

# PONTE DE WHEATSTONE, CARGA E DESCARGA DE CAPACITORES

# 4

## META

Estudar as leis de Kirchhoff: leis das malhas e dos nós e medir o valor de uma resistência desconhecida.

Para o segundo experimento a meta consiste em apresentar aos estudantes o capacitor e o processo de carga e descarga de um capacitor (armazenador de cargas).

## OBJETIVOS

Ao final desta aula, o estudante deverá ser capaz de:

1. Comprovar as leis de Kirchhoff: leis das malhas e dos nós;
2. Medir o valor de uma resistência desconhecida;
3. Verificar a dependência temporal da corrente durante os processos de carga e descarga (no capacitor) em um circuito RC;
4. Determinar a constante de tempo do circuito RC;
5. Determinar a capacitância de um capacitor através de um circuito RC;

## PRÉ-REQUISITO

Ter estudado a 1ª lei de Ohm e feito experimentos usando o multímetro.

## INTRODUÇÃO

Olá! Tudo bem?

A ponte de Wheatstone é um circuito usado como medidor por comparação. Neste caso, será utilizado para a medição de resistências. No seu ajuste, a ponte usa o conceito de detecção de zero que é um critério menos sensível a problemas de calibração ou de precisão de padrões de referência. Na Figura H, por exemplo, se os valores das resistências  $R_x$ ,  $R_v$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  forem tais que os potenciais em c e em d sejam iguais, nenhuma corrente circulará pelo galvanômetro (Gal.).

Se uma das resistências for desconhecida, o valor das outras, quando a ponte estiver em equilíbrio, permitirá a determinação da incógnita. Para permitir a procura do equilíbrio da ponte utiliza-se uma resistência “ajustável” calibrada para uma das três resistências conhecidas.

A associação do conceito de comparação de sinais e do detector de zero é aplicada em inúmeros instrumentos e sensores.

Uma característica interessante da ponte de Wheatstone é que sua “sensibilidade” é máxima no caso em que as 4 resistências são iguais. Em outras palavras, quando as 4 resistências possuem valores iguais (ou bem próximos), se o valor de uma delas for variado um pouquinho, ocorre uma grande variação da corrente no galvanômetro.

### 4.1 A Ponte de Wheatstone

O circuito da Ponte de Wheatstone é um método muito preciso para determinação de uma resistência desconhecida. Devido à alta sensibilidade que a ponte pode atingir esse método é amplamente usado. Considere o circuito da ponte de Wheatstone mostrado na figura 4.1:

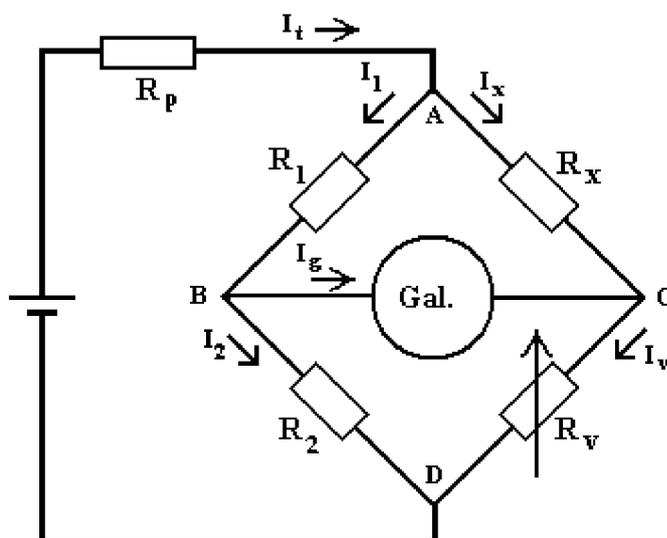


Figura 4.1 – Circuito da ponte de Wheatstone.

O circuito da ponte de Wheatstone é tal que quando a corrente elétrica através do galvanômetro (Gal.) é igual a zero o produto  $R_2R_x = R_1R_v$ . Isso ocorre porque a diferença de potencial entre os pontos B e C é igual. Quando essa condição é alcançada diz-se que a ponte de Wheatstone está equilibrada. A figura 4.1 mostra os possíveis caminhos para a passagem da corrente elétrica. A resistência variável,  $R_v$ , é usada para equilibrar a ponte.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais necessários para realização deste experimento são:

- ✓ Placa para circuitos
- ✓ Fonte de tensão contínua
- ✓ Galvanômetro
- ✓ Resistência variável
- ✓ 2 jogos de resistências de 10 k $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 220  $\Omega$ , 10  $\Omega$
- ✓ Resistores de 1,5 k $\Omega$  e 47  $\Omega$  para proteção
- ✓ Resistências desconhecidas (de 1.2 k $\Omega$ ) a serem medidas

## ROTEIRO EXPERIMENTAL

- i. Monte o circuito mostrado na figura H usando  $R_p = 1.5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$  e  $R_x = 1.2 \text{ k}\Omega$  e um resistor variável. Antes de montar o circuito meça as resistências o ohmímetro e anote as suas incertezas. Nota: **Muito cuidado para não ultrapassar esses limites e danificar o galvanômetro que é um instrumento extremamente sensível;**
- ii. Certifique-se de que a fonte de tensão contínua está zerada e então conecte-a ao circuito;
- iii. Ajuste a tensão na fonte para que a corrente  $I_g$  no galvanômetro permaneça dentro dos limites do instrumento;
- iv. Equilibre a ponte usando a resistência variável. Anote o valor da resistência para alcançar o equilíbrio;
- v. Após o equilíbrio da ponte meça as correntes  $I_t$ ,  $I_x$  e  $I_1$  conectando amperímetros em série com as respectivas resistências.

## DISCUSSÃO

1. Use os valores das resistências  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_v$  para calcular o valor de  $R_x$  e sua incerteza. Compare esse valor com aquele medido através do ohmímetro e discuta as diferenças;
2. Usando os valores das correntes  $I_t$ ,  $I_x$  e  $I_1$  comprove leis de Kirchhoff: leis das malhas e dos nós.

## 4.2 CARGA E DESCARGA DE CAPACITOR

### INTRODUÇÃO

Olá! Tudo bem?

Acho que você gostou de fazer as experiências passadas, mas não gostou tanto assim de fazer o relatório, não foi? É realmente bem mais divertido fazer o experimento. Mas o relatório é uma das partes mais importantes do aprendizado. É ao elaborar o relatório que você rever os conceitos teóricos, entende melhor o propósito do experimento e consegue chegar a resultados importantes com as medidas obtidas. Nunca é demais lembrar que prática e teoria caminham juntas. Além disso, o relatório vai fazê-lo aprimorar a habilidade de redigir um texto, e isso é importante em todas as profissões. Alguns erros comuns em relatórios são: escrever demais na introdução ou, muitas vezes, copiar literalmente de outros textos; escrever os objetivos e os procedimentos experimentais exatamente como está escrito neste livro; na discussão, se limitar a responder as perguntas aqui colocadas, como se fosse um questionário. Agora que você já fez o primeiro relatório de Laboratório de Física B, gostaria que você refletisse sobre estes erros: será que algum deles está presente nos seus relatórios? Acertar de primeira é extremamente difícil e é por isso que neste curso você continuará a fazer relatórios. Certamente, eles irão melhorando e no final do curso você já será um craque!

E por falar em relatórios, você está preparado para mais algumas experiências? Nesta aula, você será orientado a fazer mais duas experiências, uma sobre o processo de carga e descarga de capacitor em um circuito RC. Antes de falar de cada experimento, será sempre apresentado um resumo simplificado da teoria. Os fundamentos teóricos são limitados para que vocês tenham tempo de executar o experimento. Mas, para escrever o relatório, consulte sempre outras referências. Para ajudá-lo, ao final de cada aula, há sempre uma lista com vários livros que você pode e deve consultar.

### CAPACITOR

Das aulas anteriores conhecemos alguns elementos utilizados em circuitos elétricos. Agora o aluno vai conhecer um outro elemento também bastante comum em circuitos eletrônicos; o capacitor. O capacitor é um sistema basicamente constituído de dois condutores, isolados por um isolante (dielétrico). Carregando este dispositivo, resultará uma redistribuição de cargas, chamada polarização, que ocorre no interior do material dielétrico. Sendo que a carga líquida dentro do capacitor será sempre igual a zero. Assim quando afirmamos que um capacitor possui uma carga  $Q$  armazenada em capacitor, queremos dizer que o condutor possui carga  $+Q$  para o potencial superior e  $-Q$  para o potencial mais baixo. O capacitor é definido por uma

constante denominada capacitância ( $C$ ), que são simbolizados na maioria dos casos por:

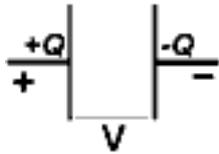


Figura 4.2: O Capacitor

No símbolo mostrado na figura 4.2, as linhas verticais representam os condutores e as linhas horizontais os fios conectados aos condutores. Por definição, essa capacitância é obtida da seguinte expressão:

$$C = \frac{Q}{E} \quad (4.1)$$

no SI a unidade de capacitância é o Faraday (F) que é o quociente entre Coulomb(C) e Volt(V), mas em virtude dessa unidade ser muito grande na natureza, usam-se mais comumente o mF ( $10^{-3}$  F),  $\mu$ F ( $10^{-6}$  F) e o ( $10^{-9}$  F).

O circuito RC mais simples é aquele constituído por um capacitor inicialmente descarregado no qual é submetido a uma tensão  $V$ , conforme esquema da figura 4.3.

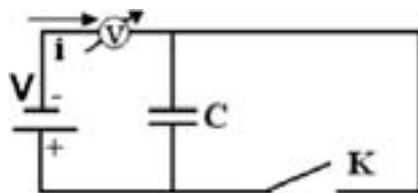


Figura 4.3: Circuito RC, usado para estudar o processo de carga e descarga.

Nesse caso, após o capacitor ter sido carregado após a chave fechar o circuito. Com isso, podemos escrever

$$E - R.I - \frac{q}{C} = 0 \quad (4.2)$$

Colocando a equação só em termos de  $q$ :

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (4.3)$$

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

Esta é uma equação diferencial ordinária cuja solução nos fornecerá  $q=f(t)$ . Do estudo das equações diferenciais pode ser mostrado que

$$q = C.E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad q = Q.(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (4.4)$$

onde foi adotado que em  $t=0$  não havia cargas nas placas do capacitor. Obviamente é muito simples determinar a corrente no capacitor (que pode ser obtida através de pontos instantâneos com o amperímetro da figura 3.2)

$$I = \frac{dq}{dt} \Rightarrow I = \left(\frac{E}{R}\right).e^{-\frac{t}{RC}} \quad I = I_0.e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4.5)$$

este resultado mostra uma corrente dependente do tempo, apesar de termos uma fonte constante E. Isto pode ser bem explicado da seguinte forma: a medida que o capacitor se carrega, ou seja, q aumenta na equação 4.4, a corrente diminui porque a tensão no capacitor aumenta e esta se opõe a tensão E. Ainda é importante notar que o produto RC na equação 4.5 deve ter dimensão de tempo, pois se assim não fosse, não haveria cancelamento com o t do numerador. Este produto (RC) é de grande importância em eletricidade e por isso recebe o nome de constante de tempo capacitiva( $\tau$ ). Este tempo por sua vez corresponde ao tempo necessário para que o capacitor atinja aproximadamente 63% de sua carga de regime ou equilíbrio (isso acontece quando  $t \rightarrow \infty$ ). Como  $t \gg RC$ , temos que a equação 4.4 será reescrita como

$$q = Q.(1 - e^{-1}) \rightarrow q \cong 0,63Q \quad (4.6)$$

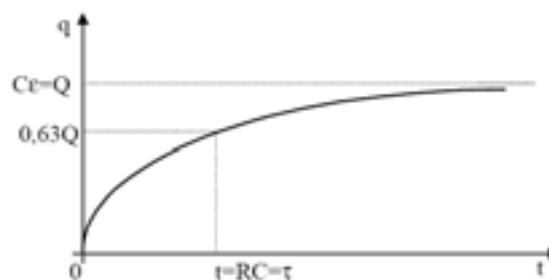


Figura 4.4: Curva característica da carga em função do tempo no processo de carga de um capacitor em um circuito RC.

De forma similar para a equação 4.5 quando  $t = RC$ , a equação ficará:

$I = I_0.e^{-1} \rightarrow I \cong 0,37I_0$ , a Figura 4.5 mostra esta relação em forma de gráfico.

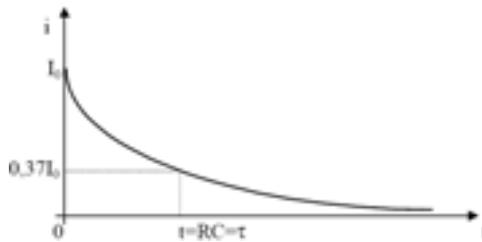


Figura 4.5: Curva característica da carga em função do tempo no processo de carga de um capacitor em um circuito RC.

Com relação à tensão no capacitor, temos na resistência interna do voltímetro ( $V_R$ ) será

$$V_R = R.i = V.e^{-\frac{t}{RC}} \tag{4.7}$$

Tomando o logaritmo natural ( $\ln$ ) da equação anterior teremos:

$$\ln V_R = \ln V - \frac{t}{RC} \tag{4.8}$$

As soluções da equação diferencial (tabela 4.1), na qual descreve o processo de carga e descarga de um capacitor em série com uma resistência, podem ser resumidas na tabela abaixo. No entanto, as soluções devem satisfazer as condições  $Q(t = 0) = 0$  e  $Q(t = \infty) = Q_0$  (carga máxima).

Tabela 4.1: Soluções da equação diferencial para as condições de carga e descarga de um capacitor.

	carga	descarga
Equação diferencial:	$\mathcal{E} = R\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C}$	$R\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0$
solução	$Q(t) = \mathcal{E}C \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$	$Q(t) = \mathcal{E}C e^{-\frac{t}{RC}}$
	$V_C(t) = \mathcal{E} \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$	$V_C(t) = \mathcal{E} e^{-\frac{t}{RC}}$
$t = RC \rightarrow$	$V_C(RC) = 0,63\mathcal{E}$	$V_C(RC) = 0,37\mathcal{E}$

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais necessários para realização deste experimento são:

- ✓ Fonte de tensão contínua de valor ajustável (0 a 250 Volts);
- ✓ 1 Multímetro Digital;
- ✓ 1 Placa de circuito (*Proto Board*);
- ✓ Resistor 2 MOhm;
- ✓ Capacitor de 4 a 6 $\mu$ F.
- ✓ Cronômetro;
- ✓ Fios para conexões;

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste experimento, o grupo irá determinar a *constante de tempo* de um circuito *RC*, com o auxílio de um multímetro, observando os processos de *carga* e *descarga* do capacitor existente, respectivamente. Ao realizar a leitura do texto, observe a figura que se encontra ao lado do texto em cada etapa.

### I. CARGA DE UM CAPACITOR

(a) Inicialmente o grupo irá montar um circuito conforme mostra a Fig. 4.3. Após a montagem, a chave *K* deverá ser fechada para manter o capacitor descarregado. Nesta etapa a corrente não passará pelo capacitor.

(b) Após o fechamento da chave aplique no circuito uma tensão compatível com a tensão máxima do capacitor, e com o fundo de escala do multímetro.

(c) Ao abrir a chave, o capacitor *C* começa a carregar-se através da resistência interna do voltímetro (multímetro). Desta forma, o voltímetro (multímetro) marca cada instante a tensão que está, entre as placas, no capacitor. Assim, faça 10 leituras da tensão ( $V_C$ ) no capacitor em diferentes instantes de tempo *t* (sugestão anote as tensões a cada 2 segundos até a leitura do voltímetro estabilizar. Anote esses dados na Tabela 4.2)

### II. DESCARGA DE UM CAPACITOR

Após a realização do experimento de carga, monte o circuito como mostra a figura abaixo (desligue a fonte de tensão). **Agora a tensão que for apresentada no multímetro será a tensão do capacitor.**

Ligue a fonte e feche a chave *K*, ajustando a fonte até ficar um valor próximo do fundo de escala do voltímetro. Nesta situação o capacitor carrega-se quase que imediatamente, pois seus terminais estão ligados diretamente à fonte de tensão.

Abrindo a chave *K*, o capacitor começa a descarregar-se através da resistência do voltímetro  $R_V$ . Assim, nesse mesmo instante faça 10 medidas de da tensão  $V_C$ . (sugestão anote as tensões a cada 2 segundos até a leitura do voltímetro estabilizar. Anote esses dados na Tabela 4.3)

