação e que as constantes são dadas por:

$$I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \left(X_L - X_C\right)^2}} \qquad (12)$$

e

$$\phi = arctg\frac{X_L - X_C}{R} \qquad (13)$$

O denominador $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ é chamado **impedância do circuito** (similar à resistência equivalente do circuito) e X_L - X_C é denominada **reatância**. Portanto:

$$I_m = \frac{V_m}{Z} \Rightarrow \frac{V_m}{\sqrt{2}} = Z\frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad ou \quad \mathrm{V}_{ef} = ZI_{ef} \qquad (14)$$

Se usarmos letras maiúsculas, sem o índice **ef,** para representar as tensões e as **correntes eficazes**, teremos V = ZI.

A expressão $\mathrm{I_m} = \dfrac{\mathrm{V_m}}{\sqrt{\mathrm{R}^2 + (\mathrm{X_L} - \mathrm{X_C})^2}}$ pode ser escrita em termos de valores eficazes como: $(\mathrm{RI})^2 + (\mathrm{X_L I} - \mathrm{X_C I})^2 = \mathrm{V}^2$ ou $\mathrm{V_R^2} + (\mathrm{V_L} - \mathrm{V_C})^2 = \mathrm{V}^2$, onde $\mathrm{V_R}, \mathrm{V_L}, \mathrm{V_C}$ e V são, respectivamente, as tensões eficazes em R, L, C e na saída da fonte. Portanto:

$$\mathrm{V} = \sqrt{\mathrm{V_R^2} + (\mathrm{V_L} - \mathrm{V_C})^2} \qquad (15)$$

Isto nos mostra que as tensões eficazes podem ser adicionadas como se fossem os vetores representados na figura 11.8 que se segue:

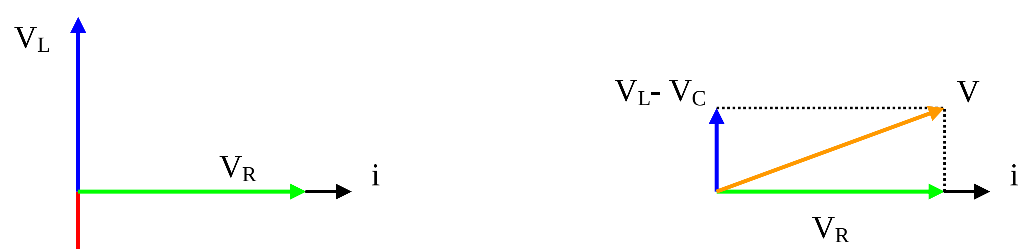


Figura 11.8

A expressão $\mathrm{V} = \sqrt{\mathrm{V_R^2} + (\mathrm{V_L} - \mathrm{V_C})}^2$ representa o módulo do "vetor" (fasor) resultante. Se o diagrama de fasores fosse "**congelado**" no instante t = 0, teria o mesmo aspecto da figura acima; só a escala seria diferente.

11.5 - Parte Experimental II - Estudo de um Circuito RLC (Caso Real)

1. Monte o circuito da figura 11.9.

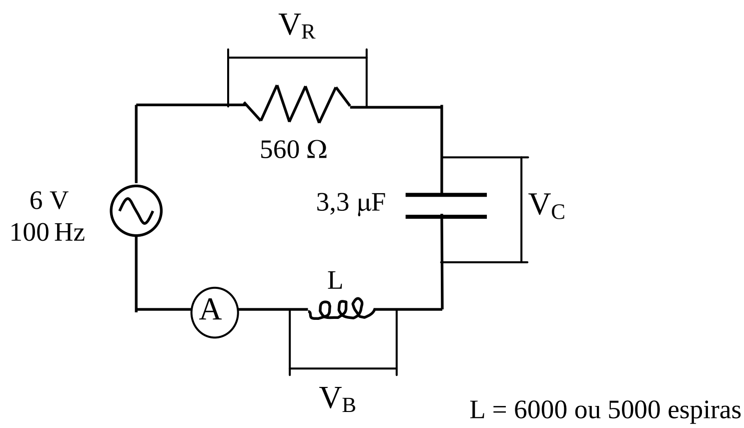


Figura 11.9

2. Posicione, lentamente, o botão da amplitude do gerador de áudio até que a tensão indicada seja de 6 V.
3. Anote a corrente, medida pelo amperímetro A e as tensões no resistor (V_R), no capacitor (V_C) e na bobina (V_B).
4. Calcule inicialmente, a partir de suas medidas,
   a) a impedância do circuito;
   b) a resistência do resistor ôhmico R;
   c) a reatância capacitiva do capacitor e
   d) a capacitância do capacitor.

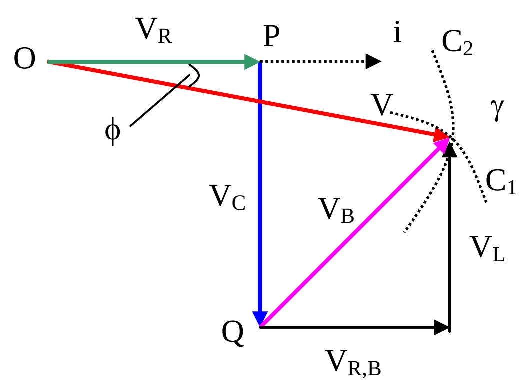


Figura 11.10

5. Queremos agora a reatância indutiva do circuito e a resistência ôhmica da bobina. Para isto, é preciso desenhar o diagrama de fasores, lembrando que V_R , V_C e V_B se adicionam como se fossem grandezas vetoriais, dando como resultante a tensão V. Isto está feito na figura 11.10, onde V_R e V_C podem ser traçados imediatamente porque sabemos que os segmentos que os representam são perpendiculares entre si. Para traçar V_B e V, basta perceber que o ponto γ na

figura dista V_B do ponto Q e V do ponto O. Ora, mas os pontos que distam V_B de Q estão sobre uma circunferência (C_1) de raio V_B e centro Q, e os pontos que distam V de O estão sobre uma circunferência (C_2) de raio V e centro O. A interseção de C_1 com C_2 nos dá justamente o ponto γ que dista V_B de Q e V de O.

6. Construa, então, o diagrama de fasores acima, em escala, começando por V_R e V_C . Com centro na extremidade de V_C trace uma circunferência de raio V_B , e, com centro na origem de V_R , trace outra circunferência com raio V. O ponto da intersecção das duas circunferências coincide com as extremidades de V e V_B . Neste diagrama, a componente vertical (V_L) de V_B indica a tensão na indutância (bobina ideal) e a componente horizontal $V_{R,B}$, a tensão na resistência R_B da bobina.

7. A partir de $V_{R,B}$ e de V_L determine:
    a) a resistência R_B da bobina,
    b) a reatância indutiva da bobina e
    c) a indutância L da bobina.

    Com os dados disponíveis determine, finalmente,

    d) a reatância do circuito e
    e) a defasagem entre a corrente e a tensão total (lembre-se que a corrente está em fase com as tensões V_R e $V_{R,B}$). Para completar, verifique o que acontece com a corrente quando você introduz um núcleo de ferro no interior da bobina.
    f) Calcule a potência dissipada no circuito.

Experimento 12

O OSCILOSCÓPIO

12.1 - Introdução

O osciloscópio, assim como o multímetro, é um instrumento básico de medidas elétricas. Apesar de sua complexidade, pode ser considerado como sendo um voltímetro de várias escalas em que se pode observar a forma do sinal medido. O elemento mais importante de um osciloscópio é o tubo de raios catódicos, que contém essencialmente:

a) uma fonte de elétrons que emite, acelera e focaliza elétrons;
b) um sistema de placas defletoras;
c) um indicador sensível à presença dos elétrons (anteparo fluorescente ou tela).

Um diagrama geral do tubo é dado na figura 12.1. Os elétrons são emitidos de um filamento incandescente ou de uma superfície de óxido aquecida indiretamente (catodo), e atravessam um conjunto de lentes eletrostáticas (sistema de grades e anodos), cuja função é agrupar os elétrons num feixe paralelo de aproximadamente $1mm^2$ de seção reta. Este feixe atravessa um sistema de placas defletoras, duas verticais e duas horizontais, que são capacitores planos em cujas placas se pode aplicar tensões externas (sinais). Após atravessar estas placas, os elétrons incidem num anteparo fluorescente onde produzem um ponto luminoso cuja posição pode ser alterada pela aplicação de diferenças de potenciais entre as placas defletoras; com os dois sistemas de placas, é possível deslocar os elétrons nas direções horizontal e vertical (ou x e y) na tela.

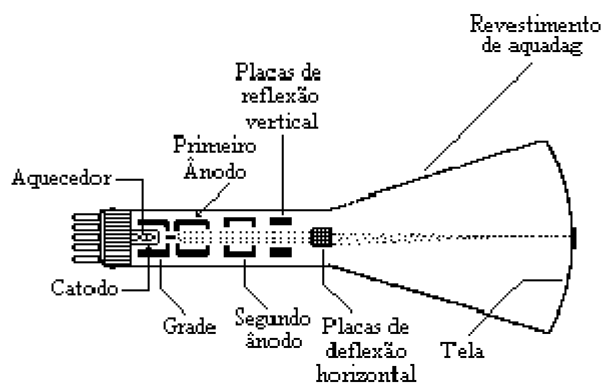


Figura 12.1

A questão que surge é: como será o deslocamento do ponto na tela em função da diferença de potencial aplicado às placas defletoras? Será este deslocamento proporcional ao potencial aplicado?

Para responder esta questão calculemos em primeiro lugar, a velocidade do elétron depois que foi acelerado pela ddp. entre o catodo e o anodo.

Na figura 12.2, representamos de maneira simplificada o catodo e o último anodo do conjunto de lentes eletrostáticas, submetidos a uma ddp. U. O elétron emitido pelo filamento terá, ao sair pelo orifício do anodo (com velocidade v_0), uma energia igual à carga do elétron multiplicado pela ddp. entre o catodo e o anodo K_c = e.U (**e** é a carga do elétron). Como essa energia é convertida totalmente em energia cinética, resulta:

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = eU$$

ou

$$v_0^2 = \frac{2eU}{m}$$

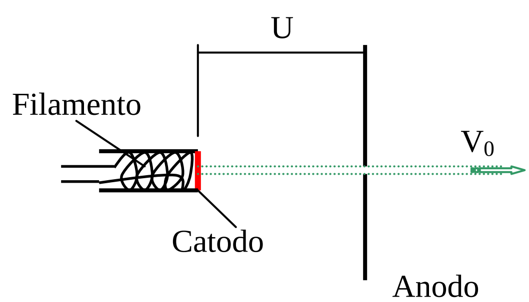


Figura 12.2

Esta é a velocidade com que cada elétron vai penetrar no sistema de placas defletoras. Se uma ddp U_y é aplicada entre as placas responsáveis pela deflexão na direção y (por exemplo), aparecerá um campo elétrico E_y uniforme entre as placas, separadas por uma distância d, dado por $E_y = U_y/d$. O elétron, ao atravessá-las com velocidade v_0, ficará, por isso, sujeito a uma força atuando na direção vertical dada por $F_y = eE_y = eU_y/d$ e a uma aceleração na direção vertical dada por $a_y = F_y/m = eU_y/md$. Em razão dessa aceleração, o elétron adquire uma componente vertical de velocidade ao final das placas defletoras dada por:

$$v_y = a_y \Delta t = \frac{eU_y}{md}\Delta t = \left(\frac{eU_y}{md}\right)\left(\frac{D}{v_o}\right) \qquad (1)$$

onde Δt é o tempo que o elétron com velocidade v_0 permanece na região entre as placas e D é o comprimento das placas (ver figura 12.3). Portanto,

$$v_y = \frac{eU_y}{md} \cdot \frac{D}{v_0} \qquad (2)$$

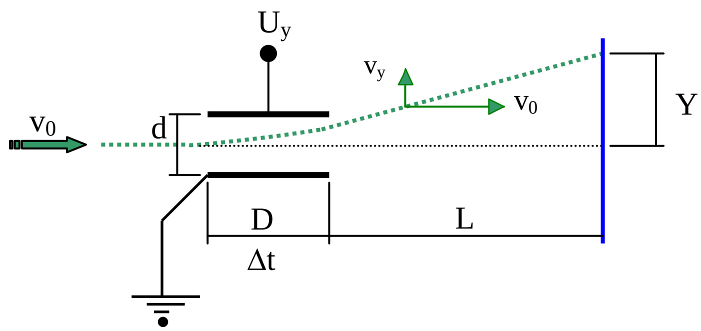


Figura 12.3

Para calcular a distância Y, temos de considerar dois deslocamentos diferentes sofrido pelo elétron. Um destes deslocamentos ocorre quando o elétron está sob ação do campo elétrico no interior das placas defletoras, que chamaremos de h_1. O outro, quando este passa para a região entre as placas e a tela, chamaremos de h_2. Assim, $Y = h_1 + h_2$. h_1 será dado por:

$$h_1 = \frac{1}{2} a_y \Delta t^2 = \frac{1}{2} \frac{eU_y}{md} \frac{D^2}{v_0^2} \qquad (3)$$

e

$$h_2 = v_y \Delta t_2 = \frac{eU_y D}{mdv_0} \frac{L}{v_0} = \frac{eU_y DL}{mdv_0^2} \qquad (4)$$

onde Δt_2 é o tempo necessário para o elétron percorrer a distância L.

Assim, temos para Y:

$$Y = h_1 + h_2 = \frac{eD}{mdv_0^2} \left(\frac{2L - D}{2} \right) U_y \qquad (5)$$

Se considerarmos D<<L que é o caso de muitos dos tubos de raios catódicos teremos:

$$Y = \frac{eDL}{mdv_0^2} U_y \qquad (6)$$

Portanto,

$$Y = Const.U_y \qquad (7)$$

Da mesma forma demonstra-se que

$$X \;\alpha\; U_x \qquad (8)$$

Normalmente costuma-se fazer $U_x \, \alpha \, t$ para que apareça na tela a forma como U_y varia com o tempo. De fato, se $Y \, \alpha \, U_y$ e $X \, \alpha \, U_x \, \alpha \, t$, tudo se passa como se na tela aparecesse o gráfico U_y versus t.

Assim, por exemplo, se **a função é periódica** do tipo $U_y = U_0 \, sen(\omega t)$ aparecerá na tela uma senóide desde que se faça $U_x \, \alpha \, t$ no intervalo $0 \leq t \leq T$ onde $T = \dfrac{2\pi}{\varpi}$.

Nota: para que se veja uma senóide estacionária (fixa) na tela, é preciso que elas sejam geradas, no mínimo, a uma taxa ou razão de 20 senóides por segundo – é uma questão ligada à persistência da visão.

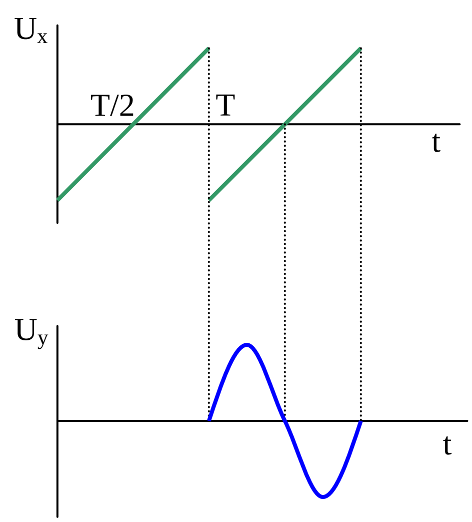


Figura 12.3

12.2 – Parte Prática

Parte Experimental 1

1. Medir a f.e.m. de uma e depois duas pilhas em série.

Parte Experimental 2

a) Comportamento do Circuito RC – Carga e descarga de um capacitor.

1. Monte o circuito da figura 12.4 e observe as variações de V_C, V_R e $V_R + V_C$ com o tempo. Use uma freqüência de 100 Hz para o chaveamento e $V_0 = 3$ V.

   A Fig. 12.5 mostra como os gráficos para V_C e V_R são apresentados na tela do osciloscópio, quando a chave *S* é ligada alternadamente aos terminais *a* e *b*, permanecendo em cada uma destas posições durante um tempo igual a várias vezes o valor da constante *RC*. Os intervalos de tempo correspondentes à carga do capacitor são indicados pela letra C, e os correspondentes à descarga pela letra D.

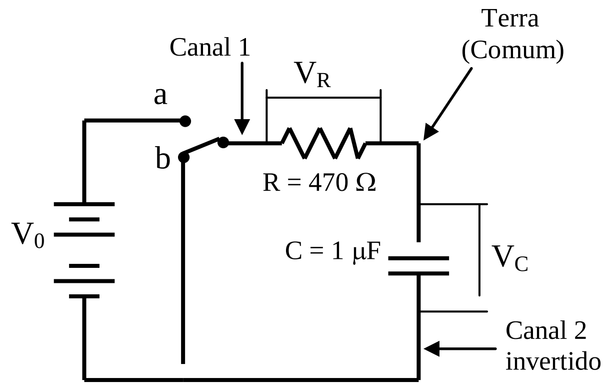


Figura 12.4

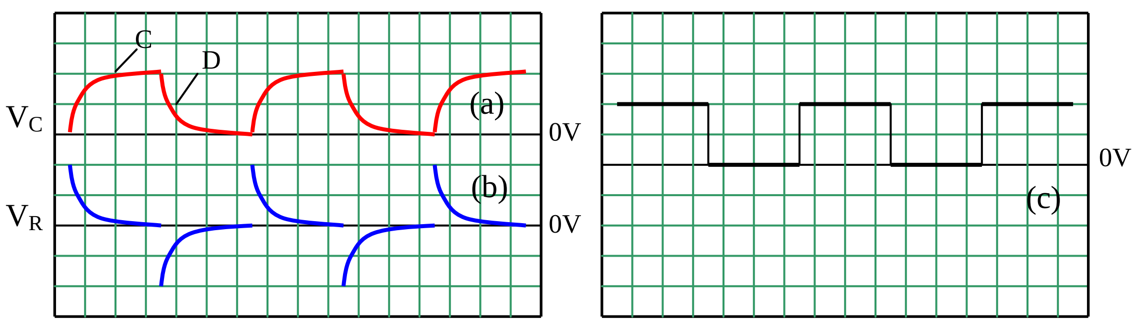


Figura 12.5 - A chave *S* na Fig. 12.4 é ligada alternadamente, por processos eletrônicos, aos terminais *a* e *b*. Variação com o tempo das diferenças de potencial através (a) do capacitor e (b) do resistor aparecem na tela do osciloscópio. (c) O que aparece na tela quando o osciloscópio é ligado, de modo a apresentar o gráfico de soma $V_R + V_C$.

Os gráficos relativos aos intervalos de carga na Fig. 12.5 (a) – C, representam a função:

$$V_C(t) = V_0\,(1 - e^{\frac{-t}{RC}}) \qquad (9)$$

e o dos intervalos de descarga Fig. 12.5 (a) –D a função:

$$V_C(t) = V_0\, e^{\frac{-t}{RC}} \qquad (10)$$

Note-se que a corrente, conforme mostra o gráfico (*b)* da Fig. 12.5, tem sentidos opostos durante os intervalos de carga e descarga, o que está de acordo com a teoria.

No gráfico (c), o osciloscópio foi ligado de modo a mostrar a soma algébrica dos gráficos (a) e (b). De acordo com a lei das malhas, esta soma deve ser igual ao potencial aplicado V_0 durante os intervalos de carga e a zero durante os de descarga, quando a bateria não está mais ligada no circuito. O gráfico (c) está, portanto, exatamente de acordo com esta previsão.

b) Circuito RC em corrente alternada

1. Montar o circuito da figura 12.6
2. Medir as tensões de pico aplicadas em R e C.
3. Ajuste os dois botões de ganho para a mesma escala e some os sinais usando o Mode ADD. Qual o valor obtido?
4. Ajuste o sinal V_R de modo que este possa ser tomado como referência no eixo dos tempos.
5. Meça a diferença de fase entre V_R e V_C. O valor obtido está dentro do esperado?
6. Varie a freqüência e observe o que ocorre com o sinal. Explique o comportamento observado.

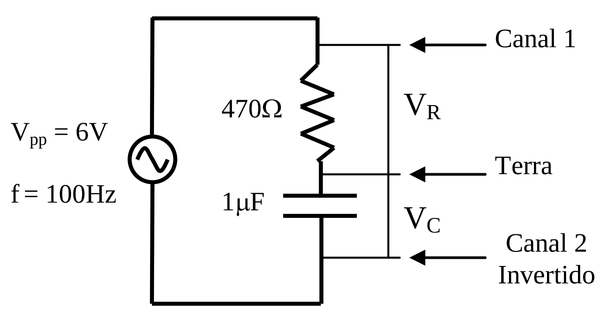


Figura 12.6

Parte Experimental 3

Circuito RL em corrente alternada

1. Conforme a figura 12.7, monte uma bobina de 3600 espiras, um resistor de 180 ohms e o amperímetro digital em série com o gerador de áudio, colocando a chave apropriada no modo tensão senoidal.
2. Fixe a freqüência em 100 hertz.
3. Escolha uma tensão na saída do gerador em torno de 8 volts pico a pico.
4. Em seguida, meça a tensão total (V), a tensão no resistor (V_R), a tensão na bobina (V_B) e a corrente no amperímetro. A partir destes dados, determine a impedância do circuito (Z=V/I) e a resistência do resistor.
5. Meça o ângulo de fase θ entre V_R e V_B.
6. Construa o diagrama de fasores, comece desenhando no eixo horizontal e em escala, o fasor V_R (tensão no resistor). A partir do diagrama determine V_{RB} e V_L, que representam a queda da tensão devido à resistência ôhmica da bobina e a queda da tensão devido à indutância da bobina.
7. A partir do item 6 determine a resistência $R_B = V_{RB} / I$ a reatância indutiva, $X_L = V_L / I$, e a indutância L da bobina.
8. Determine ainda a defasagem ϕ entre a corrente I e a tensão total V_m. (Lembre-se que a corrente I está em fase com a tensão V_R.)
9. Calcule a potência dissipada pelo circuito.

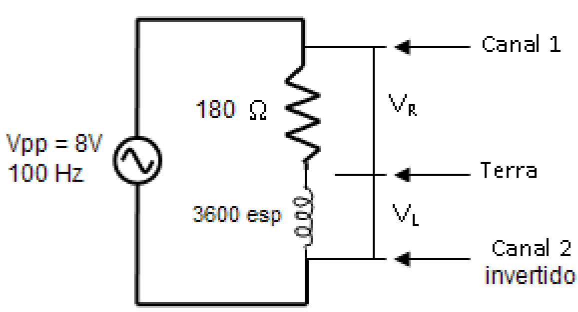


Figura 12.7

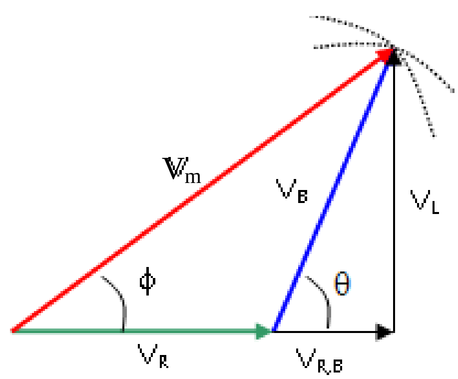


Figura 12.8

Observação: note que as tensões medidas no osciloscópio são V_B e V_R. As tensões V_L e V_{RB} não são medidas diretamente e são obtidas pela soma vetorial conforme a figura 12.8.