

## CIRCUITO RC – ARMAZENANDO ENERGIA PARA UTILIZAR NO MOMENTO CERTO

Estamos tão acostumados à comodidade proporcionada por equipamentos como refrigerador, televisão, telefone celular, até mesmo o mais simples relógio, que fica difícil imaginar como seria a vida sem eles. O funcionamento de todos os dispositivos eletrônicos baseia-se na passagem de corrente elétrica por um circuito, que pode conter diferentes componentes incluindo resistores, capacitores e baterias (ou fontes de tensão), entre outros. Um circuito contendo um resistor e um capacitor (que podem também estar conectados a uma fonte de tensão) é conhecido como CIRCUITO RC.

Num circuito elétrico, a função principal da fonte de tensão (ou bateria) é fornecer energia ao sistema. A energia fornecida pela fonte pode ser constante (tensão contínua, ou DC) ou pode variar com o tempo (tensão alternada, ou AC), respeitando uma função periódica tipo degrau, triangular, senoidal, entre outras.

O capacitor é um dispositivo que tem como função armazenar energia, e isso é feito no campo elétrico que se estabelece entre as placas do capacitor quando este está carregado. Assim como a bateria, o capacitor também pode fornecer energia ao circuito, quando, por exemplo, um capacitor carregado é conectado a uma lâmpada, a lâmpada acende. No entanto, há uma grande diferença entre conectar uma lâmpada a um capacitor carregado e a uma bateria. A bateria (ou fonte de tensão DC) mantém a mesma diferença de potencial por um longo tempo. Quando uma lâmpada é conectada a uma bateria, por exemplo, a lâmpada acende e o seu brilho não muda enquanto o circuito estiver conectado. No entanto, ao conectar um capacitor carregado numa lâmpada (resistor), o brilho da lâmpada é intenso logo que o circuito é fechado, diminuindo com o passar do tempo até se

extinguir por completo. No caso do capacitor, a diferença de potencial não é constante. Inicialmente a passagem de carga pelo resistor é bem fácil, pois há grande diferença de potencial entre as placas, mas conforme o capacitor descarrega, a corrente decresce de forma exponencial, até se extinguir por completo.

No laboratório, faremos experimentos para entender como se comporta a corrente num circuito contendo um capacitor e um resistor. Essa situação, apesar de simplificada, representa sistemas utilizados atualmente em diversas situações como, por exemplo, o flash da máquina fotográfica, o marcapasso e o desfibrilador.

### Salvando vidas

“...afastem-se ...choque”.

Em situações onde há parada cardíaca, muitas vezes faz-se uso de um equipamento chamado desfibrilador para ressuscitar o paciente. O desfibrilador é um equipamento que faz passar uma corrente elétrica pelo miocárdio, músculo cardíaco que auxilia no bombeamento de



Figura 4 - Desfibrilador

sangue através do coração, para reestabelecer seu funcionamento de forma sincronizada. Desfibriladores podem ser encontrados em hospitais, centros de saúde, ambulâncias e até mesmo em locais públicos de grande movimento, como aeroportos.

O desfibrilador gera uma descarga elétrica no paciente. Para que haja descarga elétrica, primeiro é preciso acumular uma certa quantidade de carga e para isso utiliza-se um capacitor. A carga acumula-se nas placas do capacitor quando este é submetido a uma diferença de potencial. A figura 6 mostra uma representação

esquemática de um circuito contendo uma fonte de tensão, um capacitor e o paciente (representado na imagem pelo coração).

Primeiramente, o capacitor é conectado à fonte de tensão e isso faz com que cargas elétricas se acumulem nas placas do capacitor, que após um tempo apresenta a mesma diferença de potencial da fonte. As pás do desfibrilador, feitas de material condutor, são geralmente posicionadas no peito do paciente, próximas uma da outra, ou uma

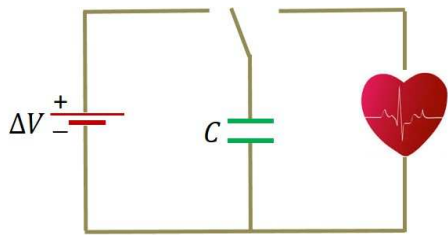


Figura 5 – Circuito RC (paciente - capacitor).

sobre o peito e a outra na lateral logo abaixo do braço esquerdo, possibilitando que a corrente elétrica atravessa o coração do paciente. Para diminuir a resistência elétrica e aumentar o valor da corrente que atravessa o miocárdio, é comum utilizar algum tipo de gel condutor que melhora o contato elétrico entre as pás e o peito do paciente. O caminho entre uma pá e a outra passando pelo coração do paciente equivale a uma resistência elétrica aproximada de  $50 - 150 \, \Omega$ , a tensão da fonte é aproximadamente  $5000 \, V$  enquanto o capacitor tem em torno de  $32 \, \mu F$  de capacitância.

Quando as pás do desfibrilador (carregado) são posicionadas no paciente e a descarga é acionada, a diferença de potencial que havia no capacitor diminui rapidamente, dando lugar a uma corrente elétrica que atravessa o miocárdio por um curto período de tempo, reestabelecendo os batimentos cardíacos de forma sincronizada.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Williams, D., *Physical principles of defibrillators*. Anaesthesia & Intensive Care Medicine, 2012. **13**(8): p. 384-387.

## Circuito RC - série

Um circuito composto por um resistor de resistência  $R$  e um capacitor de capacitância  $C$  é a forma mais simples de circuito RC (figura 7). O desfibrilador é um exemplo de circuito RC. A energia elétrica armazenada no campo elétrico do capacitor é convertida em outras formas de energia, geralmente calor, no resistor. Essa conversão de energia não é instantânea, mas leva um tempo característico em cada circuito, dependendo dos valores de  $R$  e  $C$ .

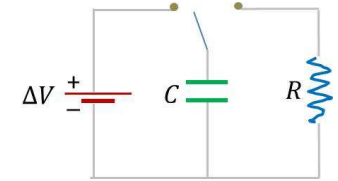


Figura 6 - Circuito RC

Ao conectar a resistência ao capacitor carregado, eliminando do circuito a fonte de tensão (como no caso do desfibrilador), num caminho fechado passando por  $R$  e  $C$ , podemos dizer que

$$\Delta V(t) + i(t)R = 0$$

Corrente  $i$  é definida como a quantidade de carga  $Q$  que atravessa o fio por unidade de tempo

$$i(t) = \frac{dQ(t)}{dt}$$

e a ddp no capacitor é dada por

$$\Delta V(t) = \frac{Q(t)}{C}$$

Dessa forma, podemos dizer que

$$\frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{1}{RC} Q(t)$$

Essa é uma equação diferencial de primeira ordem, pois nela estão presentes a função  $Q(t)$  e também a derivada temporal dessa função,  $\frac{dQ(t)}{dt}$ . A solução dessa equação deve ser uma função cuja derivada primeira é igual à própria função, a menos de uma constante. A função que apresenta esse tipo de comportamento é a função exponencial, portanto pode-se escrever

$$Q(t) = Q_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

A quantidade  $RC$ , chamada *constante de tempo*, é o que caracteriza o circuito e pode ser reescrita como  $\tau$ . Num processo de descarga, por exemplo, após um tempo igual a  $\tau$ , a carga no capacitor é igual a  $e^{-1}$  (ou 0,37) vezes o seu valor inicial.

Métodos para resolver esse tipo de equação serão vistos em detalhe no curso de equações diferenciais. Por ora, você pode utilizar a solução dessas equações conforme a tabela a seguir.

Capacitor Carregando	Capacitor Descarregando
$\Delta V = R \frac{dQ(t)}{dt} + \frac{Q(t)}{C}$	$R \frac{dQ(t)}{dt} + \frac{Q(t)}{C} = 0$
$Q(t) = \Delta V_0 C \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$	$Q(t) = \Delta V_0 C e^{-\frac{t}{RC}}$
$\Delta V(t) = \Delta V_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$	$\Delta V(t) = \Delta V_0 e^{-\frac{t}{RC}}$

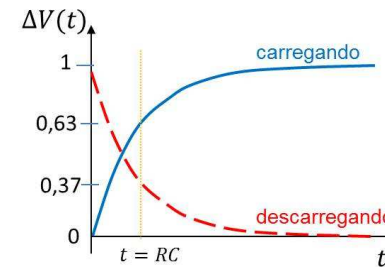


Figura 7 – Tensão entre as placas do capacitor durante o processo de carga ou descarga.

Quando  $t = RC$ , a tensão no capacitor atinge 63% do valor máximo quando este estiver carregando e 37% do valor máximo num processo de descarga. Essa função é representada graficamente na figura 8.

Como o multímetro só nos permite medir valores RMS (do inglês *root mean square*)<sup>3</sup> de tensões, ele não é útil se quisermos estudar a evolução temporal de  $\Delta V$  do capacitor. Nesse caso, precisamos de medidas instantâneas que podem ser obtidas através de um osciloscópio.

O osciloscópio é um dos instrumentos de medição mais versáteis usados na eletrônica. Ele nos fornece, num modo gráfico, tensões em função do tempo. Em um monitor como o apresentado na figura 9, ele representa, no eixo das ordenadas (vertical), a tensão entre dois pontos e no eixo das abscissas, o tempo. Ou seja, a tela de um osciloscópio é um gráfico de uma função da tensão contra o tempo:  $\Delta V \times t$ . Trata-se de um instrumento próprio para observar variações rápidas de tensões ao longo do tempo, informação essa que não pode ser obtida por um multímetro comum.

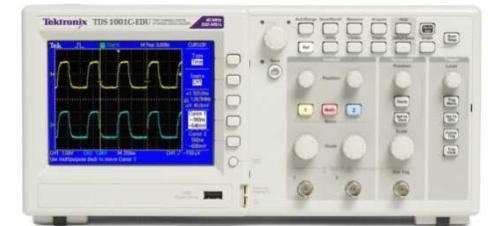


Figura 8 - A tela do osciloscópio apresenta um gráfico da tensão entre dois pontos em função do tempo.

<sup>3</sup> Para mais informações sobre valores RMS, veja página 78.

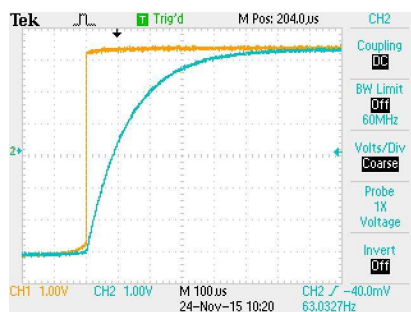


Figura 9 - Tensão da fonte e do capacitor, quando o mesmo está sendo carregado.

capacitor, enquanto que a curva em formato degrau (laranja) representa a tensão da fonte.

Suponha que desejamos estudar o processo de carregamento de um capacitor como o que exemplificamos há pouco. Se o colocarmos em série com uma fonte de tensão  $\Delta V$  contínua, ao ligarmos o circuito, a tensão no capacitor evoluirá de modo semelhante ao representado na figura 10. A curva suave (verde) representa a tensão no

## Atividade de Laboratório II

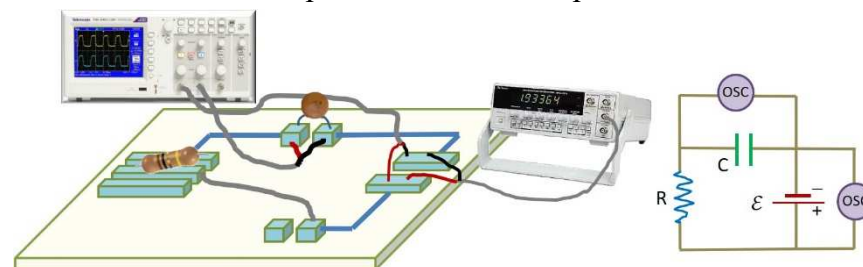
### Circuitos RC - série

#### 1 - Osciloscópio

O osciloscópio é um instrumento para medir tensões alternadas, em intervalos de tempo que variam desde segundos até microssegundos. As escalas utilizadas nos dois eixos – usualmente no eixo vertical tem-se a tensão e no eixo horizontal o tempo – podem ser modificadas com o objetivo de tornar o gráfico, que é visto na tela do osciloscópio, o mais adequado para as medições que se deseja realizar. Se, por exemplo, a escala do eixo vertical escolhida atribuir o valor de 2 V por divisão (2 V/div), isto significa que cada divisão do gráfico representado na tela vale 2 V. Da mesma forma, pode-se modificar a escala do eixo horizontal. O osciloscópio, assim como o voltímetro, sempre mede tensões entre dois pontos, portanto, cada canal precisa ser abastecido com dados coletados em dois pontos. Por isso, o cabo coaxial que alimenta cada canal possui dois pinos.

#### 2 – Aparato Experimental

Monte um circuito contendo um capacitor, um resistor e o gerador de funções como mostrado esquematicamente na figura abaixo. Tanto o gerador de funções quanto o osciloscópio possuem um fio terra (fio preto do cabo coaxial) que precisam necessariamente estar conectados no mesmo ponto. Por isso, é importante montar o circuito



conforme mostra a figura assegurando que o fio terra da fonte está ligado com o fio terra do osciloscópio. Isso significa ligar cabo preto com preto.

Construa então um circuito em série com um resistor ( $5,6\text{ k}\Omega$ ), um capacitor ( $47\text{ nF}$ ) e o gerador de funções já ajustado. Usando cabos coaxiais, ligue a fonte no canal 1 do osciloscópio e o capacitor no canal 2, cuidando para que os fios terra estejam ligados no mesmo ponto (preto com preto).

- ◆ Ligue os equipamentos e acione o botão AUTO SET no osciloscópio.
- ◆ Verifique o que acontece quando são selecionadas as funções onda quadrada, onda senoidal e onda triangular no gerador de funções.
- ◆ Selecione uma onda quadrada no gerador de funções e faça alguns ajustes nos botões do osciloscópio para facilitar a análise. A coluna ao lado direito da tela mostra as opções em uso pelo equipamento. Utilizando os botões imediatamente ao lado de onde diz COUPLING, selecione DC. Observe se a amplitude dos canais está multiplicada por um fator 1, isto é: PROBE 1x VOLTAGE. A opção INVERT deve estar OFF. Observe se os canais 1 e 2 estão com a mesma escala.

- ◆ Ajuste as escalas vertical e a horizontal (igual para os dois canais) de forma que ocorra a sobreposição do sinal da fonte e do sinal da tensão no capacitor. Verifique que enquanto a fonte (onda quadrada) tem um valor ora positivo, ora negativo, a tensão no capacitor também oscila entre estes valores máximo e mínimo, porém como uma curva exponencial tanto crescente (processo de carregamento do capacitor) quanto decrescente (processo de descarga).

## TAREFA 1

Com os ajustes propostos na montagem experimental, aborde as questões:

- ◆ Como é o gráfico representado no monitor do osciloscópio nessa configuração? Qual o significado físico desse gráfico?
- ◆ Como se pode estimar a constante de tempo do circuito a partir de uma análise da curva de descarregamento do capacitor? Determine visualmente (ordem de grandeza), olhando na tela do osciloscópio, a constante de tempo do circuito.
- ◆ Analise o que acontece se você mudar o valor da resistência do circuito?
- ◆ Analise o que ocorre (ordem de grandeza), se você acrescentar outro resistor ao circuito, primeiro em série, depois em paralelo, e estime o valor da constante de tempo para os dois casos.
- ◆ Estime se há diferenças entre o valor da constante de tempo do circuito calculada a partir dos valores nominais de R e C comparado com o valor estimado pela curva no osciloscópio.

## TAREFA 2

- ◆ Considere novamente o circuito contendo apenas um resistor e um capacitor em série.
- ◆ Ajuste o osciloscópio de forma que a descarga do capacitor apareça mais à esquerda da tela, como na

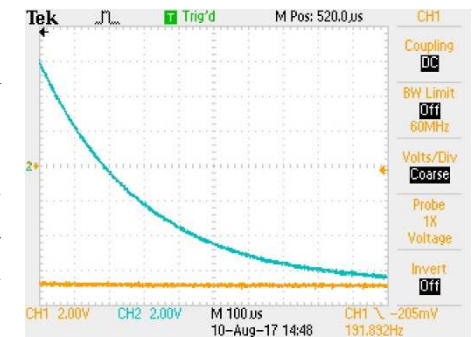


figura ao lado. (observe se as escalas dos dois canais são as mesmas).

♦ Coloque um *pendrive* no osciloscópio e clique em SAVE para gravar os dados coletados.

Utilizando aplicativo de gráficos (Sci-Davis, LibreOffice, Origin ou qualquer outro que esteja acessível via os computadores da sala) construa um gráfico da tensão no capacitor em função do tempo.

NÃO FAÇA UM GRÁFICO COM TODA A COLUNA. Selecione uma parte dos dados (300 pontos é suficiente) e então faça um gráfico mostrando a tensão no capacitor no eixo Y e o tempo no eixo X. Evite utilizar valores constantes, principalmente no início e no final da curva. O comportamento exponencial da curva é o mesmo independente da região que for escolhida para o ajuste, desde que haja variação.

♦ Qual curva pode ser ajustada aos dados? Quais parâmetros (grandezas) podem ser obtidos com este ajuste?

♦ Analisando a equação da curva ajustada, o que se pode concluir do produto da resistência pela capacitância do circuito?

♦ Tal resultado é coerente com as características dos componentes utilizados no circuito?

Salve os dados num USB e compartilhe com seus colegas do grupo pois você pode precisar deles.