

4. Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos

Quando um paciente recebe um choque de um desfibrilhador, a energia libertada para o paciente estava armazenada num condensador.

No condensador destes equipamentos podem ser armazenados cerca de 360 J de energia. Esta energia pode ser transferida para o paciente em cerca de 2 ms. A que potência corresponde esta descarga?



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

O potencial criado por um condutor com uma carga Q é proporcional à sua carga.

$$V = k \frac{q}{r}$$

A quantidade de carga eléctrica que um condutor pode acumular não é infinita. Depende das suas características (e.g. material, geometria, ...)

Há determinado tipo de dispositivos cuja função essencial é armazenar carga eléctrica. Denominam-se condensadores.



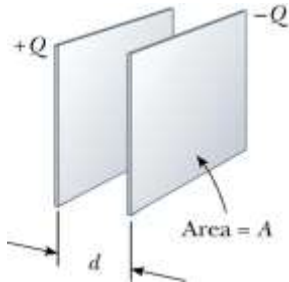
Os condensadores são utilizados:

- Em defibriladores;
- Para ajustar a frequência num receptor de rádio, Para filtros em fontes de alimentação;
- Acumuladores de energia em unidades de flash;
- Microfones;
- Etc.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Um condensador serve para armazenar carga elétrica: Consiste em dois condutores, com carga simétrica (no caso de terem carga) separados por um isolador.

Se dois condutores estiverem carregados com cargas $+Q$ e $-Q$ existe uma diferença de potencial, V , entre eles.



Aos dois condutores associados chamamos **condensador** e à razão entre a carga Q e a diferença de potencial entre os condutores ΔV chamamos **Capacidade do condensador, C** .

Veremos que capacidade de um condensador depende da sua geometria e das características do material isolador, que se chama dielétrico.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Capacidade do condensador **Coulomb/volt = 1 farad (F)**

(a capacidade é sempre positiva)

Valor absoluto da carga de cada condutor
(Coulomb)

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

valor absoluto da diferença de potencial entre as placas do condensador (Volt)

Usa-se V , em vez de ΔV para simplificação e significa a ddp entre as placas.



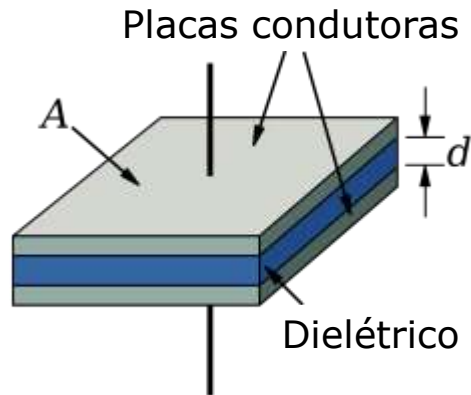
Michael Faraday

Condensadores típicos $1\mu\text{F}$ – 1pF

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Condensadores de placas paralelas

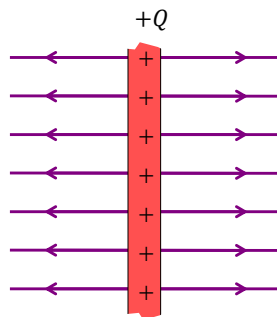
- Formados por 2 placas de área A (a forma não interessa)
- As placas estão separadas por uma distância d .
- Entre as placas existe um material isolador elétrico (ou **dielétrico**): ar, plástico, papel, etc.



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

De que depende a capacidade de um condensador?

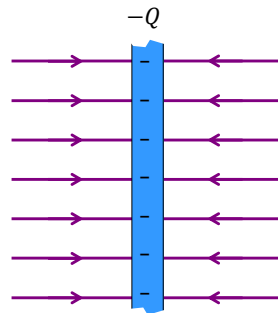
Linhas de campo em torno da placa carregada positivamente



$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

módulo do campo elétrico criado pela placa positiva

Linhas de campo em torno da placa carregada negativamente (com carga simétrica à da placa positiva)

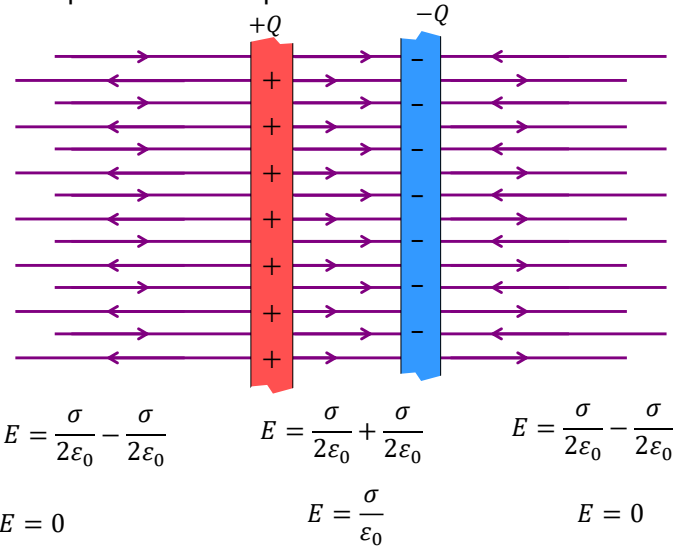


$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

módulo do campo elétrico criado pela placa negativa

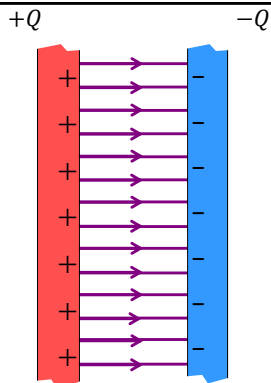
Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

- Ao aproximar as 2 placas ...



- O campo elétrico entre as placas é uniforme.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.



O campo elétrico entre as placas uniforme.
A diferença de potencial é dada por:

$$\Delta V = - \int_0^d E dx = -Ed$$

Em geral, nos condensadores, é prático ignorar o sinal negativo:

A capacidade do condensador, vem então:

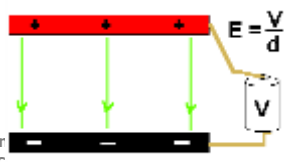
$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad C = \frac{\sigma A}{Ed} \quad C = \frac{\sigma A \epsilon_0}{\sigma d}$$

Quando o dielétrico é o vazio

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

Para um dielétrico que não o vazio

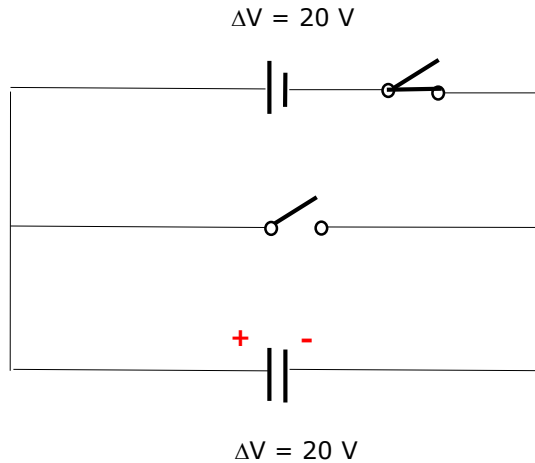
$$C = \frac{A \epsilon}{d}$$



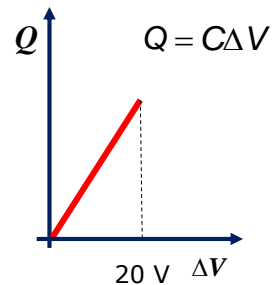
A capacidade de um condensador de placas planas e paralelas é proporcional à área das placas e inversamente proporcional à separação entre as placas e depende do dielétrico (ϵ).

Electromagn
Cap 4 Capac

Como se carrega um condensador?



A capacidade é uma característica do condensador. Quando um condensador é carregado, à medida que a carga contida nas placas do condensador aumenta, a diferença de potencial entre as placas aumenta proporcionalmente.



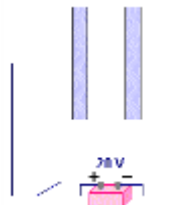
Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Como se carrega um condensador?

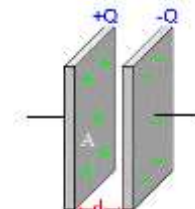
Pode-se carregar um condensador ligando as placas aos terminais de uma bateria. No início, antes de abrir o interruptor a carga armazenada nas placas do condensador é nula.

Quando o interruptor é fechado, do terminal negativo da bateria saem electrões que se acumulam na placa do condensador, que assim fica com carga negativa. Da outra placa saem electrões, que se dirigem para o pólo positivo da bateria, ficando a placa carregada positivamente.

A carga acumulada nas placas vai aumentando até que a diferença de potencial entre as placas iguale a diferença de potencial entre os terminais da bateria. Quando isso acontece, cessa o movimento orientado de cargas.

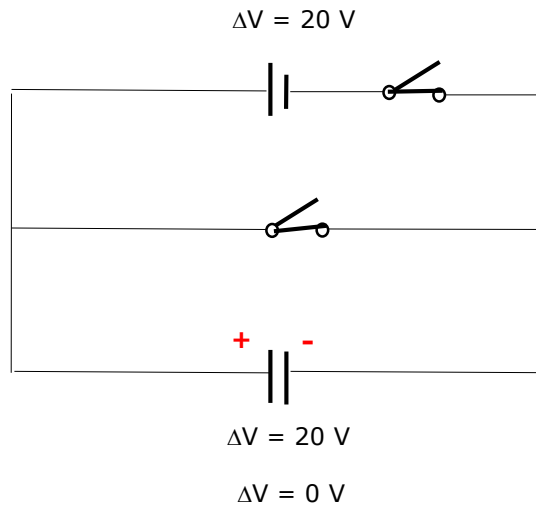


O condensador carrega até que a ddp nos terminais do condensador (V_C) iguale a ddp nos terminais da fonte (V_{fonte}).



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Como se descarrega um condensador?



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

É muito fácil descarregar um condensador...



- ⇒ A descarga pode ser observada, muitas vezes como uma centelha (faísca).
- ⇒ Tocando acidentalmente nas placas opostas dum C carregado, os dedos funcionam como condutores causando um choque eléctrico.

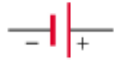
Intensidade do choque depende da capacidade do condensador e da diferença de potencial aplicada. Quando a diferença de potencial é elevada (por exemplo alguns TVs) os condensadores podem constituir um perigo pois podem permanecer carregados com o aparelho desligado da corrente

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Simbologia



Condensador



Fonte (gerador, pilha, bateria,...)



Interruptor

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Checkpoint

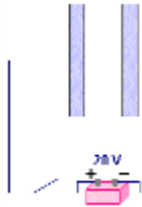
Um condensador acumula uma carga Q quando sujeito a uma diferença de potencial ΔV .

Qual a consequência se a diferença de potencial aplicada ao condensador duplicar ($2\Delta V$)?

- (a) A capacidade reduz para metade do valor inicial e a carga acumulada permanece constante**
- (b) Tanto a capacidade como a carga diminuem para metade do valor inicial.**
- (c) Tanto a capacidade como a carga duplicam o valor inicial.**
- (d) A capacidade permanece constante e a carga acumulada duplica.**

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Armazenamento de energia num condensador.



Quando um condensador de capacidade C é carregado, à medida que a carga é "armazenada" a diferença de potencial entre as duas placas vai aumentando.



O trabalho necessário para transferir a carga dq , é:

$$dW = \Delta V dq$$

O trabalho total para carregar o condensador de $Q = 0$ até $Q = Q$, é:

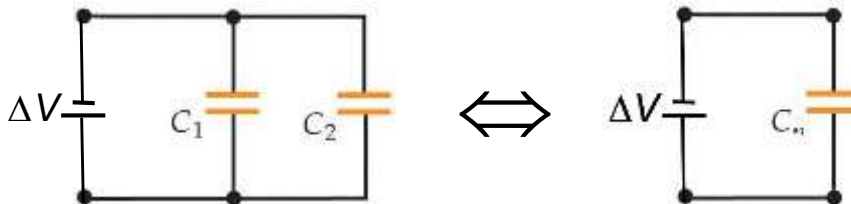
$$dW = \frac{q}{C} dq \Rightarrow W = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{Q^2}{2C}$$

O trabalho (W) efetuado no processo de carga de um condensador é uma medida da energia transferida ou uma medida da energia potencial elétrica armazenada pelo condensador.

$$E_p = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} Q \Delta V = \frac{1}{2} C \Delta V^2$$

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Associação de condensadores em paralelo



Circuito equivalente – substituir a associação de condensadores por um só condensador com a capacidade da associação

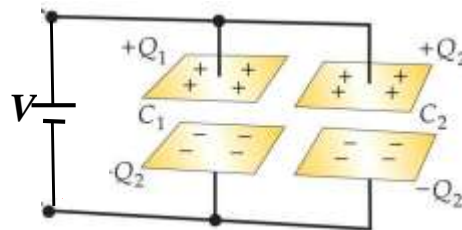
- As placas inferiores ligam-se ao terminal (+) da bateria, estando, por isso, ao mesmo V .
- As placas superiores ligam-se ao terminal (-) da bateria, estando, por isso, ao mesmo V .

Relacionar a ddp nos terminais dos condensadores com a ddp da fonte.

$$\Delta V_{C1} = \Delta V_{C2} = \Delta V$$

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Os condensadores podem ter características diferentes e portanto capacidades diferentes.



Qual a carga acumulada em cada condensador? $Q_1 = C_1 \Delta V$ $Q_2 = C_2 \Delta V$

A carga total acumulada é:

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1 \Delta V + C_2 \Delta V = (C_1 + C_2) \Delta V$$

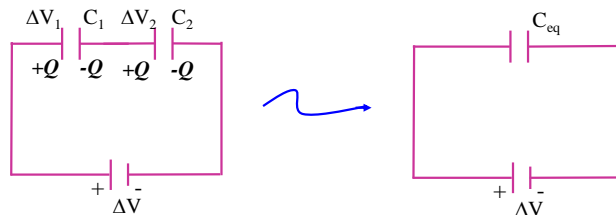
Portanto: $C_1 + C_2 = \frac{Q_1 + Q_2}{\Delta V} = \frac{Q}{\Delta V} = C_{eq}$

Num circuito com n condensadores em paralelo:

$$C_{eq} = \sum_{i=1}^n C_i$$

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

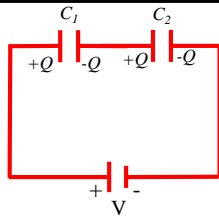
Associação de condensadores em série



- Na ligação dos condensadores em série, a carga é a mesma em todas as placas.
- Quando a bateria é ligada, há transferência de e^- da placa esquerda de C_1 para placa direita de C_2
- À medida que essa carga (-) se acumula na placa direita de C_2 , uma quantidade equivalente de carga (-) é forçada a sair da placa da esquerda de C_2 , que fica com um excesso de carga (+)

Ambos os condensadores ficam igualmente carregados.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.



$$Q_1 = Q_2 = Q$$

$$\Delta V_{C1} + \Delta V_{C2} = \Delta V$$

$$C_1 = \frac{Q}{\Delta V_{C1}} \Rightarrow \Delta V_{C1} = \frac{Q}{C_1}$$

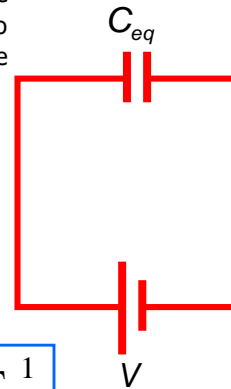
$$C_2 = \frac{Q}{\Delta V_{C2}} \Rightarrow \Delta V_{C2} = \frac{Q}{C_2}$$

Para que um condensador seja equivalente ao conjunto C_1 e C_2 , terá que ter uma capacidade, C_{equiv} , que quando carregado com a mesma carga, apresente a mesma diferença de potencial aos terminais.

$$C_{eq} = \frac{Q}{\Delta V} \Rightarrow C_{eq} = \frac{Q}{\Delta V_{C1} + \Delta V_{C2}}$$

$$C_{eq} = \frac{Q}{\frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}} \quad C_{eq} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)^{-1}$$

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

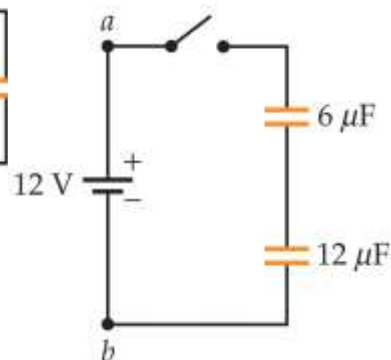
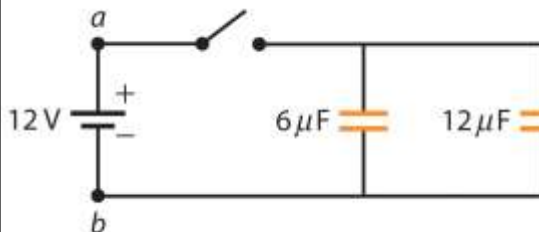


$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

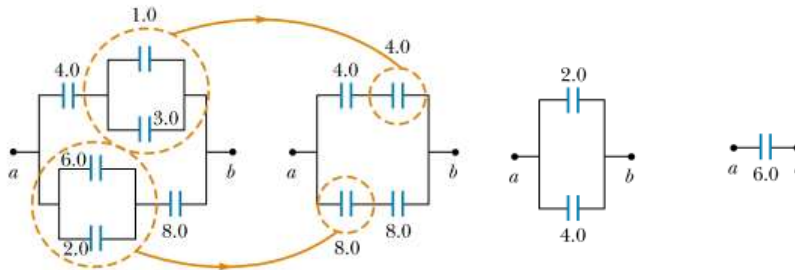
Checkpoint

Calcule a capacidade equivalente, a ddp nos terminais de cada condensador e a carga acumulada em cada condensador em cada uma das seguintes associações.



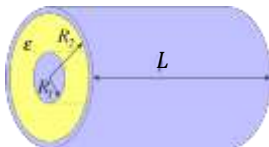
Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Determinar a capacidade equivalente, entre os pontos **a** e **b**, do circuito representado. (todos os valores da capacidade estão em unidades de μF)



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Condensadores cilíndricos

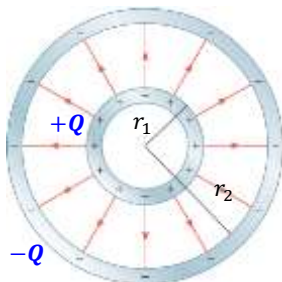


Para determinar a capacidade de um condutor cilíndrico ($C = \frac{Q}{\Delta V}$) tem de se determinar a ddp entre os dois condutores ($V_1 - V_2$):

Aplicando a lei de Gauss:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0} \quad E = \frac{Q}{2\pi r L \epsilon_0}$$

$$\text{Tendo em conta que: } \Delta V = - \int \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

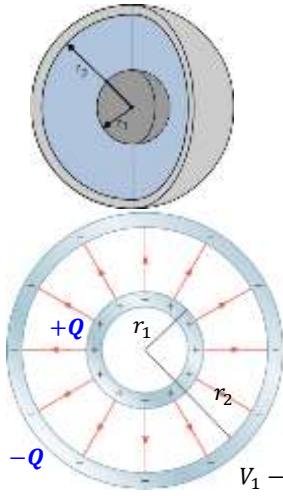


$$V_1 - V_2 = \Delta V = \int_{r_2}^{r_1} dV = - \int_{r_2}^{r_1} \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_{r_1}^{r_2} \vec{E} \cdot d\vec{r} = \frac{Q}{2\pi L \epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} =$$

$$\Delta V = \frac{Q}{2\pi L \epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1} \Rightarrow C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{2\pi L \epsilon_0}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Condensadores esféricos



Para determinar a capacidade de um condutor cilíndrico ($C = \frac{Q}{\Delta V}$) tem de se determinar a ddp entre os dois condutores ($V_1 - V_2$):

Aplicando a lei de Gauss:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0} \quad E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Tendo em conta que: $\Delta V = - \int \vec{E} \cdot d\vec{r}$

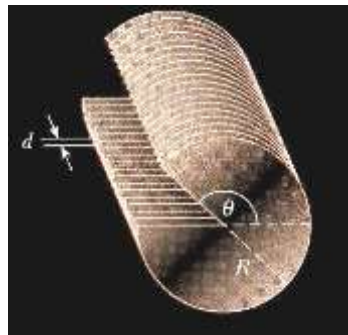
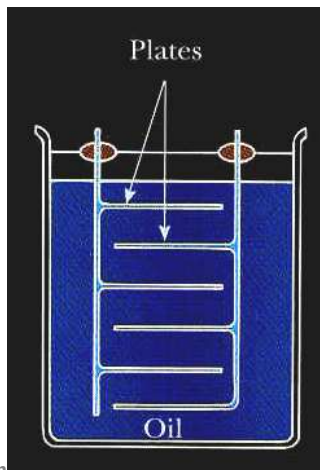
$$V_1 - V_2 = \Delta V = \int_{r_2}^{r_1} dV = - \int_{r_2}^{r_1} \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_{r_1}^{r_2} \vec{E} \cdot d\vec{r} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} =$$

$$\Delta V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad \Rightarrow C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{4\pi\epsilon_0}{\left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right]}$$

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Geralmente o que se pretende de um condensador é que tenha a maior capacidade possível e também o menor volume, no entanto, como vimos, a capacidade de um condensador é tanto maior quanto maior for o tamanho das placas.

O que vale é que há gente com ideias: aqui estão dois esquemas de condensadores de placas paralelas, desenhados para ter capacidades elevadas sem ocupar muito espaço



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Resposta à questão inicial.



Um dos equipamentos em que os condensadores são de uma grande importância é nos desfibriladores. No condensador destes equipamentos podem ser armazenados cerca de 360 J de energia. Esta energia pode ser transferida para o paciente em cerca de 2 ms. A que potência corresponde esta descarga?

180 000 W (cerca de 3000 vezes a potência de uma lâmpada de 60 W).

Este choque eléctrico pára a fibrilação (contrações cardíacas arritmadas) que acontecem quando há ataques cardíacos, e ajudam a restabelecer o ritmo cardíaco.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Algumas outras aplicações dos condensadores:



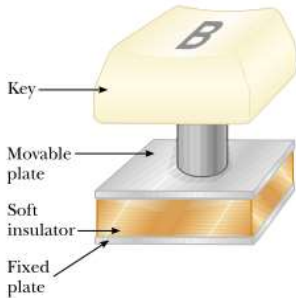
Armazenamento de carga em circuitos eléctricos ou electrónicos

Os condensadores são utilizados:

- Em defibriladores;
- Para ajustar a frequência num receptor de rádio,
- Para filtros em fontes de alimentação;
- Acumuladores de energia em unidades de flash;
- Microfones;
- Etc.

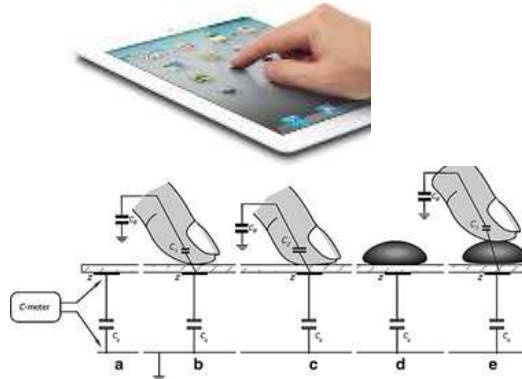
Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Teclado

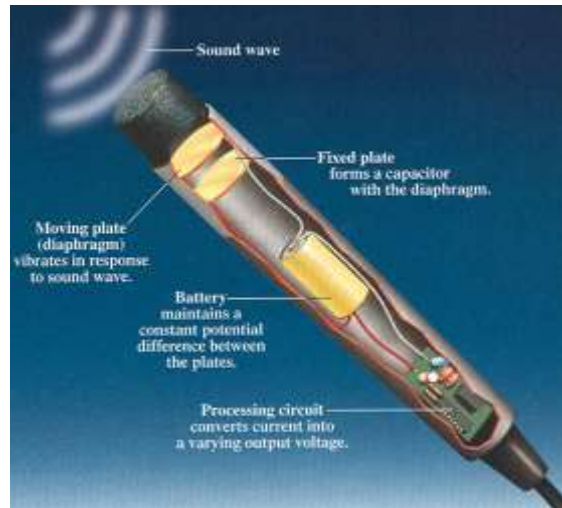


Cada uma das teclas dos teclados está associada a uma das placas de um condensador de placas paralelas. O condensador é mantido a uma diferença de potencial constante de 5 V.

Ao pressionar a tecla altera-se a distância entre as placas e daí a capacidade do condensador, gerando um fluxo de corrente.



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

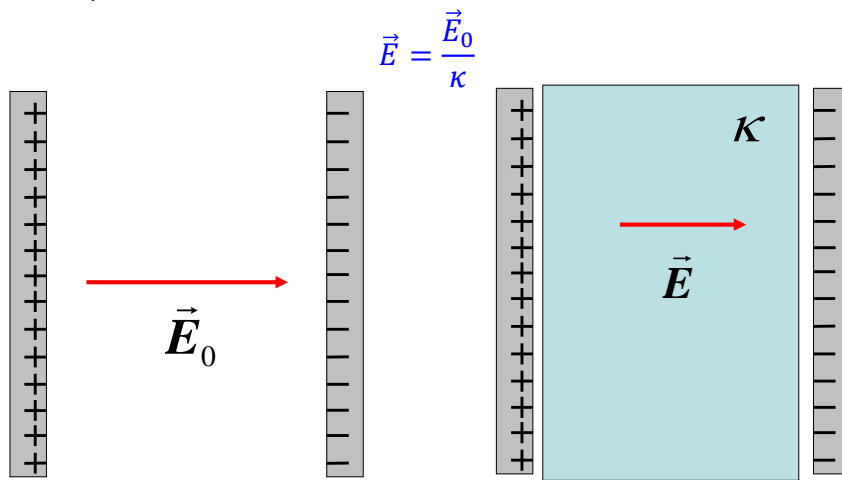
condensadores: dispositivos que armazenam cargas eléctricas.

- Deflectores de feixes de partículas eletricamente carregados.
- Podem carregar-se vários condensadores para produzir correntes eléctricas elevadas durante períodos curtos.
- São importantes em circuitos AC (corrente alternada) (estudaremos mais tarde).
- Usadas em circuitos eléctricos: para sintonizar a frequência dos receptores de rádio; como filtros, nas fontes de potência; armazenadores de energia nas unidades de flash electrónico...

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dieléctricos.

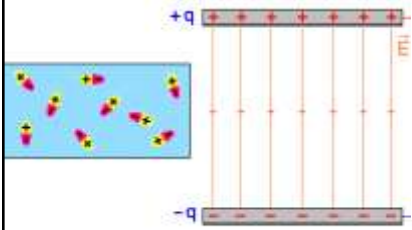
Dieléctricos (O que é um dieléctrico?)

- Materiais não condutores como o ar, vidro, plástico, madeira, papel, são dieléctricos.
- Se entre as placas dum condensador for colocado um dieléctrico, o campo eléctrico diminui de um factor κ (**constante dieléctrica**). Este fator depende do dieléctrico usado.



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dieléctricos.

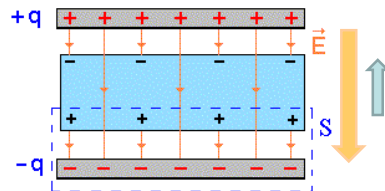
Como "funciona" o dielétrico?



- Há materiais, como a água, em que as moléculas estão permanentemente polarizadas; noutros as moléculas só ficam polarizadas na presença de um campo elétrico.
- Nos materiais usados como dielétricos, predominam aqueles em que a polarização é induzida.

- Na ausência de um campo elétrico externo, os dipolos orientam-se aleatoriamente.
- Quando um campo é aplicado, surge sobre os dipolos um momento que tende a alinhar os dipolos com o campo externo. Geralmente o alinhamento não é total.
- O grau de alinhamento depende da temperatura, da intensidade do campo aplicado e do material em causa.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.



Quando o condensador é carregado, a superfície do dielétrico fica com carga de sinal oposto à da placa mais próxima, produzindo o seu próprio campo elétrico, que se opõe ao campo externo (das placas), "enfraquecendo" o campo entre as placas.

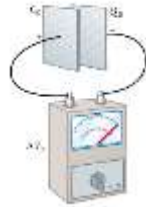
$$E = \frac{E_0}{\kappa}$$

Tendo em conta que:

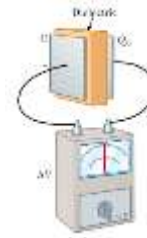
$$\Delta V = Ed \Leftrightarrow \Delta V = \frac{E_0}{\kappa} d = \frac{\Delta V_0}{\kappa}$$

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Efeito de um Dielétrico num condensador



Quando se insere um dielétrico entre as placas de um **condensador já carregado** (sem estar ligado a uma fonte) a carga (Q_0) fica inalterada, contudo a ddp registada por um voltímetro reduz-se para $\Delta V = \Delta V_0/\kappa$.



$$\begin{aligned} \Delta V_0 & \longrightarrow \Delta V = \frac{\Delta V_0}{\kappa} \\ C_0 = \frac{Q_0}{\Delta V_0} & \longrightarrow C = \frac{Q_0}{\Delta V} \\ & \downarrow \\ & C = \kappa C_0 \end{aligned}$$

A capacidade aumenta de um fator κ , quando o dielétrico enche toda a região entre as placas, contudo a carga Q_0 no condensador não se altera.

Se o dielétrico encher completamente o espaço entre as placas, a capacidade aumenta por um fator adimensional denominado **constante dielétrica (κ)**.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

$$C = \frac{q}{\Delta V} = \frac{q}{\Delta V_0/\kappa} = \kappa \frac{q}{\Delta V_0} = \kappa C_0$$

$$C = \frac{\kappa \epsilon_0 A}{d} = \frac{\epsilon A}{d} \Rightarrow \epsilon = \kappa \epsilon_0$$

Permitividade do dielétrico



Para a mesma d.d.p. o condensador pode acumular mais carga eléctrica.



Para a mesma carga a ddp nos terminais é menor.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Caso de um dielétrico num condensador de placas paralelas

A capacidade de um condensador de placas planas e paralelas é proporcional à área das placas e inversamente proporcional à separação entre as placas.

$$C_o = \epsilon_o \frac{A}{d}$$

Com um dielétrico: $C = \kappa C_o \Rightarrow C = \kappa \frac{\epsilon_o A}{d}$ **C** aumenta com a diminuição de **d**.

Na prática, o valor de **d** está limitado pela descarga elétrica que pode ocorrer através do dielétrico que separa as placas.

Para um dado **d**, a ΔV_{max} que pode ser aplicada a um **C**, sem provocar descarga, depende da **rigidez dielétrica** do material (intensidade máxima do campo)

Se o campo elétrico no dielétrico for superior ao valor da rigidez dielétrica, as propriedades isolantes desaparecem; o meio começa a conduzir.

A maioria dos materiais isolantes têm valores de rigidez e constante dielétrica superiores aos do ar.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Constantes Dielétricas

TABLE 26.1 Dielectric Constants and Dielectric Strengths of Various Materials at Room Temperature

Material	Dielectric Constant κ	E máximo (V/m)
Air (dry)	1.000 59	3×10^6
Bakelite	4.9	24×10^6
Fused quartz	3.78	8×10^6
Neoprene rubber	6.7	12×10^6
Nylon	3.4	14×10^6
Paper	3.7	16×10^6
Polystyrene	2.56	24×10^6
Polyvinyl chloride	3.4	40×10^6
Porcelain	6	12×10^6
Pyrex glass	5.6	14×10^6
Silicone oil	2.5	15×10^6
Strontium titanate	233	8×10^6
Teflon	2.1	60×10^6
Vacuum	1.000 00	—
Water	80	—

* The dielectric strength equals the maximum electric field that can exist in a dielectric without electrical breakdown. Note that these values depend strongly on the presence of impurities and flaws in the materials.

Vantagens dos dielétricos:

Aumentam a capacidade

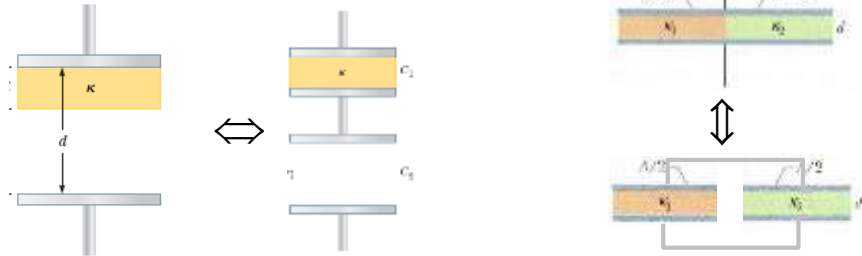
Aumentam a voltagem máxima de utilização

Podem proporcionar suporte mecânico entre as placas do condensador

Os dielétricos permitem manter o afastamento das placas, aumentam a ddp a que acontece o **colapso dielétrico** relativamente ao ar. Acima do E máximo, ocorre colapso do dielétrico. Para o ar, acima de 3MV/m, o ar ioniza e torna-se condutor.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 4 Capacidade eléctrica. Condensadores. Dielétricos.

Condensador com dielétrico com preenchimento parcial do espaço entre as placas



Condensador com placa metálica no espaço entre as placas

