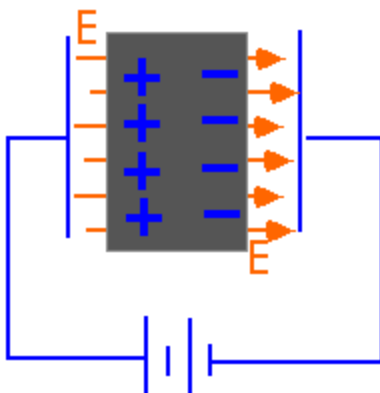


Aula 8: Dielétricos

Recordação: Definição de capacitância $C = q / V$

Capacitor de placas paralelas: $C = \epsilon_0 A/d$ (quando existe ar entre as placas)

Dielétrico (ou isolante): material que não conduz corrente elétrica – mobilidade baixíssima dos portadores de carga



Faraday, em 1837, descobriu que, quando o espaço entre as placas de um capacitor é preenchido com um dielétrico, sua capacitância aumenta por um fator $\kappa > 1$, dito “constante dielétrica” do material.

Material	Constante dielétrica	Material	Constante dielétrica
Ar	1,00	Papel	3,00
Baquelite	4,90	Fórmica	4,75
Vidro	7,75	Mica	5,40
Polietileno	2,30	Porcelana	5,57
Quartzo	3,80	Teflon	2,10
Pyrex	4,80	Madeira seca	1,40 – 2,90

Nas fórmulas de capacitância derivadas na aula passada tendo ar entre as placas, para incluir o efeito de um dielétrico, basta trocar a constante ϵ_0 por $\kappa\epsilon_0$. Por exemplo, um capacitor de placas paralelas contendo dielétrico entre as placas

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

Em geral, qualquer fórmula na eletrostática pode ser adaptada para um meio dielétrico, trocando-se ϵ_0 por $\kappa\epsilon_0$.

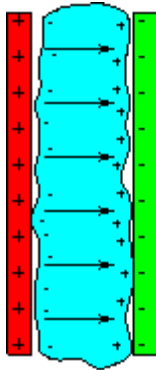
Ex.: força entre duas cargas puntiformes imersas num dielétrico (Lei de Coulomb)

$$F = \frac{1}{4\pi\kappa\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{d^2}$$

Ex.: campo elétrico nas proximidades da superfície de um condutor isolado, imerso num dielétrico

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

Como $\kappa > 1$ então o campo no dielétrico é sempre menor do que no ar: o efeito do dielétrico é enfraquecer o campo elétrico no meio. Isso ocorre pois as moléculas no interior do dielétrico são **polarizadas** pelo campo elétrico (os dipolos elétricos das moléculas se alinham com o campo elétrico externo). Essa polarização acarreta a formação de cargas elétricas induzidas nas superfícies da lâmina dielétrica com sinais contrários aos das cargas nas placas do capacitor, o que diminui o campo resultante dentro do dielétrico, e aumenta também sua capacitância.



Rigidez dielétrica: é a intensidade máxima do campo elétrico que um dielétrico pode suportar sem tornar-se um condutor de eletricidade (“ruptura dielétrica”). A rigidez dielétrica do ar vale

$$E_{\max} = 3 \times 10^6 \text{ V/m} = 3 \text{ MV/m}$$

Se $E > E_{\max}$ pode haver passagem de cargas pelo dielétrico, formando uma faísca ou arco voltaico (ou raio nas tempestades).

Problema resolvido: Uma certa substância tem uma constante dielétrica 2,8 e uma rigidez dielétrica 18 MV/m. Se a usarmos como dielétrico num capacitor de placas paralelas, qual deverá ser a área mínima das placas para que a capacitância seja de $7,0 \times 10^{-2} \mu\text{F}$, e para que o capacitor seja capaz de resistir a uma ddp de 4,0 kV.

Solução: $C = \kappa\epsilon_0 \frac{A}{d}$ donde a razão entre a área das placas e sua distância é

$$\frac{A}{d} = \frac{C}{\kappa\epsilon_0} = \frac{7,0 \times 10^{-2} \times 10^{-6}}{2,8 \times 8,85 \times 10^{-12}} = 2,82 \times 10^3 \text{ m}$$

Para que o capacitor não conduza eletricidade entre suas placas $E = (V/d) \leq E_{max}$. A distância mínima entre as placas deverá ser portanto

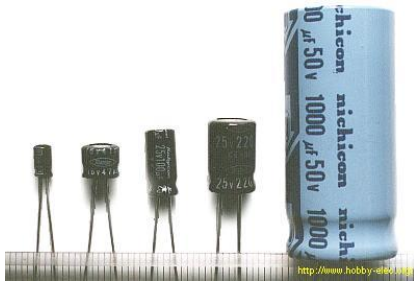
$$d = \frac{V}{E_{max}} = \frac{4,0 \times 10^3}{18 \times 10^6} = 2,22 \times 10^{-4} \text{ m}$$

que dá uma área mínima de

$$A = 2,82 \times 10^3 \times 2,22 \times 10^{-4} = 0,63 \text{ m}^2$$

Problema proposto: (a) Repita o problema anterior supondo a existência de ar entre as placas. (b) Se as placas forem quadradas, qual será o valor do seu lado? (c) Se forem circulares, qual será o raio? Respostas: (a) $10,5 \text{ m}^2$; (b) 3,2 m; (c) 1,8 m.

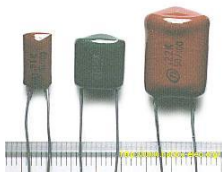
Tipos de capacitores mais usados na Eletrônica:



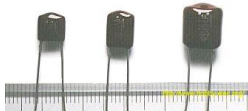
1) Eletrolítico – placas são eletrodos de alumínio, com um dielétrico formado por um sal condutor em solvente (solução eletrolítica). Devido a este fato eles são polarizados: só podem ser usados em um sentido da polarização, caso contrário podem explodir. São os tipos mais usados na prática, em quase todos os tipos de aparelhos eletrônicos.



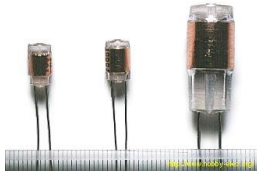
2) Tântalo: são capacitores eletrolíticos onde as placas são feitas de pentóxido de tântalo. Têm características superiores a eletrolíticos convencionais: operam a altas temperaturas e altas frequências.



3) Filme de poliéster: é o dielétrico usado neste tipo de capacitor, bastante usado por ser barato e estável em diversas temperaturas. Sua capacitância tem uma tolerância da ordem de 5 a 10%.



4) Filme de Polipropileno: é o dielétrico deste tipo de capacitor, usado quando uma tolerância mais alta é necessária (da ordem de 1%) para a capacitância.



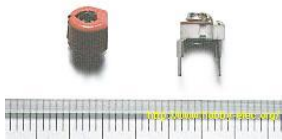
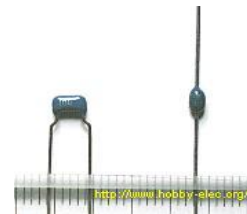
5) Filme de Poliestireno: usado como dielétrico, com placas (eletrodos) feitos de cobre ou prata.

6) Epóxi: usa um polímero com resina epoxi como revestimento protetivo. Bastante usado em aplicações.

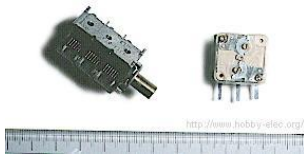


7) Cerâmicos: usam materiais como ácido titânico-bárico como dielétrico, bastante usados em aplicações de altas frequências. Junto com os eletrolíticos, são os capacitores mais utilizados na prática. São bastante sensíveis a variações de temperatura. Identificados por uma listra negra na ponta.

8) Multicamadas cerâmicas: o dielétrico é formado por muitas camadas cerâmicas. Bastante estáveis em temperatura e podem operar a altas frequências.



9) Capacitores variáveis: também conhecidos por trimmers (trimpots) usam cerâmicas ou filmes plásticos como dielétricos, e têm uma capacitância variável.



10) Capacitores de sintonia: utilizam ar como dielétrico. Muito usados em controle de sintonia de rádios, especialmente os mais antigos. Usualmente têm várias placas associadas com um eixo comum, que pode ser movido pelo botão de sintonia.

Terceiro dígito	Multiplicador	Letra	Tolerância
0	1	D	0,5 pF
1	10	F	1 %
2	100	G	2 %
3	1000	H	3 %
4	10000	J	5 %
5	100000	K	10 %
8	0,01	M	20 %

Valores de capacitância nos capacitores: podem variar de frações de pF até milhões de μ F. Por outro lado, a rigidez dielétrica dos materiais limita os valores das ddp que os capacitores podem aguentar (sem haver ruptura dielétrica). Os níveis de ddp máxima variam de alguns Volts até centenas de kV. Os valores da capacitância dos eletrolíticos são indicados diretamente no capacitor, juntamente com a ddp máxima. Em capacitores menores os valores usualmente são indicados por um código. Por exemplo, se um capacitor marca **105**, isto significa que sua capacitância vale 10 + 5 zeros em pF, ou seja, 10 + 00000

= 1.000.000 pF = 1000 nF = 1 μF. As letras adicionadas ao valor da capacitância representam a tolerância do valor, de acordo com a tabela acima. Outros capacitores podem somente ter impresso os números 0,1 ou 0,01. Neste caso, isso significa um valor da capacitância em μF.

Problema resolvido: Um capacitor cerâmico tem o código **474J** impresso em seu invólucro. Qual a faixa de capacitância que ele possui?

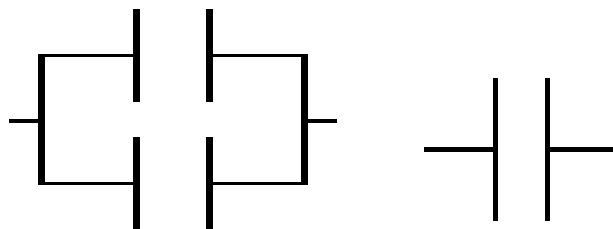
Solução: O código 474 significa, em picoFarads, 47 + 4 zeros = 470.000 pF = 470 nF = 0,47 μF, enquanto a letra J significa uma tolerância de 5%. Como 5% de 0,47 representa 0,47x5/100 = 0,023 a capacitância pode variar desde 0,47 – 0,023 = 0,447 μF até 0,47 + 0,023 = 0,493 μF.

Problema proposto: Qual o intervalo de capacitâncias de um capacitor com o código **835M**? Resposta: 9,96 μF < C < 6,64 μF

Nem sempre o capacitor que você necessita num circuito é aquele comercialmente disponível. Com frequência você deve associar os capacitores disponíveis a fim de conseguir a capacitância desejada. Para isso são usadas associações de capacitores.

Associação de capacitores: o capacitor equivalente tem a mesma capacitância C_{eq} da associação.

1º. Caso: Associação em paralelo: a ddp aplicada através da combinação é a mesma ddp em cada capacitor



Como a ddp V é a mesma sobre os capacitores, $q_1 = C_1 V$, $q_2 = C_2 V$

Carga total no capacitor equivalente: $q = q_1 + q_2 = (C_1 + C_2) V$

Capacitância equivalente: $C_{eq} = q/V$

$$C_{eq} = C_1 + C_2$$

2º. Caso: Associação em Série: a ddp através da associação é a soma das ddp resultantes através de cada capacitor

Como a carga q é a mesma sobre os capacitores, $q_1 = C_1 V = q_2 = C_2 V = q$

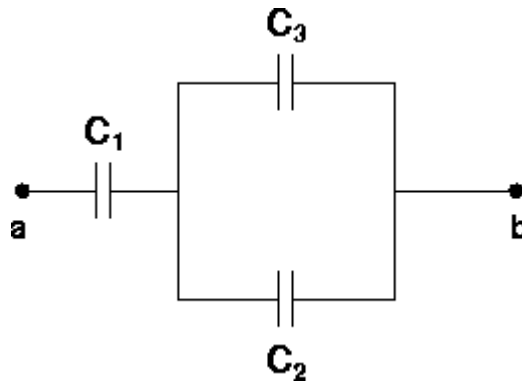
Ddp total no capacitor equivalente: $V = V_1 + V_2 = q(1/C_1 + 1/C_2)$

Capacitância equivalente: $C_{eq} = q/V$

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

Obs.: caso de dois capacitores: $C_{eq} = C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2)$ (“produto dividido pela soma”)

Problema resolvido: As capacitâncias da associação mista abaixo valem $C_1 = 4,0$ pF, $C_2 = 2,0$ pF e $C_3 = 5,0$ pF, enquanto há uma ddp igual a 12 V entre os pontos a e b. (a) Determine a ddp em cada capacitor; (b) Determine a carga em cada capacitor



Solução: Reduzimos primeiro a associação em paralelo dos capacitores C_2 e C_3 . A capacitância equivalente da parte em paralelo é $C_{23} = C_2 + C_3$. Depois trabalhamos com a associação em série resultante, cuja capacitância equivalente é

$$\frac{1}{C_{123}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_{23}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2 + C_3} = \frac{1}{4,0} + \frac{1}{2,0 + 5,0}$$

ou seja, $C_{123} = 2,54$ pF. A carga total da associação em série é

$$q = C_{123} V = 2,54 \times 10^{-12} \times 12 = 3,05 \times 10^{-11} \text{ C}$$

que é a mesma carga de C_1 e do capacitor equivalente da parte paralelo: $q = q_1 = q_{23}$

Logo $q_1 = 3,05 \times 10^{-11}$ C. A ddp sobre ele vale $V_1 = \frac{q_1}{C_1} = \frac{3,05 \times 10^{-11}}{4,0 \times 10^{-12}} = 7,62 \text{ V}$. Como as ddp

se somam na associação em série, a ddp sobre o capacitor equivalente é a diferença: $V_{23} = V - V_1 = 12 - 7,62 = 4,38 \text{ V}$. Na parte paralelo a ddp é a mesma para todos, então $V_2 = V_3 = 4,38 \text{ V}$. Finalmente, as cargas em cada um dos capacitores são

$$q_2 = V_2 C_2 = 4,38 \times 2,0 \times 10^{-12} = 8,76 \times 10^{-12} \text{ C}$$

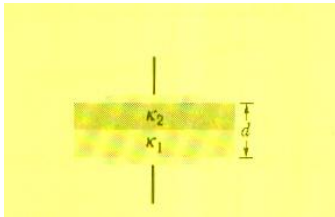
$$q_3 = V_3 C_3 = 4,38 \times 5,0 \times 10^{-12} = 2,19 \times 10^{-11} \text{ C}$$

Problema proposto: Um capacitor de $6,00$ μF é ligado em série com um capacitor de $4,00$ μF , e uma tensão de 200 V é aplicada à associação. (a) Ache a capacitância equivalente; (b)

Qual é a carga sobre cada capacitor? (c) Calcule a ddp para cada capacitor. Respostas: (a) 2,40 μF ; (b) 0,480 mC; (c) 80 V e 120 V.

Associação de capacitores com dielétricos entre as placas.

Problema proposto: Um capacitor de placas paralelas de área 0,1 cm^2 , e distância 0,2 mm entre as placas é preenchido com duas lâminas isolantes de papel e mica de mesma espessura. Determine sua capacitância.



Solução: Pela tabela papel $\kappa_1 = 3,00$ e mica $\kappa_2 = 5,40$. Pela configuração indicada, podemos considerar uma associação em série de dois capacitores (de papel e mica) de espessura $d/2$ cada

$$C_1 = \kappa_1 \epsilon_0 \frac{A}{d/2}, C_2 = \kappa_2 \epsilon_0 \frac{A}{d/2}$$

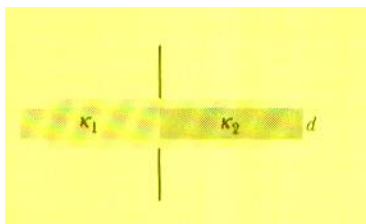
tal que a capacitância equivalente seja

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{d}{2\kappa_1 \epsilon_0 A} + \frac{d}{2\kappa_2 \epsilon_0 A}$$

ou seja

$$C_{eq} = \frac{2\epsilon_0 A}{d} \left(\frac{1}{\kappa_1} + \frac{1}{\kappa_2} \right)^{-1} = \frac{2 \times 8,85 \times 10^{-12} \times 0,1 \times (10^{-2})^2}{0,2 \times 10^{-3}} \left(\frac{1}{3,00} + \frac{1}{5,40} \right)^{-1} = 1,7 \times 10^{-12} \text{ F} = 1,7 \text{ pF}$$

Problema proposto: Qual a capacitância do capacitor abaixo, onde os dielétricos, a área das placas e a distância entre elas são os mesmos do problema anterior. Resposta: 1,86 pF



Energia em associações de capacitores

Problema resolvido: Um capacitor é carregado até que sua energia armazenada seja de 4,0 J. Um segundo capacitor descarregado é, então, ligado a ele em paralelo. (a) Sabendo-se que a carga se distribui igualmente, qual é, agora, a energia total armazenada nos campos elétricos? (b) Para onde vai o excesso de energia?

Solução: (a) A energia inicial no primeiro capacitor é $U_0 = Q^2/2C = 4,0 \text{ J}$, donde sua carga é $Q = (2CU_0)^{1/2}$, que é dividida igualmente entre os dois capacitores, de modo que a carga em cada um deles é $q = Q/2$. A energia final do sistema é

$$U = 2\left(\frac{q^2}{2C}\right) = 2\left(\frac{Q^2/4}{2C}\right) = \frac{Q^2}{4C} = \frac{U_0}{2} = \frac{4,0}{2} = 2,0 \text{ J}$$

(b) A diferença de energia ($4,0 - 2,0 = 2,0 \text{ J}$) é dissipada no circuito sob a forma de energia térmica nos fios condutores.

Problema proposto: Um capacitor de $C_1 = 2,0 \text{ pF}$ é carregado sob uma diferença de potencial de 12 V. A bateria que o carregou é então retirada e o capacitor é ligado em paralelo a um outro capacitor descarregado de $C_2 = 4,0 \text{ pF}$. (a) Qual o valor da ddp através do sistema? (b) Qual a energia elétrica acumulada no sistema antes e depois de colocar o segundo capacitor? Respostas: (a) 4 V, (b) 48 pJ

Problema suplementar: Um capacitor de placas paralelas de capacitância 13,5 pF é colocado sob uma ddp de 12,5 V. Retira-se a bateria e coloca-se uma lâmina de porcelana ($\kappa = 6,50$) entre suas placas. (a) Qual a energia potencial do sistema, antes e depois de introduzir a lâmina? (b) Qual o trabalho realizado por um agente externo para retirar a lâmina do sistema? Respostas: (a) 160 pJ; (b) 888 pJ.