



MATERIAIS CONDUTORES ELETRIZADOS

Objetivo

Investigar a relação entre as superfícies equipotenciais e o campo elétrico e compreender como o potencial elétrico se distribui em torno de diferentes configurações de cargas e materiais condutores.

Introdução

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

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

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

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

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad \text{Eq. 1}$$

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



DEFINIÇÕES E CONCEITOS:

Lei de Coulomb

A lei de Coulomb dá a relação quantitativa entre a força eletrostática e as cargas elétricas (Clique [aqui](#) para ver uma simulação sobre a Lei de Coulomb). A força $\vec{F}$ entre as cargas Q e Q' varia diretamente com o valor de cada carga e inversamente com o quadrado da distância d entre elas; sendo ainda uma função da natureza do meio que envolve as cargas, o que é dado pelo coeficiente $k = 4\pi\epsilon_0$.

$$F = \frac{1}{k} \frac{Q \cdot Q'}{d^2} \quad \text{Eq. 2}$$

O fator k que aparece na lei de Coulomb vale, para o espaço vazio, $k = 1$ (sem dimensão) no Sistema de Unidades Eletrostáticas, e $k = 4\pi\epsilon_0$ (com dimensão de $C^2 / N \cdot m^2$, ou ainda F / m) no Sistema Internacional MKS. Logo:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 m/F \quad \text{Eq. 3}$$

$\epsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-12} F/m$ é chamada de constante de permissividade do vácuo

Nos meios físicos reais (ar, plástico, borracha, madeira, etc) o valor e da permissividade é diferente, e é característico do meio considerado. A relação,

$$\epsilon_p = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad \text{Eq. 4}$$

é chamada constante dielétrica relativa (sem dimensão).

Direção de um Campo Elétrico

A direção de um campo para qualquer ponto é definida como a direção da força sobre uma carga positiva colocada naquele ponto.

A orientação do campo elétrico numa região pode ser representada graficamente por linhas de força. Uma linha de força de um campo elétrico é uma linha traçada de tal modo que a tangente a ela em qualquer ponto indique a direção do campo elétrico naquele ponto.

Potencial, Superfície Equipotencial

A noção de potencial elétrico provém do conceito de trabalho. O potencial absoluto V em um ponto a uma distância d de uma carga pontual isolada Q é dado pela relação.

$$V = \frac{1}{k} \frac{Q}{d} \quad \text{Eq. 5}$$

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



$$V = \frac{W}{q} \quad \text{Eq. 6}$$

O potencial resultante para um ponto situado perto de uma configuração de n cargas é a soma algébrica de todas as contribuições dos diversos potenciais; isso pode ser simbolicamente representado como:

$$V = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{d_i} \quad \text{Eq. 7}$$

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

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

O potencial, devido a uma carga puntiforme, depende da distância radial à carga. Assim, todos os pontos, em uma superfície esférica de raio R , têm o mesmo valor para o potencial. Isto significa que, espacialmente, as superfícies equipotenciais são esferas concêntricas. Em um plano, estas equipotenciais são círculos concêntricos como desenhado na Fig.1(a). As linhas contínuas, nas figuras Fig.1(c-b), representam as equipotenciais para um dipolo elétrico e duas cargas positivas, respectivamente. Nos três casos, Fig.2(a-c), o campo E é representado pelas linhas pontilhadas.

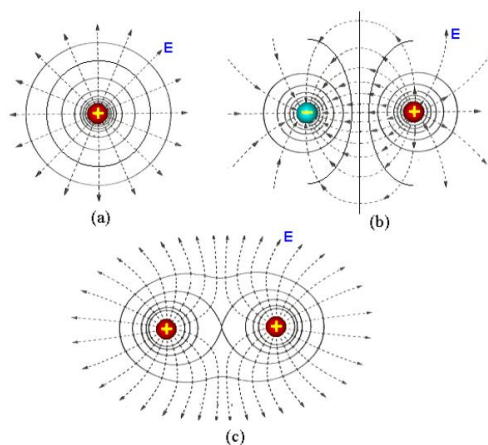


Figura 1: Equipotenciais para distribuição deargas discreta. **Clique na imagem para ver a simulação.**



Capacitor

Um capacitor (ou condensador) é um dispositivo formado por duas placas paralelas, contendo um material dielétrico entre elas que tem como função armazenar cargas elétricas e consequente energia eletrostática. Quando o ligamos a uma fonte de tensão, o capacitor acumula nas suas placas uma quantidade de carga proporcional à voltagem aplicada, armazenando energia elétrica. Se a fonte de voltagem for removida e o capacitor for isolado eletricamente, ele manterá a energia acumulada. Caso o capacitor seja conectado a outros componentes de um circuito completo, ele fornecerá ao circuito a energia armazenada. Por essas características, os capacitores atuam como “baterias” secundárias no circuito, capazes de armazenar e fornecer energia elétrica.



Figura 2: Capacitor eletrolítico por dentro (esquerda). Tipos de capacitores (direita).

A capacitância C a propriedade que os capacitores têm de armazenar cargas elétricas na forma de campo eletrostático, e ela é medida através do quociente entre a quantidade de carga (Q) e a diferença de potencial (V) existente entre as placas do capacitor, matematicamente fica da seguinte forma:

$$C = \frac{Q}{V} \quad \text{Eq. 8}$$

A unidade de capacitância, no SIU, é o farad (F), no entanto essa é uma medida muito grande e que para fins práticos são utilizados valores expressos em microfarads (μF), nanofarads (nF) e picofarads (pF).

A capacitância de um capacitor é uma constante característica do componente, assim, ela vai depender de certos fatores próprios do capacitor. A área das armaduras, por exemplo, influi na capacitância, que é tanto maior quanto maior for o valor desta área. Em outras palavras, a capacitância C é proporcional à área A de cada armadura. A espessura do dielétrico é um outro fator que influi na capacitância. Verifica-se que quanto menor for a distância d entre as armaduras maior será a capacitância C do componente. A capacitância de um capacitor de placas paralelas constituído de dois eletrodos planos idênticos de área A separados à distância constante d é aproximadamente igual a:



$$C = \epsilon_0 \epsilon_p \frac{A}{d}$$

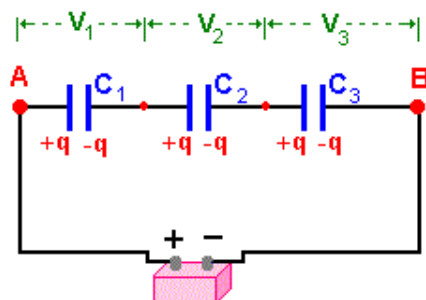
Eq. 9

Onde C é a capacitância em farads, ϵ_0 é a permissividade eletrostática do vácuo ou espaço livre e ϵ_p é a constante dielétrica ou permissividade relativa do isolante utilizado. Clique [aqui](#) para ver uma simulação que relaciona as características geométricas do capacitor com a capacitância.

Associação de capacitores

Os capacitores, assim como os resistores, podem ser associados em série ou em paralelo. Essas associações têm como objetivo obter a capacitância desejada.

Na associação em série de capacitores, a armadura positiva de um capacitor é ligada com a armadura negativa do outro capacitor e assim sucessivamente. Para determinar a capacitância equivalente de uma associação de dois ou mais capacitores utilizamos a seguinte relação matemática:

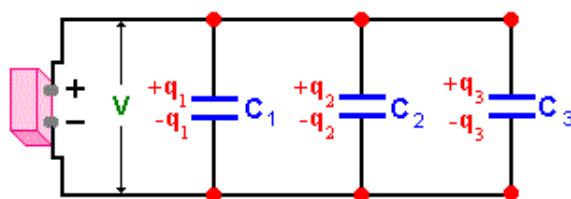


$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Eq. 10

Figura 3: Capacitores em série. **Clique no circuito para visualizar a animação**

Em paralelo, as placas positivas dos capacitores são ligadas entre si, bem como as negativas. Para determinar a capacitância equivalente utiliza-se a seguinte equação matemática, veja:



$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Eq. 11

Figura 4: Capacitores em paralelo **Clique no circuito para visualizar a animação**

Circuito RC

Nos circuitos, os capacitores não são usados isoladamente, havendo sempre um resistor associado em série com ele, mesmo que seja apenas a resistência interna da fonte de tensão. Associações desse tipo permitem controlar o tempo de carga e



descarga do capacitor. Esses circuitos, contendo resistores e capacitores, são conhecidos como **circuitos RC**.

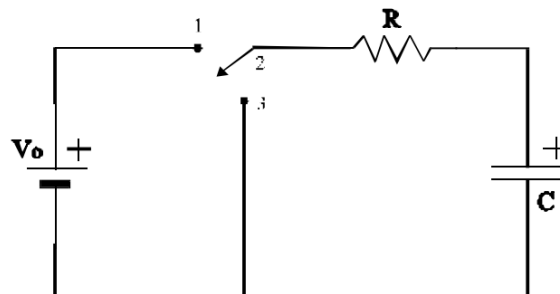


Figura 5: Circuito RC. [Clique na figura para visualizar a animação](#)

A Figura 5 mostra o diagrama de um circuito RC. Quando a chave S é colocada na posição **1**, o capacitor é conectado à fonte de tensão, e inicia-se o ciclo de carga. Por outro lado, ao se colocar a chave na posição **3**, o capacitor é descarregado através do resistor. Examinaremos em mais detalhes como varia a voltagem do capacitor na carga e descarga.

Carregando o capacitor

Quando a chave é conectada à posição **1**, temos pela lei das malhas (vamos desconsiderar a resistência interna da fonte)

$$V_0 = V_R + V_C \quad \text{Eq. 12}$$

Se o capacitor estiver inicialmente descarregado, $V_C = 0$, e, portanto, $V_0 = RI_0$, onde I_0 é a corrente no circuito no instante $t = 0$. À medida que o tempo passa, e como V_0 é constante, V_C aumenta e V_R diminui. Se a chave ficar ligada na posição **1** por um tempo relativamente longo, o capacitor será totalmente carregado e teremos $V_C = V_0$ e $V_R = 0$ V.

Lembrando que $V_R = RI$, temos

$$V_0 = RI + V_C = R \frac{dq}{dt} + \frac{Q}{C} \quad \text{Eq. 13}$$

Tomando como condição inicial $V_C = 0$ em $t=0$, a solução da equação acima é:

$$Q(t) = CV_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad \text{Eq. 14}$$

onde $\tau = RC$ é chamado **constante de tempo capacitiva** do circuito e tem dimensão de tempo. Se fizermos $t = \tau$ na Eq. 14, teremos:

$$Q(t) = CV_0(1 - e^{-1}) = 0,63CV_0 = 63\% Q_0 \quad \text{Eq. 15}$$

Onde Q_0 é a carga máxima do capacitor, ou seja, τ é o tempo necessário para que a carga no capacitor, inicialmente descarregado, atinja 63% do seu valor máximo.

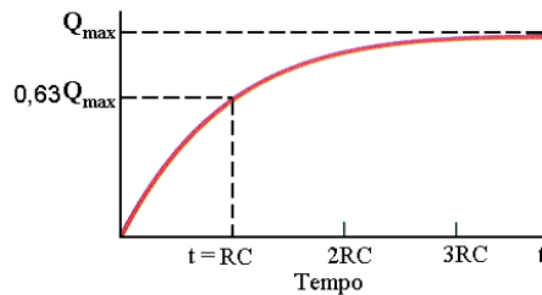


Figura 6: Evolução temporal da carga no capacitor no processo de carregamento

Descarregando o capacitor

Considere agora a situação em que o capacitor está inicialmente carregado, com voltagem V_0 . O capacitor será descarregado através da resistência R ao ligarmos a chave S ao ponto **3** do circuito da Figura 5. Note que agora, a fonte de tensão está fora do circuito. Aplicando novamente a equação das malhas de Kirchhoff para esse circuito, a chave em **3**, temos:

$$V_R + V_C = 0 \quad \text{Eq. 16}$$

$$RI + \frac{Q}{C} = 0$$

$$R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0$$

$$\frac{dQ}{Q} = -\frac{dt}{RC}$$

$$Q(t) = Q_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{Eq. 17}$$

Para $t = \tau$, temos:

$$Q(t = \tau) = Q_0 e^{-1} = 0,37 V_0 \quad \text{Eq. 18}$$

Na descarga, τ é o tempo necessário para o capacitor atingir 37% do valor inicial da voltagem.



1. Experimento: Linhas equipotenciais

1.1 Lista de Materiais

- 1 cuba de madeira e vidro com papel milimetrado na superfície inferior
- 1 fonte de tensão
- Conjunto de eletrodos
- líquido condutor, CuSO_4
- 1 multímetro
- folhas de papel milimetrado
- 1 sonda móvel
- 3 cabos banana-jacaré

Observações

Tenha muito cuidado com a horizontalidade do fundo da cuba, a fim de garantir uma resistividade constante de solução de CuSO_4 .

1.2 Montagem Experimental

Escolha uma das configurações de eletrodos indicadas abaixo. Utilize uma separação máxima entre eles de 10cm. Registre as coordenadas x e y dos eletrodos positivo e negativo.

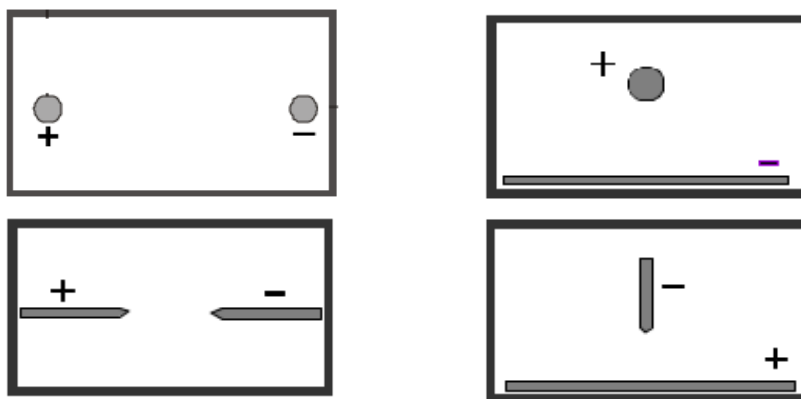


Figura 1-1: Configurações dos eletrodos

Para a configuração escolhida, mantenha os eletrodos o mais centralizado possível na cuba, respeitando a posição relativa entre os. Mantenha a cuba nivelada.



Ligue um eletrodo ao terminal positivo da fonte de tensão e outro eletrodo no terminal negativo, utilizando o fio com terminações banana e garra jacaré. Ajuste a tensão da fonte para 5V.

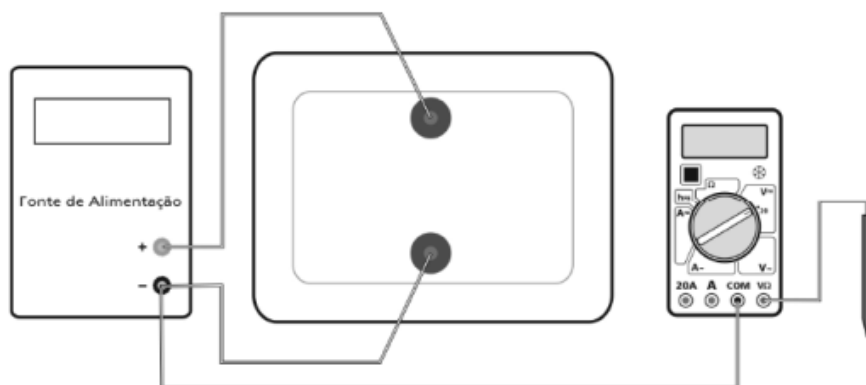


Figura 1-2: Circuito para mapeamento das linhas equipotenciais

Ligue a sonda móvel ao conector do multímetro para medições de tensão. O conector comum do multímetro, deve ser ligado ao eletrodo negativo/terminal negativo da fonte. O potencial do terminal negativo será utilizado como referência para medidas de tensão.

1.3 Procedimento Experimental

Após a montagem experimental, utilize a sonda móvel com o multímetro ajustado no calibre de 20V, para medir a diferença de potencial elétrico sobre os eletrodos. Meça essa diferença em diferentes pontos do eletrodo.

OBS.: A diferença de potencial medida com o multímetro sobre o(s) eletrodo(s) ligados ao terminal positivo da fonte podem não ser iguais ao indicado na fonte. Ajuste a tensão da fonte para que este(s) eletrodos apresentem uma diferença de potencial indicada no multímetro de 5 V.

Mergulhe a ponta de prova verticalmente na solução procurando o ponto onde a diferença de potencial, indicada no multímetro é de 1,5V. Encontre mais pontos com essa mesma diferença de potencial, totalizando pelo menos 10 pontos. Registre as coordenadas X e Y desses pontos na folha de dados.

Repita o procedimento para outros valores de diferença de potencial. *Sugestão: encontre as linhas equipotenciais acrescentando 0,5V a linha seguinte.*

Reproduza todo o procedimento anterior para uma segunda configuração de eletrodos e registre os valores medidos na folha de dados



2. Experimento: Constante de tempo em circuitos RC

2.1 Lista de Materiais

- 1 placa Arduino Mega
- 1 fonte de alimentação para placa Arduino
- 1 protoboard de 400 pontos
- 1 display LCD 16X2
- 4 cabinhos de ligação macho-fêmea
- 6 cabinhos de ligação macho-macho
- 1 resistores de $(10,0 \pm 0,5) \text{ k}\Omega$
- 1 capacitor de $1000 \mu\text{F}$
- 1 capacitor de $2200 \mu\text{F}$
- 1 multímetro
- 1 Interruptor

2.2 Montagem Experimental

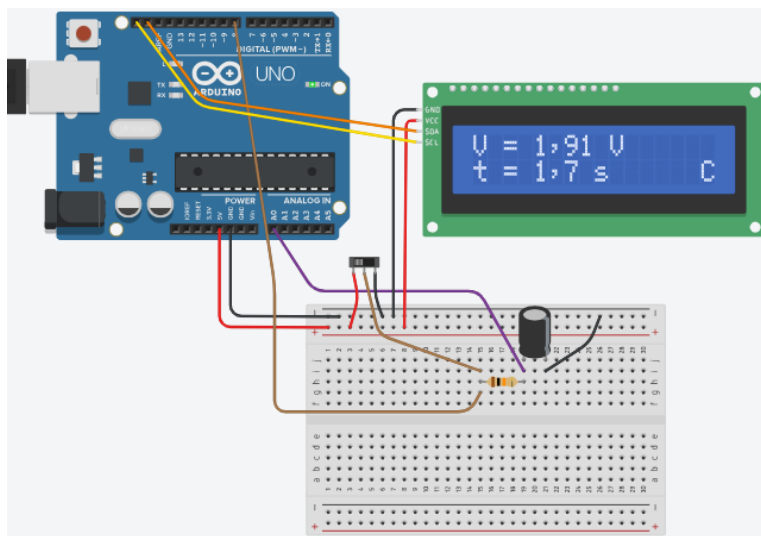


Figura 2-1: Montagem do circuito utilizando Arduino, display e protoboard.

Monte o circuito ilustrado na Figura 2-1. **Preste atenção na polaridade do capacitor, a haste menor deve ser ligada no ponto negativo.** Esse circuito será utilizado para medir o tempo de carga e descarga do capacitor.

Ao ligar o interruptor, o display mostrará as informações de tensão sobre o capacitor e o tempo que leva para o carregamento de 63% da carga do capacitor. Nesse momento, aparecerá no visor a letra **C**, indicando que você já pode registrar a constante de tempo capacitiva de carregamento. Ao desligar o interruptor, será mostrado o tempo que leva para o capacitor descarregar até 37% da sua carga



total. Nesse momento, aparecerá no visor a letra **D**, indicando que você já pode registrar a constante de tempo capacitiva de descarregamento.

OBS.: Para fazer as medidas de carregamento deixe que a tensão sobre o capacitor, indicada no mostrador, esteja muito próxima de zero, que seja pelo menos 0,10V. E para fazer as medidas de descarregamento deixe que a tensão sobre o capacitor seja de no mínimo 4,90V. Caso seu kit experimental não alcance esses valores de 0,10V e 4,90V chame o professor/monitor.

2.3 Procedimento Experimental

1ª parte – Medidas com o capacitor de 1000 μF

Ligue o interruptor e aguarde até que a tensão sobre o capacitor seja de aproximadamente 4,90V. Anote o tempo de carregamento mostrado no display. Desligue o interruptor e aguarde até que a tensão sobre o capacitor seja de aproximadamente 0,10V. Anote o tempo de descarregamento mostrado no display. Repita o procedimento de carga e descarga pelo menos três vezes e registre os tempos de carga e descarga na folha de dados

2ª parte – Medidas com o capacitor de 2200 μF

Substitua o capacitor da medida anterior pelo de 2200 μF . Repita novamente os procedimentos de carga e descarga pelo menos mais três vezes registrando os tempos de carga e descarga.

3ª parte – Associação com capacitores em série

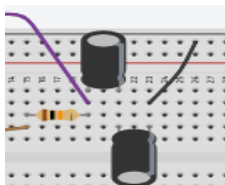


Figura 2-2:
Capacitores em série

Utilize os capacitores de 1000 μF e 2200 μF e ligue-os em série como indicado na Figura 2-2. **Preste atenção na polaridade dos capacitores.** Faça três medidas dos tempos de carga e descarga da associação em série dos capacitores.

4ª parte – Associação com capacitores em paralelo

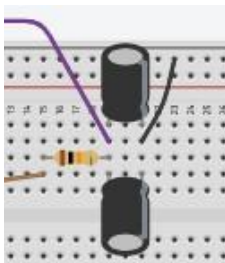


Figura 2-3: Capacitores
em paralelo

Por fim, ligue os dois capacitores em paralelo como indicado na Figura 2-3. **Preste atenção na polaridade dos capacitores.** Faça três medidas dos tempos de carga e descarga da associação em paralelo dos capacitores.

Em seguida abra o software **Arduino IDE** no laptop de sua bancada e acesse o menu Ferramentas – Monitor serial. Uma janela se abrirá e as medidas de tempo e tensão sobre o capacitor serão escritas nesta janela. Faça apenas uma medida dos tempos de carga e descarga do capacitor. Copie e cole as medidas para a última carga e a última descarga em uma planilha eletrônica.