



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

4.4 Experimento 4: Capacitância, capacitores e circuitos RC

4.4.1 Objetivos

- ✓ Fundamentar o conceito de capacitância e capacitor;
- ✓ Realizar leituras dos valores de capacitância de capacitores;
- ✓ Associar capacitores em série e paralelo e deduzir as relações algébricas para calcular as capacitâncias equivalentes em cada caso;
- ✓ Estudar o processo de carga e descarga do capacitor.

4.4.2 Materiais necessários

- ✓ 1 protoboard
- ✓ 1 resistor de 47 kΩ.
- ✓ 1 fonte c.c. ajustável
- ✓ 4 capacitores
- ✓ 1 voltímetro
- ✓ 1 cronômetro.

4.4.3 Referencial Teórico

Capacitores e Capacitância

Capacitor é um dispositivo que consiste de duas placas condutoras (chamadas de armaduras), separadas por um material isolante (dielétrico). Um capacitor serve para armazenar cargas.

Quando ligamos um capacitor a um gerador, a uma tensão V , o capacitor adquire uma carga Q . A placa superior fica com uma carga $+Q$ (falta de elétrons), enquanto a placa inferior ficará com uma carga $-Q$ (excesso de elétrons). O número de elétrons, em excesso em uma placa, é igual ao número de elétrons faltantes na outra placa. A relação entre a carga adquirida e tensão aplicada é o que se define como a capacitância (C) do capacitor:

$$C = \frac{Q}{V}$$

No Sistema internacional de unidades, a capacitância é medida em Farad (símbolo: F), sendo $1 \text{ F} = 1\text{C}/\text{V}$. A capacitância por sua vez, é uma característica dos parâmetros geométricos do capacitor, como a área de suas placas, a espessura de seu dielétrico e

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

material de que é feito o dielétrico. O dielétrico por sua vez tem como objetivo, aumentar o valor da capacitância do capacitor.

No caso de um capacitor de placas planas e paralelas, a sua capacitância (C) será dada por:

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

Onde, A é a área do capacitor, d, a distância entre as placas e, ϵ_0 a permissividade elétrica no vácuo, que vale $\epsilon_0 \approx 8,85 \text{ pF/m}$. A constante dielétrica k, é um parâmetro físico associado com o dielétrico. No vácuo, $k = 1$. No ar pode – se admitir também que $k \sim 1$. A Figura 1, é uma ilustração de um capacitor de placas planas e paralelas:

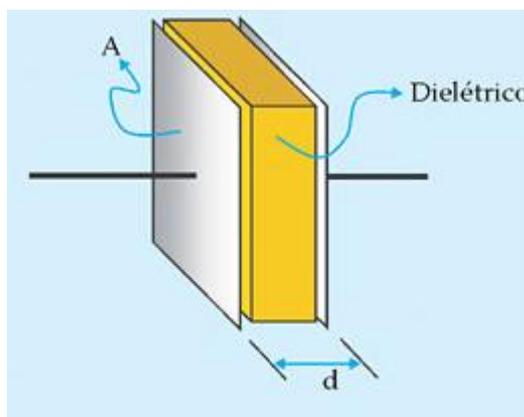


Figura 1 – Ilustração de um capacitor de placas planas e paralelas.

Devido a características constitutivas as capacitâncias de capacitores comerciais são disponibilizadas com valores da ordem de 10^{-12} F (picofarads) a 10^{-3} F (milifarads). Além do valor da capacitância, é preciso especificar o valor limite da tensão a ser aplicada entre seus terminais. Esse valor é denominado tensão de isolamento e varia conforme o tipo de capacitor.

Na prática encontramos vários tipos de capacitores, com aplicações específicas, dependendo de aspectos construtivos, tais como, material usado como dielétrico, tipo de armaduras, dentre outros. Vejamos alguns deles:

i) Capacitores plásticos (Poliestireno, poliéster)

Consistem em duas folhas de alumínio separadas pelo dielétrico de material plástico. Sendo os terminais ligados às folhas de alumínio, o conjunto é bobinado e encapsulado, formando um sistema compacto.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

ii) Capacitores eletrolíticos

O Capacitor eletrolítico internamente é composto por duas folhas de alumínio, separadas por uma camada de óxido de alumínio, enroladas e embebidas em um eletrólito líquido (composto predominantemente de ácido bórico ou borato de sódio). Por ser composto por folhas enroladas, tem a forma cilíndrica. Suas dimensões variam de acordo com a capacitância e limite de tensão que suporta. É um tipo de capacitor que possui polaridade, ou seja, não funciona corretamente se for invertido. Se a polaridade for invertida dá-se início à destruição da camada de óxido, fazendo o capacitor entrar em curto-circuito.

iii) Capacitores cerâmicos

Apresentam como dielétrico um material cerâmico, que é formado por uma camada de tinta, que contém elemento condutor, formando as armaduras. O conjunto recebe um revestimento isolante. São capacitores de baixos valores de capacitância e altas tensões de isolação.

Existem várias formas de leituras dos valores de capacitância de um capacitor, sendo que estas podem estar na forma de códigos numéricos, código de cores e também impressas no capacitor. Deixamos esta parte como o Apêndice I, no qual deverá ser utilizado durante este experimento.

Associação de Capacitores

No que segue, vamos lembrar as expressões para a capacitância equivalente de capacitores em série e paralelo. A Figura 2 é uma representação de associações em paralelo e em série de capacitores:

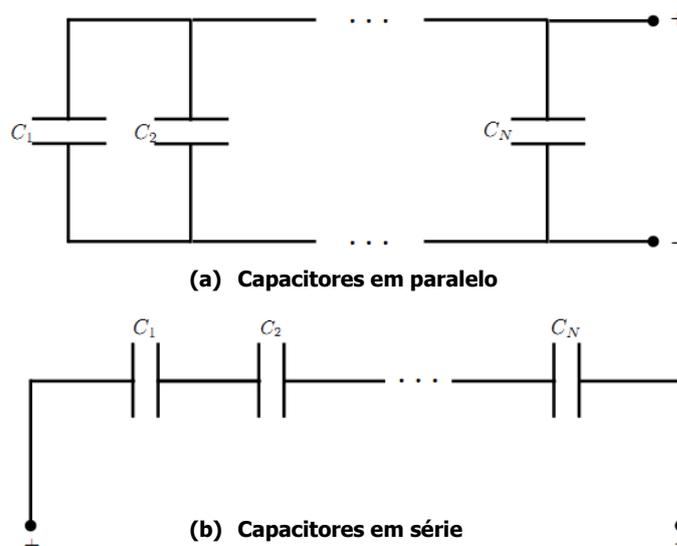


Figura 2 – Associação em (a) paralelo e (b) série de capacitores.

Temos as seguintes relações para as associações em série e paralelo de capacitores:

Para arranjos em série $\frac{1}{C_{eq}} = \sum_i \frac{1}{C_i}$

Para arranjos em paralelo $C_{eq} = \sum_i C_i$

Circuito RC série

Carga de Capacitor

Um circuito que contém um resistor (R) e um capacitor (C) em série é esquematizado na Figura 3. A fonte de tensão produz uma força eletromotriz (ϵ) que gera uma corrente i (medida pelo amperímetro A) quando a chave S é fechada, inicialmente na posição 1. Essa corrente passa pelo resistor de resistência R e depois pelo capacitor de capacitância C. O voltímetro (representado pelo círculo com a letra V) mede a diferença de potencial nas placas do capacitor. Durante este processo, que denominamos de carga do capacitor, uma carga (Q) é armazenada em suas placas e, esta aumenta com o tempo até que, a tensão em suas placas seja a mesma que a da fonte.

Antes de a chave S ser fechada, a tensão nas placas do capacitor é nula, fazendo com que $Q(t = 0) = 0$ e $i(t = 0) = 0$. Quando a chave S é fechada na posição 1, a lei de Kirchhoff neste circuito fornece:

$$\epsilon - Ri - \frac{Q}{C} = 0 \tag{1}$$

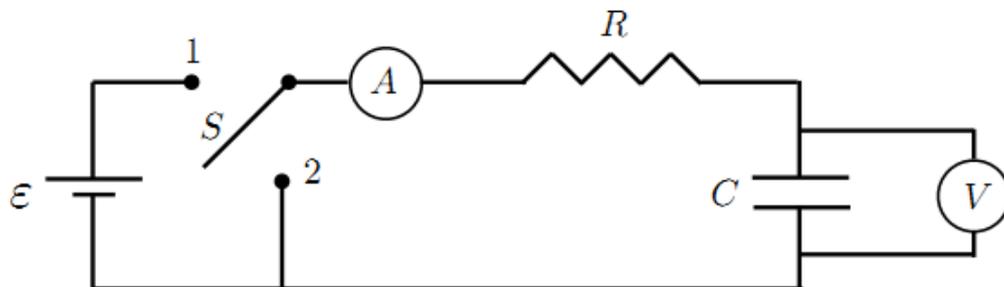


Figura 3 – Esquema de um circuito RC em série. Com a chave na posição 1, o capacitor pode ser carregado. Com chave na posição 2, o capacitor pode ser descarregado.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Fazendo $i = \frac{dQ}{dt}$ e, resolvendo a equação diferencial (1), obtém - se para o processo de carga do capacitor:

$$Q(t) = C\varepsilon (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (2)$$

Derivando a equação (2), em relação ao tempo, vem:

$$i(t) = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3)$$

A tensão nas placas do capacitor é dada por $V_C(t) = \frac{Q(t)}{C}$, obtém - se, equação (2):

$$V_C(t) = \varepsilon (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (4)$$

A quantidade RC , deve ter dimensão de tempo e, é chamada de constante de tempo capacitiva do circuito (δ). Quando o tempo é igual a $\delta = RC$ vemos que a tensão entre as placas do capacitor é aproximadamente 63% da tensão da fonte: $V_C(t = RC) = (1 - e^{-1}) \varepsilon \sim 63\% \varepsilon$. Você poderá verificar também que $i(t = RC) \sim 37\% i_0$, com $i_0 = \varepsilon/R$. A Figura 4 é um esboço de como a corrente e a tensão no capacitor variam no tempo:

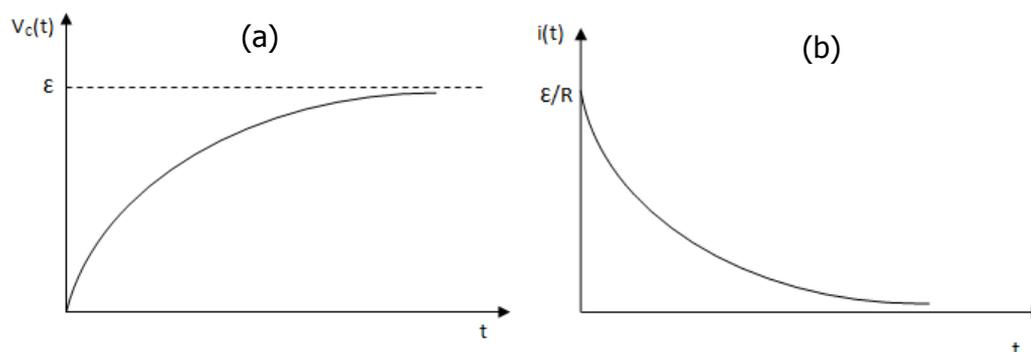


Figura 4 – Curvas de (a) tensão e (b) corrente durante o processo de carga do capacitor.

Descarga de Capacitor

A chave S é agora ligada na posição 2, de acordo com a Figura 3. Para todas as finalidades, iremos supor que o capacitor esteja totalmente carregado. Com a chave S, nesta posição, não há mais tensão no circuito, de modo que a lei de Kirchhoff, fornece para $\varepsilon = 0$:

$$Ri + \frac{Q}{C} = 0 \quad (5)$$

A solução desta equação fornece para a carga:

$$Q(t) = C\varepsilon e^{-\frac{t}{RC}} \quad (6)$$

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Derivando a equação (6) com relação ao tempo, obtém – se para a corrente no circuito:

$$i(t) = -\frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (7)$$

Utilizando a relação $V_C(t) = \frac{Q(t)}{C}$, na equação (6) para a tensão nas placas do capacitor, Obtém – se:

$$V_C(t) = \varepsilon e^{-\frac{t}{RC}} \quad (8)$$

O sinal (-), na equação (7) indica que a corrente agora, tem sentido oposto ao do processo de carga do capacitor. Vemos ainda na equação (7), que durante o tempo $\delta = RC$, a tensão e o módulo da corrente é reduzido em cerca de 37 % de seu valor inicial. Observamos que ambos os módulos da corrente quanto o da tensão decaem exponencialmente com o tempo.

4.4.4 Procedimentos Experimentais

Parte 1 – Medidas e associação de capacitores

1. Selecione três capacitores, doravante chamados C_1 , C_2 e C_3 . Um deles deve ser de poliéster, outro cerâmico e o terceiro um capacitor cilíndrico (15 X 250 V_{ac}).
2. Realize e registre na Tabela 1, as leituras dos valores nominais (C_N) de capacitância com suas incertezas $\pm \Delta C_N$, indicando qual o tipo de cada capacitor.
3. Meça e registre na Tabela 1, os valores (C_M) de capacitância e suas respectivas incertezas $\pm \Delta C_M$. Você conseguiu medir todos os capacitores com o capacímetro do multímetro? Por quê?

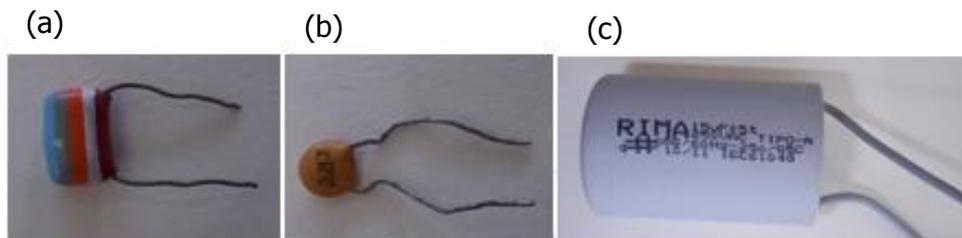


Figura 5 – Capacitores do tipo (a) Poliéster, (b) cerâmico e (c) eletrolítico.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

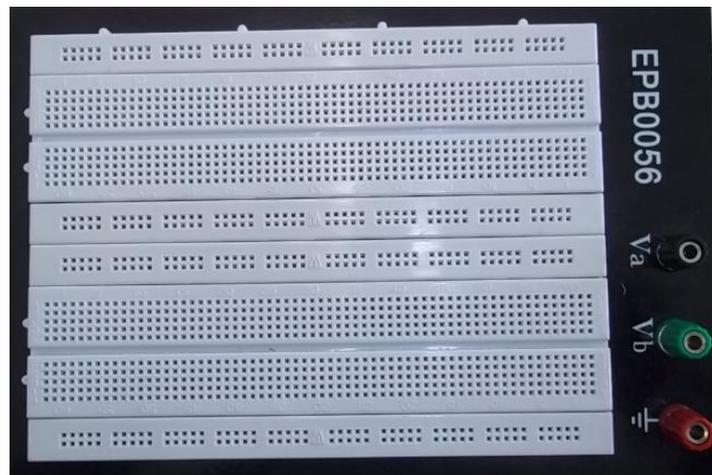
Tabela 1 - Valores nominais e medidos de capacitância.

Valores Nominais $C_N \pm \Delta C_N$	$C_{1N} =$	$C_{2N} =$	$C_{3N} =$
Valores Medidos $C_M \pm \Delta C_M$	$C_{1M} =$	$C_{2M} =$	$C_{3M} =$

- Use a placa *protoboard* (Figura 6). Chame o monitor, ou o professor, para uma orientação correta de seu uso. Conecte as seguintes ligações em série: C_1 e C_2 ; C_1 e C_3 ; C_2 e C_3 ; C_1 , C_2 e C_3 .
- Meça a capacitância de cada conjunto com o capacímetro do multímetro. Anote os valores na Tabela 2. Quais conjuntos puderam ser obtidos? Por quê?

Tabela 2 – Valores medidos da associação em série

C_1 e C_2	C_1 e C_3	C_2 e C_3	C_1 , C_2 e C_3

Figura 6 – Placa *protoboard*, utilizada para associação em série e paralelo de capacitores.

- Conecte os mesmos conjuntos em paralelo.
- Meça a capacitância de cada conjunto com o capacímetro do multímetro. Anote os valores na tabela abaixo. Quais conjuntos puderam ser obtidos? Por quê?



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Tabela 3 – Valores medidos da associação em paralelo

C_1 e C_2	C_1 e C_3	C_2 e C_3	C_1, C_2 e C_3

Parte 2 – Carga e descarga de capacitores

ATENÇÃO: (1) Esteja atento à polaridade do capacitor; (2) No ato da medida o seletor de faixas de medida em volts deve estar, inicialmente, ajustado para a faixa mais alta. De acordo com o valor medido, reduzimos a faixa até um intervalo que contenha a leitura e com o maior número de algarismos significativos possível. Note que fonte só fornecerá 12 V ao circuito.

1. Preste atenção na orientação do professor com relação à polaridade dos terminais do capacitor.
2. Neste experimento, você utilizará um capacitor de capacitância nominal de 4,7 mF. Meça o valor da resistência do resistor. Este valor é compatível com o nominal?

$R_N \pm \Delta R_N =$	$R_M \pm \Delta R_M =$
------------------------	------------------------

3. Observe a Figura 7 e, monte um circuito de carga de capacitor, de acordo com as conexões da Figura 3, que incluem o voltímetro e o amperímetro.
4. Ajuste a fonte para 12 V. Deixe a chave S aberta.
5. Feche a chave S em 1 (Figura 7) e, simultaneamente, acione o cronômetro. Anote na Tabela 4 do relatório os valores de tensão V_C nos terminais do capacitor e os valores de corrente (i), para intervalos sucessivos de 15 segundos. Não se esqueça de anotar o modelo do multímetro usado, para os cálculos de incerteza. Depois de ter completado a tabela, desligue o cronômetro. Se achar conveniente repetir as medidas.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

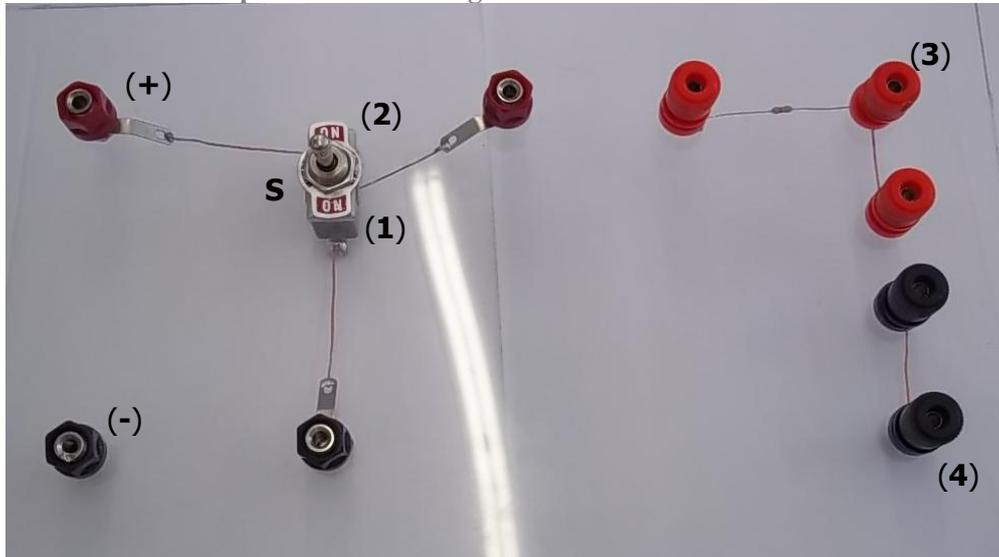


Figura 7 – Placa contendo a chave (S) e, conexões para um amperímetro e voltímetro.

Tabela 4 – Valores de tensão e corrente medidos nos processos de carga e descarga do capacitor.

Carga do capacitor

V_C											
i											
t											
V_C											
i											
t											

Descarga do capacitor

V_C											
t											
V_C											
t											

6. Desligue a fonte de tensão.
7. Para iniciar o processo de descarga do capacitor, retire os cabos da fonte de tensão do circuito [indicado pelos símbolos (+) e (-)] e, conecte – os diretamente na entrada do capacitor [indicado pelos números (3) e (4)].



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

8. O amperímetro e o voltímetro deverão permanecer da mesma forma que antes.
9. Ligue a fonte. Desta forma, o capacitor carregará instantaneamente na tensão de 12 V.
10. Retire o cabo indicado por (+), **na fonte de tensão (e não do circuito)**.
11. Vire agora, a chave para a posição 2. Escolha um valor inicial de tensão e, a partir daí, anote na Tabela 4 os valores de tensão em função do tempo, para intervalos de 15 s.

Parte 3 - Variação da capacitância com a distância de suas placas

1. Tome as duas placas circulares no capacitor de placas planas e paralelas do "kit capacitor". Coloque 3 folhas de papel entre as placas do capacitor, fazendo com que estas placas fiquem o mais paralelo possível.
2. Retire cuidadosamente as folhas entre as placas do capacitor, e meça, com um paquímetro a espessura das folhas, que servirá como uma estimativa da distância entre as placas ($d \pm \Delta d$). A seguir, meça a capacitância, utilizando o multímetro e anotando as incertezas ($C \pm \Delta C$).
3. Aumente continuamente a distância entre as placas, colocando cada vez mais folhas de papel (três ou mais folhas). Em seguir, repita o item 2.
4. Leia os valores de capacitância do multímetro, de acordo com o modelo do multímetro. Estas incertezas estão tabeladas na parede do laboratório.
5. Anote os dados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores medidos de capacitância em função da distância no capacitor de placas planas e paralelas.

$d \pm \Delta d$									
$C \pm \Delta C$									

4.4.5 O que Incluir no Relatório do Experimento

Parte 1 – Medidas e associação de capacitores

- Compare os valores nominais de capacitância com os valores medidos com o multímetro (Tabela 1). Estes valores são compatíveis? Justifique sua resposta, com base nas incertezas, em cada caso.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

- Compare os valores medidos das associações em série e paralelo, de cada associação realizada (Tabelas 2 e 3) com os valores teóricos previstos (C_p , e não se esqueça das incertezas $\pm \Delta C_p$):

$$\text{Série: } \frac{1}{C_{eq}} = \sum_i \frac{1}{C_i}$$

$$\text{Paralelo: } C_{eq} = \sum_i C_i$$

Parte 2 – Carga e descarga de capacitores

- Faça dois gráficos em papel milimetrado: um para a tensão no capacitor em função do tempo t , outro para a corrente do circuito, em função do tempo, para o processo de carga do capacitor. Compare e discuta estas curvas, com o previsto pela teoria.
- Faça um gráfico em papel milimetrado da tensão em função do tempo dos dados obtidos no processo de descarga do capacitor. Faça uma linearização da curva obtida, ou seja, faça um gráfico de $\ln V$ em função do tempo t no papel milimetrado. Você também poderá optar por um gráfico em papel monolog, neste caso de V em função t .
- Obtenha do item anterior, o valor de $\tau_C = RC$ pelo gráfico construído de descarga do capacitor. Compare este valor com o produto RC obtidos dos valores **nominais de C e R** dos valores **medidos de C e R**.
- Com base no modelo teórico, mostre **matematicamente** que o tempo característico ($\tau_C = RC$) corresponde a 63,2 % da *fem* fornecida, no caso do processo de carga, e a 36,8% da carga acumulada no capacitor, no caso de descarga.
- Deduza as equações (2), (3), (6) e (7) a partir da análise do circuito RC.

Parte 3 – Variação da capacitância com a distância de suas placas

- Utilize a Tabela 5 e construa um gráfico de capacitância em função do inverso da distância entre as placas do capacitor, com suas respectivas barras de incerteza.
- Comente sobre a curva obtida e a validade da relação $C = \epsilon_0 A/d$.