



# **ELECTROMAGNETISMO**

# Curso de Electrotecnia e de Computadores

1º Ano – 2º Semestre

2010-2011

# Capítulo V – Capacitância e Dieléctricos

# 5.1 Capacitância

## 5.1.1 Condensador

Um condensador é um sistema formado por dois condutores que se encontram separados por um material isolante (também chamado de dieléctrico). Este dispositivo permite o armazenamento de carga e energia eléctrica num campo eléctrico. Aos condutores (metálicos) de um condensador damos o nome de **armaduras** ou **placas** do condensador. Em particular, o material isolante de um condensador pode ser o vácuo (vazio). Têm uma vasta aplicação nos nossos circuitos eléctricos e electrónicos. A sua forma e tamanho pode variar muito, consoante as especificações necessárias (figuras 5.1a e 5.1b). Podemos inclusive considerar o nosso planeta como um gigantesco condensador esférico, em que o material isolante é o próprio ar atmosférico (ver exercício 17 da ficha 1).



Figura 5.1 – Vários tipos de condensadores; a) de circuitos electrónicos e micro-electrónicos, b) de máquinas eléctricas.

Os condensadores são geralmente usados nos circuitos electrónicos, de forma a bloquearem o fluxo de corrente contínua (CC) e deixarem somente passar a corrente alternada (CA). Servem também para bloquear interferências, tornar mais regular a corrente fornecida por fontes de alimentação e para muitas mais funções. São igualmente usadas em circuitos de ressonância, em equipamentos de rádio-frequência, na selecção de frequências específicas num sinal com muitas frequências (circuitos filtrantes). O efeito de condensador foi descoberto em 1745 por *Ewald G. von Kleist*. Independentemente, no ano seguinte, *Pieter van Musschenbroek* inventou um condensador similar ao qual chamou garrafa de Leyden.

## 5.1.2 Definição de capacitância

Teoricamente um **condensador ideal** é constituído por um sistema de dois corpos condutores isolados, nas proximidades um do outro. Quando carregado, a quantidade de carga em cada corpo é igual em módulo, mas de sinal contrario (figura 5.2). Significa isto que o nosso sistema é isolado, e que todas as linhas do campo eléctrico que divergem da armadura positiva, convergem para a armadura negativa (pela aplicação da lei de *Gauss*).

Consideremos então um condensador cujas armaduras têm respectivamente as carga eléctrica +Q = -Q, e o material isolante é o vácuo. Admitamos que entre as armaduras existe uma diferença de potencial eléctrico (d.d.p.) de V (volt).



Figura 5.2 – Definição e descrição de um condensador.

Define-se a **capacitância** (ou **capacidade eléctrica**) de um condensador, *C*, pela razão entre a magnitude da carga das armaduras e a d.d.p. entre as mesmas, isto é;

$$C = \frac{Q}{V} \tag{5.1}$$

No Sistema Internacional, a unidade da capacidade eléctrica C é expressa em **farad** (**F**), sendo 1 F = 1 C V<sup>-1</sup>. Este é também o valor que deixará passar uma corrente eléctrica de 1 ampere quando a tensão estiver a variar à razão de 1 volt por segundo.

A capacidade *C* é sempre um valor positivo. Além disso, como a carga aumenta com o aumento da d.d.p., essa razão permanece sempre constante (no condensador ideal). A capacitância verifica-se sempre que dois condutores estejam separados por um material isolante. Usualmente nos nossos circuitos electrónicos, os condensadores têm capacidades muito abaixo da unidade (1 F), da ordem dos  $10^{-6}$  a  $10^{-12}$  F (ou inferior)..

## 5.1.3 O valor da capacitância

Vejamos então quais os parâmetros que afectam o valor de capacitância de um qualquer condensador, sem recorrer à sua carga armazenada quando submetidos a uma determinada d.d.p., que são valores relacionados, mas não constantes.

#### 5.1.3.1 Capacidade de um condutor esférico

Consideremos uma esfera condutora isolada e de raio R, no vácuo. Se esta estiver no interior de outra esfera oca, concêntrica com a primeira e de raio infinito, então a sua capacitância virá dada por:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{k_0 \frac{Q}{R}} = \frac{R}{k_0} = 4\pi\varepsilon_0 R$$
(5.2)

O valor da capacidade eléctrica do condensador esférico é apenas função do raio R (da primeira armadura) e do meio existente entre as armaduras.



Um condutor esférico com R = 10 cm, tem capacidade C = 11,1 pF (figura 5.3). [a nossa máquina electrostática, com uma d.d.p. de  $2 \times 10^5$  V, consegue então, nesta aproximação, acumular uma carga eléctrica de  $2,22 \times 10^{-6}$  C =  $2,22 \mu$ C].

(ver exercício 19 da ficha 1).

Vemos assim que a **capacidade eléctrica** de um condensador **depende da sua geometria** e do **material que o preenche**.

Vamos ver primeiro só o efeito da geometria, considerando a existência do vácuo entre os condutores (armaduras do condensador).

Figura 5.3 – Condutor esférico com 20 cm de diâmetro (máquina electrostática).



Regra geral, a capacidade eléctrica de um condensador esférico (no vácuo) é dada pela seguinte expressão (figura 5.4):

$$C = 4\pi\varepsilon_0 \frac{ab}{b-a} \tag{5.3}$$

Figura 5.4 – Condensador esférico de raio interior **a** e raio exterior **b**.

#### Exercício 5.1

Calcule a capacitância da Terra, sabendo que o raio médio terrestre é 6371 km. Considere a camada isolante com 100 km de espessura e tome a atmosfera como o vácuo.

#### 5.1.3.2 Capacidade de um condutor plano

Consideremos o caso simples de um sistema constituído por duas placas metálicas iguais, rectangulares, de área A ( $a \times b$ ) e que se enfrentam paralelamente, separadas de uma distância d, (figura 5.5). Se  $d \ll A$  e a carga for  $+Q \in -Q$ , podemos considerar o campo eléctrico entre as placas como uniforme e perpendicular às mesmas, (vamos aqui desprezar o chamado *efeito de bordo*. Ao faze-lo, isso é equivalente a considerar o campo gerado por uma placa infinita, neste caso o efeito das "duas placas").



Figura 5.5 – Condensador de faces plano-paralelas.

Neste condensador, a carga por unidade de área será então:

$$\rho_s = \frac{Q}{A} \tag{5.4}$$

E a intensidade do campo eléctrico pode então ser expressa por:

$$E = 2 \times \frac{\rho_s}{2\varepsilon_0} = \frac{Q}{\varepsilon_0 A}$$
(5.5)

Como o campo eléctrico é uniforme (figura 5.6a), a d.d.p. *V*, é dada por *Ed*, (expressão 4.15) vindo então:

$$V = Ed = \frac{Qd}{\varepsilon_0 A}$$
(5.6)



Figura 5.6 – Campo eléctrico uniforme no interior de um condensador plano; a) caso ideal, b) caso real com *efeito de bordo*.

e a capacitância *C*, como; 
$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$$
 (5.7)

A capacidade eléctrica de um condensador plano (ou de qualquer outro) é então **função exclusiva** da sua **geometria** (e do **material isolante existente entre as armaduras**). Neste caso da área A e distância de separação d entre as placas. A capacitância é proporcional à área A e inversamente proporcional à distância d. Quanto maior a área, mais capacidade dispõe o condensador de armazenar carga eléctrica. Quanto menor a distância entre as armaduras, mais intenso é o campo eléctrico e mais cargas eléctricas se conseguem atrair para as armaduras.

Na prática, num condensador deste tipo, as linhas do campo eléctrico não ficam confinados ao seu interior, existindo o *efeito de bordo*, que diminui o valor efectivo da capacidade do condensador (figura 5.6b).

Para termos uma noção do valor da capacidade eléctrica, consideremos o seguinte condensador (ideal) plano, com placas quadradas de 10 cm de lado, separadas de 1 mm entre si, no vácuo;

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d} = 8,85 \times 10^{-12} \frac{0,01}{0,001} = 8,85 \times 10^{-11} F = 88,5 \text{ pF}$$

#### 5.1.3.3 Capacidade de um condutor cilíndrico (cabo coaxial)

Um condensador cilíndrico é constituído por duas armaduras cilíndricas concêntricas, de comprimento L, onde uma armadura (exterior) envolve completamente a outra (armadura interior). A capacidade eléctrica deste condensador é dada por:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0 L}{\ln(b/a)}$$
(5.8)



#### Exercício 5.2

Calcule a capacidade eléctrica de um cabo coaxial com as seguintes características: raio interior de 0,5 mm, raio exterior de 4 mm e um comprimento de 10 m. (consideramos que existe vácuo no seu interior).

## 5.1.4 Associação de condensadores

Os elementos capacitivos (condensadores) podem ser associados de distintos modos, variando assim o conjunto, a sua capacidade e demais parâmetros, em relação aos elementos individuais.

#### 5.1.4.1 Associação de condensadores em série

Se associarmos vários condensadores em série, obtemos (figura 5.8);



Figura 5.8 – Associação de condensador em série.

$$Q_{eq} = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n \tag{5.9}$$

$$V_{eq} = V_1 + V_2 + \dots + V_n = \sum_{i=1}^n V_i$$
(5.10)

e

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$
(5.11)

Na associação em série de condensadores, o inverso da capacidade equivalente é igual à soma dos inversos das capacidades dos condensadores.

#### 5.1.4.2 Associação de condensadores em paralelo

Se associarmos vários condensadores em paralelo, obtemos (figura 5.9);



Figura 5.9 – Associação de condensador em paralelo.

$$Q_{eq} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \sum_{i=1}^n Q_i$$
 (5.12)

$$V_{eq} = V_1 = V_2 = \dots = V_n \tag{5.13}$$

e

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i$$
(5.14)

Na associação em paralelo de condensadores, a capacidade equivalente é igual à soma das capacidades dos condensadores.

#### 5.1.5 Energia armazenada nos condensadores

Vimos no capítulo anterior, que o trabalho realizado ("dispêndio" de energia) para reunir cargas eléctricas, fica "armazenado" no sistema de cargas eléctricas como energia potencial eléctrica ( $E_{PE}$ ).

Constatamos desta forma que podemos na prática armazenar energia em sistemas electrostáticos. E é isso que tecnicamente acontece em vários dispositivos, com superior vantagem, comparativamente a outros sistemas (mecânicos, químicos, etc).

As principais vantagens do armazenamento de energia sob esta forma (eléctrica) são duas:

- 1<sup>a</sup> Eficiência A energia que se "perde" (no processo) é da ordem de  $10^{-5}$ ,
- 2<sup>a</sup> Rapidez A "inércia" é muito pequena, ou seja, o tempo de resposta é rápido.

Para um sistema de cargas, a sua energia (potencial) é tanto maior quanto mais perto elas estiverem entre si, pelo que o nosso "armazém" de cargas deve ter uma forma que aproxime as mesmas, por exemplo duas placas metálicas paralelas, a curta distância, carregadas respectivamente com -Q e +Q. Este dispositivo é o nosso condensador, pois exibe a capacidade de armazenar carga (energia eléctrica).

#### 5.1.5.1 Energia de um condensador

A energia armazenada num condensador é directamente proporcional à d.d.p. aplicada entre as suas armaduras e à carga armazenada (Q). Ao aplicarmos uma d.d.p. num condensador descarregado (neutro), a quantidade de carga vai variar em cada placa de 0 a +Q (e -Q). Vamos acrescentar continuamente carga infinitesimal dq sob o efeito do campo eléctrico entre as armaduras do condensador.

O trabalho infinitesimal (e a energia) para transportar uma carga dq da placa negativa para a placa positiva, é:

$$dW = Vdq = \frac{q}{C}dq \tag{5.15}$$

Logo, toda a energia dispendida, desde a carga 0 (zero) até à carga final Q, é:

$$E_{PE} = \int_{0}^{Q} V dq = \int_{0}^{Q} \frac{q}{C} dq = \frac{1}{2} \frac{Q^{2}}{C}$$
(5.16)

$$E_{PE} = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} Q V$$
(5.17)

As expressões (5.17) representam a energia electrostática armazenada num condensador de capacitância C, submetido a uma d.d.p. de V e armazenando uma quantidade de carga Q.

A energia armazenada num condensador é assim causada por um desequilíbrio interno da carga eléctrica do mesmo. Deve ser efectuado trabalho por uma fonte externa, de maneira a mover cargas entre as suas armaduras. Se for permitido à carga em questão regressar à sua posição inicial, dá-se "libertação" dessa energia armazenada.

Como podemos então aumentar a carga (e a energia) armazenada num condensador? A capacidade depende da geometria (como constatado). Podemos então;

- aumentar a área e/ou diminuir a distância entre as armaduras,
- aumentar a d.d.p. aplicada nas armaduras.
- e podemos também colocar um dieléctrico entre as armaduras (diferente do vácuo).

A única maneira de obter mais capacidade eléctrica, sem alterar a forma e tamanho de um condensador ou aplicar-lhe uma d.d.p. maior, é efectivamente colocar no seu interior um dieléctrico de maior permissividade eléctrica  $\varepsilon$ . O vácuo tem a menor permissividade eléctrica  $\varepsilon_0$ .

Vejamos então o comportamento dos meios materiais isolantes quando sujeitos a um campo eléctrico.

## **5.2 Dieléctricos**

Como já sabemos da definição, um material dieléctrico não conduz electricidade. Mas isso não significa que tais materiais não "sintam" e "reajam" ao campo eléctrico.

#### 5.2.1 Introdução de um dieléctrico num condensador

A experiência esquematizada nas figuras 5.10 e 5.11, permite-nos por em evidencia o facto de que a interposição de uma placa de material isolante, entre as armaduras de um condensador, provocar a modificação das propriedades do campo eléctrico aí previamente estabelecidas.



Figura 5.10 – Condensador carregado, com vácuo entre as armaduras.

Consideremos então a situação inicial, em que a armadura  $A_1$  está ligada a um electroscópio, e ambos estão isolados, mas electrizados. Esta electrização é verificada no electroscópio, e é tanto maior quanto mais afastadas estiverem as palhetas deste. A segunda armadura ( $A_2$ ) está ligada à Terra e adquire a correspondente carga negativa. Consideramos igualmente que esta armadura tem potencial eléctrico de zero volt.



De seguida, inserimos uma placa isolante no espaço intra armaduras (figura 5.11).

Figura 5.11 – Introdução de um dieléctrico no condensador. Diminuição da sua d.d.p..

A inserção do dieléctrico tem por efeito diminuir o potencial da armadura A<sub>1</sub>, efeito acusado pelas palhetas do electroscópio.

Como termo de comparação, vejamos a seguinte situação, ilustrada nas figuras 5.12a e 5.12b. O espaço entre as armaduras do mesmo esquema experimental (com vácuo entre as armaduras), é progressivamente diminuído. A redução da distância entre as armaduras  $A_1$  e  $A_2$  provoca um efeito equiparável ao da introdução do isolante entre estas. Sendo constante, em ambas as experiências, a carga existente no ramo  $A_1$  e electroscópio (que se encontra isolado) e estando a  $A_2$  ao potencial zero, a diminuição do potencial acusada pelo electroscópio, **interpreta-se** obviamente, em ambos os casos, **como um aumento da capacitância do condensador**.



Figura 5.12 – a) armaduras afastadas, b) aproximação das armaduras e diminuição da sua d.d.p..

## 5.2.2 Comportamento de um condutor e de um dieléctrico, sob a acção de um campo

Vimos já (capitulo 3) que os materiais condutores e isolantes, quando electrizados, exibem diferentes comportamentos. Aprofundemos essas anteriores constatações, com os seguintes resultados experimentais, ilustrados na figura 5.13a e 5.13b.



Figura 5.13 – a) electroscópio sob um condutor b) electroscópio sob um isolante.

Ao aproximar um corpo electrizado (bastão) do electroscópio, que se encontra encerrado sob um material condutor, não verificamos qualquer efeito do campo eléctrico do bastão sobre a esfera B do electroscópio (figura 5.13a). O campo eléctrico é e permanece nulo em torno da esfera B.

Pelo contrario, ao aproximarmos um corpo electrizado (bastão) do electroscópio que se encontra encerrado sob um material dieléctrico, verificamos que o efeito do campo eléctrico atinge a esfera B do electroscópio, pois as suas palhetas afastam-se gradualmente, acusando um aumento de potencial eléctrico (figura 5.13b).

Verificamos assim que uma camada fechada de material isolante, com uma cavidade no seu interior - não produz efeito de écran eléctrico.

## 5.2.3 Inseparabilidade das cargas induzidas num dieléctrico

Para constatar as distintas propriedades dos materiais isolantes, em relação aos condutores, vamos recordar a influência electrostática sobre os condutores, como ilustrado na seguinte figura (5.14a). Coloquemos duas esferas neutras em contacto. Ao aproximarmos um corpo electrizado (bastão) com carga positiva. Verificamos que ocorre uma redistribuição de cargas, ficando a esfera mais próxima do bastão, com excesso de carga negativa e a esfera mais afastada, com excesso de carga positiva. Separemos agora as esferas. Cada uma tem agora, respectivamente, excesso de carga negativa e positiva (em igual quantidade). Ao afastarmos o bastão essa situação permanecerá. A acção inicial do campo eléctrico do corpo electrizado permanece, mesmo após este ter sido removido.

Num condutor, as cargas eléctricas são susceptíveis de se localizar em regiões muito afastadas, à escala macroscópica, dentro do condutor, e **podem em consequência ser separadas** umas das outras.



Figura 5.14 – a) electrização de condutores b) electrização de dieléctricos.

Se repetirmos a mesma experiência, mas com dois corpos isolantes, constatamos um resultado diferente (figura 5.14b). Comecemos por colocar dois dieléctricos no estado neutro em contacto. De seguida, ao aproximarmos um corpo electrizado (bastão) com carga positiva, verificamos que estes adquirem uma electrização, exibindo o dieléctrico mais próximo do bastão uma face com carga negativa. A face oposta do segundo dieléctrico exibe carga positiva. Ao separarmos ligeiramente os dois dieléctricos, na presença do bastão, ainda constatamos existir carga superficial neste, alternadamente negativa e positiva nas consecutivas faces, desde o bastão. Por fim, com o afastamento do bastão electrizado, observamos que ambos os dieléctrico voltam ao estado inicial neutro. A acção inicial do campo eléctrico do corpo electrizado não permanece, após este ter sido removido.

Este comportamento é flagrantemente distinto dos verificados com os condutores. O que significa que as cargas induzidas nos dieléctricos se reduziram mutuamente a zero, após terminar a acção do campo eléctrico. As cargas induzidas nos corpos dieléctricos são inseparáveis – o que está directamente relacionado com a incapacidade de tais cargas se deslocarem de modo a que as cargas positivas se distanciem apreciavelmente das negativas.

## 5.2.4 Polarização da matéria

Mesmo sendo um material dieléctrico, os seus constituintes (átomos e moléculas), estão na mesma sujeitos as acções do campo eléctrico onde estão imersos e com ele interactuam, como acabamos de verificar.

Essas acções de interacção são de dois tipos;

- deformação na nuvem electrónica dos átomos,
- orientação dos dipólos permanentes.

#### 5.2.4.1 Deformação da nuvem electrónica dos átomos

Quando sujeitamos um átomo a um campo eléctrico, as suas cargas constituintes sofrem forças eléctricas, sendo estas de sentido contrário entre as cargas positivas e negativas. Os

centros geométricos das cargas positivas (núcleo) e negativas (nuvem de electrões), que antes coincidiam, estarão agora afastados e temos consequentemente a deformação do átomo na direcção do campo eléctrico exterior, como podemos verificar nas figuras 5.15 e 5.16.



Figura 5.15 – Deformação da nuvem electrónica do átomo.

Com essa infinitesimal deformação a ocorrer em todos os átomos, a configuração do dieléctrico faz com que este se comporte como um corpo electrizado, com uma face positiva voltada para a armadura negativa (e o inverso na outra face). O seu interior é electricamente neutro, mas as suas faces exteriores, voltadas para as armaduras (no caso do condensador) exibem um efeito de carga superficial.

A este fenómeno damos o nome de polarização da matéria.

Desta forma essas superfícies electricamente carregadas conseguem atrair ainda mais cargas para as armaduras do condensador, aumentando a carga nestas, sem alteração da d.d.p. aplicada ou da forma do condensador.

Figura 5.16 – Dieléctrico polarizado no interior das armaduras do condensador.

## 5.2.4.2 Orientação dos dipólos permanentes

Quando temos moléculas de forma dipolar, estas em qualquer instante, quando não sujeitas a um campo eléctrico, encontram-se igualmente (estatisticamente) orientadas em todas os sentidos espaciais.

Mas quando sujeitamos estas moléculas a um campo eléctrico exterior, as distintas acções eléctricas sobre os seus pólos, criam um momento no dipólo, induzindo uma rotação na molécula, alinhando-se o dipólo com a direcção e sentido do campo eléctrico, figura 5.17.

Nos líquidos a mobilidade das moléculas dipolares é maior, pelo que é mais fácil o seu uso e aplicabilidade como materiais dieléctricos, como por exemplo; H<sub>2</sub>O, HCl.



Figura 5.17 – Polarização de um dieléctrico por orientação das moléculas dipolares.



## 5.2.5 Capacidade do condensador plano

Vejamos agora as observações e constatações macroscópicas da introdução de um dieléctrico no interior de um condensador plano, como expresso nas seguintes figuras 5.18 e 5.19.

- No primeiro caso (figura 5.18), após a carga do condensador, a introdução do dieléctrico no seu seio, faz diminuir a d.d.p. aos seus terminais.

- No segundo caso (figura 5.19), estando o condensador ainda ligado à sua fonte, a introdução do dieléctrico provoca um aumento da carga acumulada nas suas armaduras.



Figura 5.18 – Introdução de um material dieléctrico no interior de um condensador plano carregado.



Figura 5.19 – Introdução de um material dieléctrico no interior de um condensador plano ligado.

2010-2011

Vejamos agora as causas destes fenómenos.

Como temos um dieléctrico imerso no interior das placas, o campo eléctrico total aí existente



vai ser a soma do campo criado pelas cargas das armaduras mais o campo criado pela polarização do dieléctrico (figura 5.20);

$$\left|\vec{E}_{T}\right| = \frac{\rho_{S}}{\varepsilon_{0}} = \frac{Q-q}{\varepsilon_{0}A}$$
(5.18)

sendo Q a carga da armadura e q a carga do dieléctrico.

Figura 5.20 – Campos eléctricos existentes no interior das armaduras de um condensador plano com dieléctrico.

A d.d.p. aos terminais do condensador vem então;

$$V = \frac{Q - q}{\varepsilon_0 A} d \tag{5.19}$$

e

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{Q-q} \frac{\varepsilon_0 A}{d}$$
(5.20)

e designamos  $\varepsilon_r$  como a **permitividade relativa** do dieléctrico, também conhecida por **constante dieléctrica**. Esta quantidade é por definição, adimensional.

$$\varepsilon_r = \frac{Q}{Q - q} \tag{5.21}$$

A quantidade de carga q acumulada na superfície do dieléctrico é (em quase todos os materiais dieléctricos) proporcional ao campo eléctrico (ou seja à carga eléctrica total equivalente Q - q).

Definimos a susceptibilidade eléctrica do dieléctrico, como;

$$\chi_e = \frac{q}{Q - q} \tag{5.22}$$

vindo então que;

$$\varepsilon_r = 1 + \chi_e \tag{5.23}$$

e a capacidade do condensador (plano) como;

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{d} \tag{5.24}$$

e fazendo  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_r \mathcal{E}_0$ , temos então que:

$$C = \frac{\mathcal{E}A}{d} \tag{5.25}$$

#### $\varepsilon$ é a **permitividade do dieléctrico**.

Vejamos alguns valores de materiais usados como dieléctricos nos condensadores, sabendo que esses mesmos materiais não são isolantes perfeitos e que permitem uma "perda" de carga no decorrer do tempo (tabela 5.1). Ao contrário do condensador ideal, que é caracterizado apenas por um valor constante – a sua capacitância, os condensadores reais, devido ao elemento dieléctrico deixar passar uma pequena quantidade de corrente (corrente de fuga), têm também inerente essa caracterização, normalmente definida como a "meia vida da carga". Mais ainda, os materiais dieléctrico possuem um limite de intensidade do campo eléctrico que resulta numa tensão de ruptura (a tensão mínima para o tornar electricamente condutor), pelo que não podemos aplicar tensões eléctricas (d.d.p.) acima de um determinado limite.

Dieléctrico	E <sub>r</sub>	Xe	"Meia vida da carga"
Vazio	1	0	dias
Ar	1,00059	0,00059	dias
Óleo de transformador	2,24	1,24	dias
Poliestireno	2,55	1,55	dias
Baquelite	4,9	3,9	horas
Papel encerado	5	4	horas
Vidro <i>pirex</i>	5,6	4,6	horas
Mica	6,5	5,5	horas
Porcelana	7,0	6,0	horas
Cerâmica	100	99	horas
Cerâmica "high"	1000	9999	minutos
Água (20 °C)	80	79	segundos

Tabela 5.1 – Alguns materiais usados em condensadores.

Fizemos simplesmente a análise para o condensador plano, mas os **resultados obtidos são válidos para qualquer tipo de condensador**.

Quando inserimos num condensador um dieléctrico de valor  $\varepsilon_r$ , a sua capacidade de armazenamento de carga aumenta  $\varepsilon_r$  vezes. A energia armazenada aumenta igualmente na mesma proporção.

no vazio

 $C = C_0$  e  $E_0 = \frac{1}{2}C_0V^2$ 

com dieléctrico

$$C = C_0 \varepsilon_r$$
 e  $E = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} C_0 \varepsilon_r V^2 = \varepsilon_r \frac{1}{2} C_0 V^2 = \varepsilon_r E_0$ 

#### 5.2.6 Condensadores reais - materiais

O armazenamento da carga nos condensadores não é instantâneo. À medida que a carga vai sendo armazenada e a d.d.p. vai correspondentemente aumentando no condensador, o transporte de carga dq (corrente eléctrica) vai diminuindo até se extinguir, ficando então o condensador carregado, figura 5.21.



Figura 5.21 – Carga de um condensador.

A energia no condensador pode ser considerada como a energia no campo eléctrico, que é criado entre as placa no processo de carga, pela aplicação da d.d.p..

Vejamos então para o nosso condensador plano, que;

$$E_{PE} = \frac{1}{2}CV^{2} = \frac{1}{2}\frac{\mathcal{E}A}{d}E^{2}d^{2} = \frac{1}{2}\mathcal{E}AdE^{2}$$
(5.26)

O volume ocupado pelo campo eléctrico é Ad.

Temos então que a energia por unidade de volume – densidade de energia (u), é:

$$u = \frac{E_{PE}}{volume} = \frac{E_{PE}}{Ad} = \frac{1}{2} \mathcal{E} E^2 \qquad \text{Jm}^{-3}$$
(5.27)

Os condensadores estão comercialmente disponíveis de muitas formas diferentes. As suas características e funcionalidades são influenciadas pelo tipo de meio dieléctrico, pela estrutura das armaduras e pela embalagem do dispositivo.

A esmagadora maioria dos condensadores incluem dieléctricos que permitem aumentar a sua capacitância, como acabamos de verificar. Os de baixa capacitância podem usar vácuo entre as suas placas, permitindo o seu funcionamento a elevadas d.d.p. e perdas reduzidas. Os condensadores variáveis com as suas placas expostas à atmosfera são normalmente usados na afinação de circuitos de rádio. Os desenhos mais recentes de condensadores utilizam folhas laminadas de polímeros como material dieléctrico entre as placas móveis e estacionárias.

Estão disponíveis diversos materiais sólidos para meios dieléctricos, incluindo papel (um dos mais antigos), plástico, mica e cerâmicas. Os condensadores electrolíticos recorrem a placas de alumínio ou tântalo com uma camada dieléctrica de óxidos que o separam de um segundo eléctrodo líquido.

Os condensadores têm muitas utilizações em sistemas eléctricos e electrónicos, de tal forma que existem poucos produtos deste género que não possuam pelo menos um. Este tipo de dispositivo pode armazenar energia eléctrica quando desligado do seu circuito de carregamento, podendo ser usados como baterias temporárias. Os condensadores médios de tipo electrostático têm uma densidade energética (*u*) (em massa) inferior a 360 J/kg, enquanto os de tecnologias emergentes mais recentes podem ultrapassar os 2520 J/kg, com os condensadores de superfícies fractais.