

Faculdade Pitagoras
Unidade Divinópolis – Minas Gerais.

Engenharia Elétrica

Disciplina: Materiais Elétricos
Prof. Eng. Alexandre Dezem Bertozzi, Esp.
www.bertozi.com

Tema 04: Efeitos de Campo Elétrico

complexas se a relutância do circuito magnético externo oscilar.

Ao projetar um magneto é necessário tomar em consideração a fuga, pelo uso de uma margem F_a de f.m.m. (normalmente não mais de 1,25) e uma margem de fluxo Φ_a , que pode ser qualquer valor entre 2 a 20, sendo maior para um coeficiente de comprimento de abertura pela seção de abertura.

Se H_g = resistência do campo na abertura, l_g = comprimento da abertura, A_g = seção de abertura, B_m = densidade de trabalho no magneto, H_m = trabalho desmagnetizante de resistência de campo no magneto, l_m = comprimento de magneto, e A_m = seção de magneto, então pode ser demonstrado que

$$H_g = \sqrt{[(B_m H_m / F_a \Phi_a)(A_m l_m / A_g l_g)]}.$$

i.é, é maior quando $B_m H_m$ é máximo. Isto ocorre num ponto de trabalho em $(BH)_{\max}$. A seção e comprimento do magneto devem ser proporcionados para a liga e as dimensões de abertura para assegurar as condições exigidas. A seção é $A_m = (H_g A_g \Phi_a / B_m)$ e o comprimento $l_m = (H_g l_g F_a / H_m)$. Para calcular estes, os valores de B_m e H_m no ponto $(BH)_{\max}$

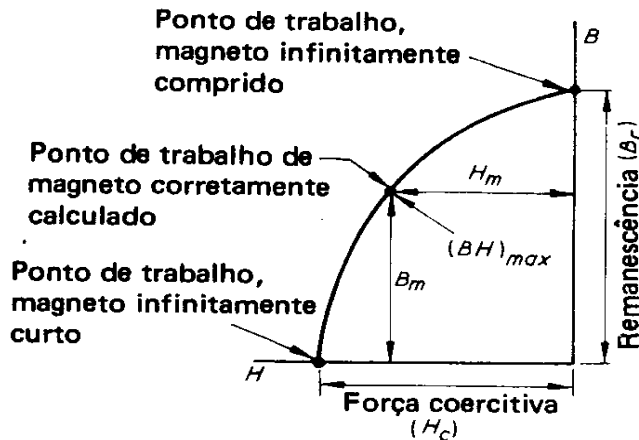


Figura 2.23 Condições de magneto permanente

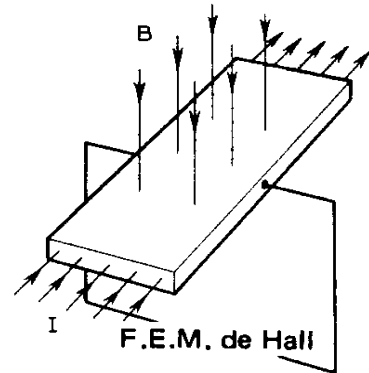


Figura 2.24 Efeito de Hall

devem ser conhecidos. Alternadamente, se os três pontos correspondendo à densidade de fluxo remanescente B_r , a $(BH)_{\max}$ e a força coercitiva H_c são dados, os valores de trabalho podem ser calculados de

$$B_m = \sqrt{[(BH)_{\max}(B_r/H_c)]} \quad \text{e} \quad H_m = \sqrt{[(BH)_{\max}(H_c/B_r)]}.$$

Efeito de Hall

Se um condutor plano transportando uma corrente I é colocado num campo magnético B perpendicular a ele, *Figura 2.24*, então é estabelecido um campo elétrico através da largura do condutor. Este é o efeito de Hall, a geração de uma f.e.m. transversal pelo movimento de elétrons através do campo magnético. (A f.e.m. de Hall é adicional a, e sobreposta sobre, o campo elétrico ao longo do condutor conseqüentemente sobre a queda de IR .) A f.e.m. de Hall, normalmente alguns microvolts, pode ser apreciada por meio de pancadinhas aplicadas às arestas do condutor. O efeito tem sido usado para medir correntes pelo seu efeito magnético, e para a indicação de potências de alta frequência.

EFEITOS DE CAMPO ELÉTRICO

Campo elétrico

Quando dois condutores são separados num vácuo (ou, para todos os objetivos práticos, no ar) e são mantidos a uma diferença de potencial, um estado eletrificado é obtido no espaço circundante. Consideremos os tais dois condutores A e B , *Figura 2.25*. A aplicação de uma diferença de potencial provoca uma corrente de elétrons de A para B , deixando A positivo e tornando B negativo.

2-40 ELETROTECNOLOGIA

A carga positiva em *A* evita que o deixem mais que um determinado número de elétrons dependendo da diferença de potencial, da dimensão e configuração das placas, e da distância entre elas. *B* tem um excesso de elétrons que repelem outros que chegam, de modo que aqui o equilíbrio também é estabelecido. O novo estado elétrico no espaço entre as placas é chamado de *campo elétrico*. Como está sendo estabelecido o campo elétrico, os elétrons da corrente de condução fluem de placa para placa. Se, como na *Figura 2.25 (c)*, as placas são mantidas muito juntas, as cargas negativa e positiva em parte se neutralizam, perturbando momentaneamente o equilíbrio da voltagem nas placas. Um outro fluxo de elétrons aparece nos condutores até que o equilíbrio seja de novo alcançado. O campo entre as placas foi intensificado pelo aumento da carga devido a um aumento de *capacitância*. Se o interruptor é agora ligado, a carga, diferença de potencial e campo elétrico ficam como um armazém de energia [*Figura 2.25 (d)*]. Seja a fonte removida (*e*) e o inter-

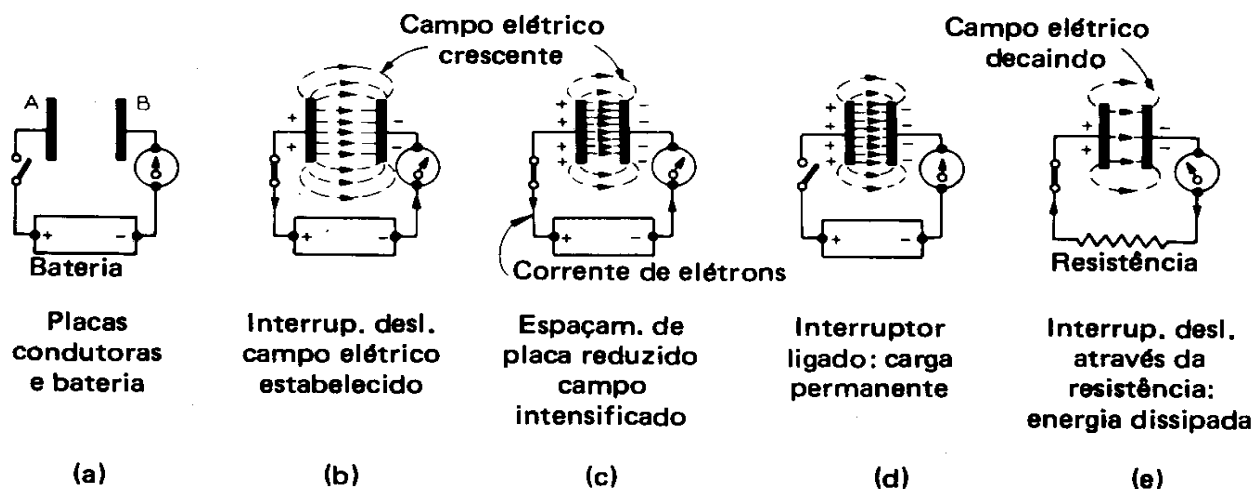


Figura 2.25 Carga e descarga de um condensador

ruptor desligado através de uma resistência. As cargas nas placas agora se dissipam porque uma corrente de elétrons de igual quantidade corre no circuito de *B* para *A*, dissipando a energia do campo como calor na resistência.

Num campo elétrico as linhas começam numa carga positiva e terminam numa negativa igual.

Leis da eletrostática

Duas cargas semelhantes pontuais estacionárias de q_1 e q_2 coulombs, espaçadas de uma distância d metros em espaço livre, desenvolvem uma força de repulsão

$$f = q_1 q_2 / 4\pi\epsilon_0 d^2 \text{ newtons}$$

onde $\epsilon_0 = 8,954 \times 10^{-12}$ F/m é a permissividade do espaço livre (ou constante de espaço elétrico). A força em q_2 pode ser considerada como devida à sua imersão no campo elétrico de q_1 ; i.é.,

$$f = E_1 q_2$$

onde

$$E_1 = q_1 / 4\pi\epsilon_0 d^2 \text{ volt/metro}$$

define a *intensidade de campo elétrico* à distância d metros de uma carga concentrada q_1 (*Figura 2.26*). Assim uma carga unitária (coulomb) é a que repele uma carga semelhante em distância unitária (1 metro) com uma força de $\frac{1}{4} \pi \epsilon_0$ newton. Similarmente, um campo de intensidade unitária (um volt por metro) produz uma força mecânica de 1 newton numa carga unitária colocada nele.

Para estabelecer um sistema carregado como o da *Figura 2.25*, deve ter sido movida

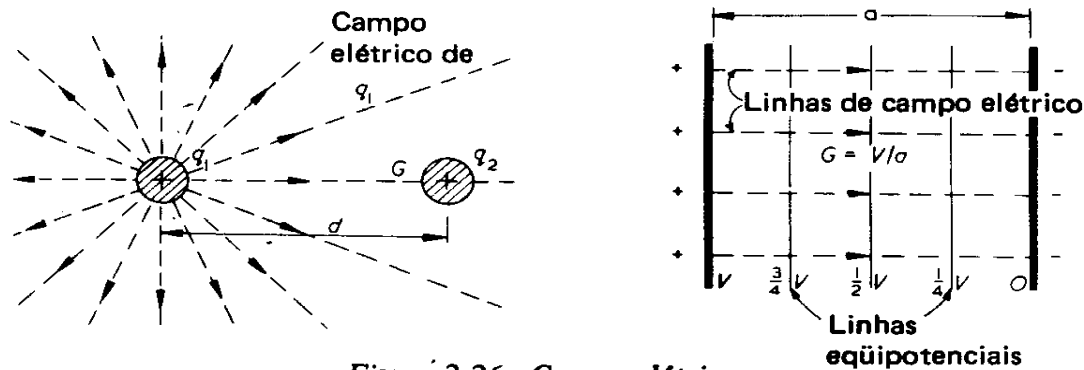


Figura 2.26 Campo elétrico

uma quantidade de eletricidade sob uma força elétrica aplicada, i.é, o trabalho deve ter sido feito, medido pela carga transferida e a d.d.p. A d.d.p. unitária (1 volt) existe entre dois pontos num campo elétrico quando o trabalho unitário (joule) é feito ao mover uma carga unitária entre os pontos. Os dois condutores devem ser de superfícies eqüipotenciais, e níveis de potencial ou *linhas eqüipotenciais*, podem ser traçadas em ângulo reto com o campo elétrico (Figura 2.26).

As linhas eqüipotenciais são como linhas de nível num mapa de uma montanha. Quanto mais perto elas estiverem, maior é o *gradiente*. A mudança de potencial numa dada direção é

$$V = -\int E \cdot dx$$

onde E é o *gradiente de voltagem* (ou gradiente de potencial) na direção x . Alternadamente, o gradiente em um ponto é a taxa à qual o potencial cai com a distância:

$$E = -dV/dx.$$

Capacitância

Cargas nas placas de um sistema tal como o da Figura 2.25 são associadas com um campo elétrico o qual aparece como um gradiente de potencial no espaço entre as placas, e como uma d.d.p. V entre elas. Da configuração e geometria do sistema de placas depende a relação entre a carga q em cada placa e a d.d.p. V entre as placas. A relação é escrita

$$q = CV$$

onde C é uma constante para a montagem dos condutores considerada, chamada *capacitância* do *condensador* formado pelos condutores.

A capacitância em *farads* de um condensador é a relação entre a carga em coulombs e a d.d.p. em volts. Assim, um condensador tem uma capacitância unitária, um *farad*, se:

- (a) a energia armazenada no campo elétrico associado for $\frac{1}{2}$ joule quando a d.d.p. for 1 volt;
- (b) a d.d.p. for 1 volt quando a carga for 1 coulomb.

A primeira definição resulta da propriedade de armazenamento de energia. Se a d.d.p. através de um condensador é elevada uniformemente de zero a V_1 volts, uma carga $q_1 = CV_1$ coulombs é estabelecida a uma d.d.p. média $V_1/2$, de modo que a entrada de energia é

$$W = q_1 \cdot \frac{1}{2} V_1 = CV_1 \cdot \frac{1}{2} V_1 \text{ volt-coulombs} = \frac{1}{2} CV_1^2 \text{ joules.}$$

Dielétricos

Até agora admitiu-se que o campo elétrico entre as placas de um condensador foi estabelecido através de espaço vazio. Se for usado um material isolante — gasoso, líquido ou sólido — o campo elétrico existirá nele. Ele agirá nas moléculas do material *dielétrico* de acordo com os princípios da eletrostática para “esticar” ou “girar” essas, e também para orientar

2-42 ELETROTECNOLOGIA

as cargas moleculares positivas e negativas em direções opostas. Esta *polarização* do dielétrico pode ser imaginada acontecendo como na *Figura 2.27*.

(a) Antes da d.d.p. ser aplicada ao condensador, as moléculas do material dielétrico são neutras e não esforçadas.

(b) Como a d.d.p. é elevada de zero, o campo elétrico tenta separar os elementos negativos e positivos. O pequeno deslocamento das cargas é uma mudança de carga, ou *corrente de deslocamento*. *N.B.*: uma corrente de deslocamento equivalente à taxa de mudança da carga nas placas, flui no caso de um dielétrico de vácuo, e a ele se adiciona a corrente de polarização presente.

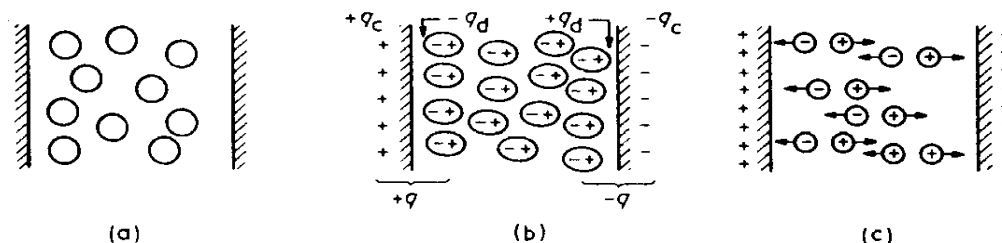


Figura 2.27 Polarização e quebra de um material dielétrico

- (a) Sem DDP: Moléculas do dielétrico não esforçadas
- (b) DDP aplicada: Moléculas do dielétrico polarizadas
- (c) DDP intensa: Moléculas perturbadas

O efeito da aplicação de uma d.d.p. a um condensador com um material dielétrico, então, é deslocar uma carga de superfície q_d de polarização, tendo uma polaridade oposta à da placa do condensador adjacente, q_c . O campo elétrico no dielétrico é devido à carga resultante $q = q_c - q_d$ [*Figura 2.27 (b)*]. A intensidade do campo (e , portanto, a d.d.p.) é menor do que seria esperado para a carga q_c nas placas: a redução relativa achada é aproximadamente constante para um determinado dielétrico. É chamada *permissividade relativa*, símbolo ϵ_r . A mesma intensidade de campo que para o vácuo existirá no dielétrico para ϵ_r vezes a mesma carga nas placas do condensador, de modo que o condensador tem ϵ_r vezes a capacitância de um condensador semelhante tendo espaço livre entre suas placas.

Os efeitos da permissividade podem assim ser tomados em conta ou pela atribuição de uma permissividade relativa ao dielétrico, ou considerando sua polarização. A última é usada quando forças dielétricas internas estão implicadas.

Dados aproximados para materiais isoladores típicos são dados na *Tabela 2.7*.

Efeitos mecânicos

A *Figura 2.28* sumariza os efeitos de força mecânica observáveis no campo elétrico. Em (a), (b) e (c) são esquematizados os padrões de campo para casos já mencionados em relação com as leis da eletrostática. As cargas de superfície desenvolvidas em materiais de alta ϵ são responsáveis pela produção das forças indicadas em (d). Finalmente (e) indica as forças nas peças de material dielétrico imersas num isolador líquido ou gasoso e sujeitas a um campo elétrico não uniforme. A direção da força depende de a peça ter uma permissividade mais alta ou mais baixa que o meio dielétrico no qual ela se encontra. Assim, peças de alta permissividade são impelidas para regiões de intensidade de campo elétrico mais alta.

Cálculo de capacitância

A capacitância de condensadores de geometria simples pode ser achada atribuindo respectivamente as cargas de $+1C$ e $-1C$ para as placas ou outros eletrodos, entre os quais o fluxo total elétrico é $1C$. Do padrão de campo a densidade de fluxo elétrico D em qualquer ponto é determinada. Então, a intensidade do campo elétrico no ponto é $E = D/\epsilon$ onde $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ é a permissividade absoluta do meio isolador no qual o fluxo elétrico é estabelecido. A inte-

ELETROTECNOLOGIA

Tabela 2.7. MATERIAIS ISOLANTES

Valores aproximados						
ϵ_r	permissividade relativa					
E	intensidade elétrica, MV/m					
$\tan \delta$	tangente de perda					
θ	temperatura máxima de trabalho, °C					
k	condutividade térmica, mW/(m K)					
G	densidade, kg/m ³					
Material	ϵ_r	E	$\tan \delta$	θ	k	G
Ar at.p.n.	1	3	—	—	25	1.3
Álcool	26	—	—	—	180	790
Asbesto	2	2	—	400	80	3 000
Papel de asbesto	2	2	—	250	250	1 200
Baquelite, moldes	5	15	0.03	100	270	1 300
de papel	4	6	0.03	130	—	1 600
Betume, vulcanizado	2.7	1.6	—	50	150	1 200
puro	4.5	5	—	100	200	1 250
Película de celulose	5.8	28	—	—	—	800
Tecido de algodão,	—	0.5	—	95	80	—
seco impregnado	—	2	—	95	250	—
Ebonite	2.8	50	0.005	80	150	1 400
Fita de tecido, impregnada	5	17	0.1	95	240	—
Vidro, branco	6.6	6	—	—	1 100	4 500
colorido	4.8	6	0.02	—	600	2 200
temperado	5.3	9	0.003	—	—	—
Guta-percha	4.5	—	0.02	—	200	980
Mármore	7	2	0.03	—	2 600	2 700
Mica	6	40	0.02	750	600	2 800
Micanite	—	15	—	125	150	2 200
Óleo, transformador	2.3	—	—	85	160	870
castor	4.7	8	—	—	—	970
Papel, seco	2.2	5	0.007	90	130	820
impregnado	3.2	15	0.06	90	140	1 100
Porcelana	5.7	15	0.008	1 000	1 000	2 400
Cartão prensado	6.2	7	—	95	170	1 100
Quartzo, fundido	3.5	13	0.002	1 000	1 200	2 200
cristalino	4.4	—	—	—	—	2 700
Borracha, pura	2.6	18	0.005	50	100	930
vulcanizada	4	10	0.01	70	250	1 500
moldes	4	10	—	70	—	—
Resina	3	—	—	—	—	1 100
Goma laca	3	11	—	75	250	1 000
papel de goma laca	5.5	11	0.05	80	—	1 350
Sílica, fundida	3.6	14	—	—	—	—
Seda	—	—	—	95	60	1 200
Ardósia	—	0.5	—	—	2 000	2 800
Esteativa	—	0.6	—	1 500	2 000	2 600
Enxofre	4	—	0.000 3	100	220	2 000
Água	70	—	—	—	570	1 000
Cera, parafina	2.2	12	0.000 3	35	270	880

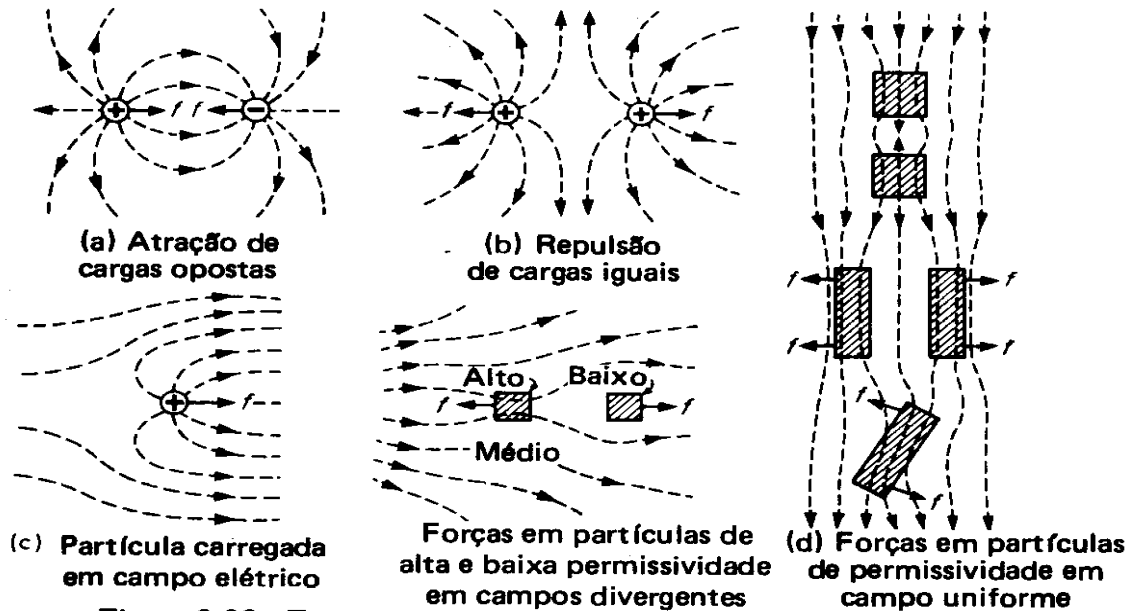


Figura 2.28 Forças em cargas e dielétricos em campo elétrico

gração de E sobre qualquer percurso de um eletrodo para outro dá a d.d.p. V , donde a capacitância é $C = 1/V$.

Placas paralelas. Figura 2.29 (a). A densidade de fluxo elétrico é uniforme exceto perto das arestas. Usando um *anel de resguardo* mantido no potencial da placa que ele cerca, a capacitância da parte interna é calculável na suposição razoável de condições de campo uniforme. Com uma carga de 1 C em cada placa, e placas de área S espaçadas de a , a densidade de fluxo elétrico é $D = 1/S$, a intensidade do campo elétrico é $E = D/\epsilon = 1/S\epsilon$, a diferença de potencial é $V = Ea = a/S\epsilon$, e a capacitância é portanto

$$C = q/V = \epsilon(S/a) \text{ farads}$$

Um caso de interesse é o da disposição das placas paralelas, Figura 2.29 (b), com dois materiais dielétricos, de espessura a_1 e a_2 , e permissividade absoluta ϵ_1 e ϵ_2 respectivamente. O gradiente de voltagem é inversamente proporcional à permissividade de modo que $E_1\epsilon_1 = E_2\epsilon_2$. O padrão do campo torna evidente que a diferença na polarização produz

Anel de resguardo

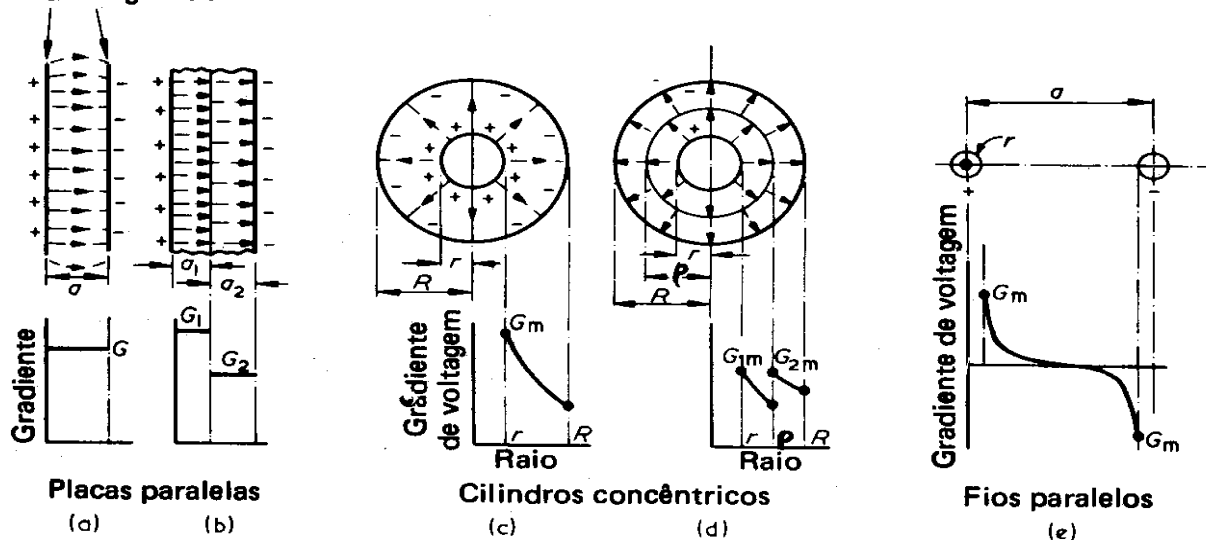


Figura 2.29 Capacitância e gradiente de voltagem

uma carga de interfase, mas em termos da carga qc nas próprias placas, a densidade do fluxo elétrico é constante em todas elas. A voltagem total entre as placas é $V = V_1 + V_2 = E_1 a_1 + E_2 a_2$, da qual pode ser obtida a capacitância total.

Cilindros concêntricos. Figura 2.29 (c). Com uma carga de 1 C por metro de comprimento, a densidade do fluxo elétrico no raio x é $1/2\pi x$, donde $E_x = 1/2\pi x\epsilon$. Integrando para a d.d.p. dá

$$V = (1/2\pi\epsilon)\ln(R/r)$$

A capacitância é, conseqüentemente,

$$C = 2\pi\epsilon/\ln(R/r) \text{ farad por metro}$$

A intensidade de campo elétrico (gradiente de voltagem) E é inversamente proporcional ao raio, sobre o qual ela é distribuída hiperbolicamente. O gradiente máximo ocorre na superfície do condutor interno e é representado por

$$E_m = V/r\ln(R/r)$$

Em qualquer outro raio x , $E_x = E_m(r/x)$. Para uma determinada d.d.p. V e gradiente E_m há um valor de r que é igual ao raio mínimo R ; este é

$$r = V/E_m \quad \text{e} \quad R = 2.72r$$

A **Figura 2.29 (d)** mostra um condensador cilíndrico com dois dielétricos cilíndricos de permissividade ϵ_1 entre os raios r e ρ , e ϵ_2 entre os raios ρ e R . Os gradientes máximos são designados por $E_{m1}\epsilon_1 r = E_{m2}\epsilon_2 \rho$. É possível por vezes reduzir a desigualdade dos gradientes máximos fazendo $\epsilon_1 > \epsilon_2$.

Cilindros paralelos. Figura 2.29 (e). O cálculo conduz ao valor

$$C = \pi\epsilon/\ln(a/r) \text{ farad por metro}$$

para a capacitância entre os condutores, desde que $a \gg r$. Pode ser considerado como composto de dois condutores ligados em série, cada um

$$C_0 = 2\pi\epsilon/\ln(a/r) \text{ farad por metro}$$

sendo C_0 a capacitância *linha para neutro*. Uma linha trifásica tem uma capacitância linha para neutro idêntica a C_0 , sendo a interpretação do espaçamento a , para linhas transpostas assimétricas, a mesma que para sua indutância, **Figura 2.20**.

O gradiente de voltagem de uma linha de dois fios está indicado na **Figura 2.29 (e)**. Se $a \gg r$, o gradiente na proximidade imediata de um fio pode ser tomado como devido à carga aí existente, tendo o outro fio pouco efeito; conseqüentemente,

$$E_m = V/r\ln(a/r)$$

é o gradiente de voltagem na superfície de um condutor.

Ligação de capacitores

Se uma série de capacitores de capacitância $C_1, C_2, C_3 \dots$ forem ligados em *paralelo* e elevados em conjunto cada um à d.d.p. V , a carga total é a soma das cargas individuais $VC_1, VC_2, VC_3 \dots$, donde a capacitância combinada total é

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

Com uma ligação *em série*, ocorre a mesma corrente de deslocamento em cada capacitor e a d.d.p. V , através do conjunto da série é a soma das d.d.p. individuais:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots = q[(1/C_1) + (1/C_2) + (1/C_3) + \dots] = q/C$$

de modo que a capacitância combinada é obtida de

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

Voltagem aplicada a um capacitor

A base para determinar as condições num circuito contendo um capacitor ao qual é aplicada uma voltagem é que a d.d.p. V , através do capacitor, é definida pela relação entre sua capacitância C e a carga q deslocada nas suas placas: $q = Cv$.

Seja uma voltagem direta V subitamente aplicada a um circuito destituído de todos os parâmetros característicos exceto o da capacitância C . No instante de sua aplicação, o

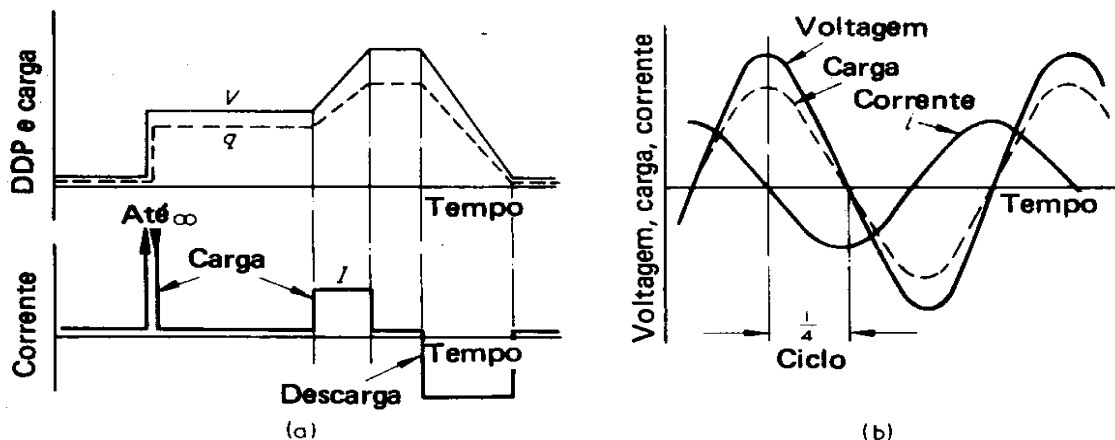


Figura 2.30 Relação entre voltagem, carga e corrente do condensador

condensador deve aceitar uma carga $q = CV$, resultando num fluxo de corrente infinitamente grande para um tempo extremamente curto. A energia armazenada é $W = \frac{1}{2} Vq = \frac{1}{2} CV^2$ joules. Se a voltagem for elevada ou diminuída uniformemente, a carga deve mudar correspondentemente, por uma corrente de carga ou descarga que flui durante a mudança [Figura 2.30 (a)].

Se a voltagem aplicada é sinusoidal, como em (b), de tal modo que $v = v_m \cos 2\pi ft = v_m \cos \omega t$, o mesmo argumento leva à exigência de que a carga seja $q = q_m \cos \omega t$, onde $q_m = CV_m$. Então a corrente é $i = dq/dt$, i.é,

$$i = -\omega Cv_m \sin \omega t$$

com um máximo $i_m = \omega Cv_m$ e um valor r.m.s. $I = \omega CV = V/X_c$, onde $X_c = 1/\omega C$ é a *reatância capacitiva*. A Figura 2.31 dá o diagrama de fase correspondente.

Quebra do dielétrico

Um material dielétrico deve possuir (a) uma alta resistividade isolante para evitar condução de escapamento a qual dissipa a energia do condensador por calor; (b) uma permissividade apropriada para o objetivo — geralmente alta para condensadores e baixa para isolamento; (c) uma alta resistência elétrica para suportar grandes gradientes de voltagem, de modo que só seja exigido material fino. Raramente é possível assegurar propriedades ótimas num mesmo material.

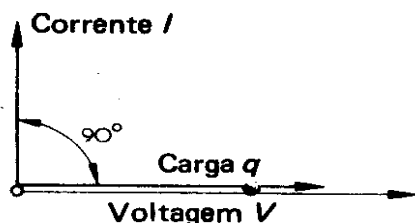


Figura 2.31 Diagrama de fase de capacitor puro

Um dielétrico prático quebrará (i.é, deixará de isolar) quando o esforço do campo elétrico ou gradiente de voltagem exceder o valor que o material pode suportar. A idéia transmitida pela Figura 2.27 (c) pode ser considerada como fundamental para a quebra do dielétrico: é chamado *quebra por esforço*. Contudo, na prática, várias características secundárias, por vezes de importância fundamental, estão presentes:

- (a) ionização por choque
- (b) condutividade de filamentos e efeito piroelétrico
- (c) efeitos de força mecânica
- (d) não-homogeneidade do dielétrico devida à laminação, imperfeições, impurezas, etc.

GASES

Com dielétricos gasosos (p. ex. ar, hidrogênio), os íons estão sempre presentes por causa da luz, calor, faiscamento, etc. Estes são postos em movimento [efeito mecânico, *Figura 2.28 (c)*] fazendo uma ionização adicional, que pode ser cumulativa, causando descarga de incandescência, faiscamento ou arco, a não ser que a intensidade do campo esteja abaixo de um valor crítico. Uma intensidade de campo na ordem dos 3 MV/m é um valor-limite para gases em t.p.n. A resistência dielétrica aumenta com a pressão de gás.

A polarização em gases é pequena devido às distâncias comparativamente grandes entre as moléculas. Conseqüentemente, a permissividade relativa não é muito diferente da unitária.

LÍQUIDOS

Quando muito puros, os líquidos podem se comportar como gases. Contudo, usualmente, as impurezas estão presentes. Uma pequena proporção de moléculas forma íons positivos ou negativos, e partículas estranhas em suspensão (fibras, pó, gotículas de água) têm propensão para se alinharem elas mesmas em filamentos semicondutores: o aquecimento produz vapor, e pode ser iniciada a quebra gasosa. A água, devido à sua excepcionalmente alta permissividade, é especialmente nociva em líquidos, tais como o óleo, por causa do efeito indicado na *Figura 2.28 (e)*.

SÓLIDOS

Os dielétricos sólidos raramente são homogêneos, e são muitas vezes higroscópicos. Cargas locais podem aparecer, produzindo efeitos de absorção, percursos condutores por filamentos podem estar presentes e pode ocorrer aquecimento local (com deterioração conseqüente). A quebra depende de muitos fatores, especialmente térmicos, e é uma função do tempo da aplicação da d.d.p.

Condução e absorção

Os dielétricos sólidos, em particular, e até certo ponto os líquidos também, mostram efeitos de condução e absorção. A condução aparenta ser principalmente de natureza iônica. A absorção é um armazenamento aparente de carga *dentro* do dielétrico. Quando um capacitor é carregado, é deslocada uma quantidade inicial nas suas placas devido à capacitância *geométrica*. Se a d.d.p. é mantida, a carga cresce gradualmente devido à capacitância *absortiva*, provavelmente resultado da lenta orientação das moléculas dipolares permanentes. A corrente finalmente se estabelece em um valor pequeno constante devido à condução.

A carga absortiva escapa gradualmente quando é descarregado um capacitor, fenômeno observável particularmente em cabos depois de uma carga de c.c. seguida de descarga momentânea.

Fator de potência

Quando um capacitor é sujeito a uma d.d.p. alternada, ocorrem perdas adicionais às da condução devidas à absorção, sendo o efeito por vezes chamado *histerese dielétrica*. Devido a essas perdas, a corrente num condensador não estará em avanço de um quadrante de fase com a voltagem. O ângulo de fase é menor que 90. do ângulo δ , o *ângulo de perda*: *Figura 2.32*. Com um capacitor razoavelmente bom, a corrente é dada por $I = \omega CV$, e a perda é

$$VI \cos \phi = VI \sin \delta = \omega CV^2 \sin \delta$$

2-48 ELETROTECNOLOGIA

Quando δ é pequeno, $\sin \delta \cong \tan \delta \cong \delta$, e a perda se aproxima de

$$p = \omega CV^2\delta$$

com δ em radianos. Visto que ω depende da frequência, e a voltagem determina o esforço dielétrico ou gradiente de voltagem, a perda num material dielétrico de um capacitor, cabo,

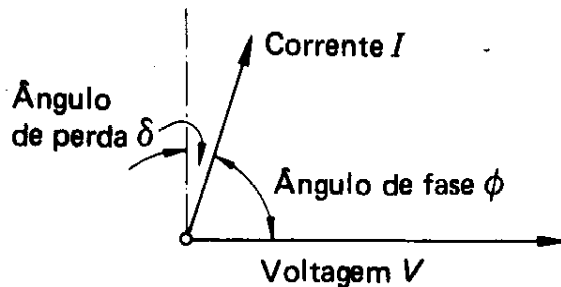


Figura 2.32 Diagrama de fase de capacitor imperfeito

bucha ou outro equipamento isolante de alta voltagem é uma função da frequência, gradiente, permissividade e fator de potência.

Adaptação

Os campos elétricos estabelecidos quando são aplicadas altas voltagens a isoladores elétricos são acompanhados por gradientes de voltagem em várias partes. Em muitos casos os gradientes são tudo menos uniformes: há frequentemente alguma região onde o campo é intenso, gradiente de voltagem elevado, e alto esforço dielétrico. Tais regiões podem impor uma influência controladora e limitadora na execução do isolamento e na voltagem de trabalho. O processo de assegurar condições de operação dielétrica melhoradas é chamado *adaptação*. Os principais métodos disponíveis são:

- (a) evitar cantos agudos nos condensadores, perto dos quais o gradiente é sempre alto;
- (b) a aplicação de materiais de alta permissividade para as partes de estrutura dielétrica onde o esforço tende a ser alto aplicando o princípio de que o esforço é inversamente proporcional à permissividade; evidentemente, é necessário correlacionar o método com o esforço dielétrico do material a ser empregado;
- (c) o uso de condutores laminados mantidos a um potencial intermediário apropriado de modo a provocar menos esforço naquelas partes que de outro modo estariam sujeitas a gradientes de voltagem mais intensos.

Os exemplos de (a) são comumente observados em maquinaria de alta voltagem, trabalhando ao ar, onde são empregados condutores grandes arredondados, e todas as arestas têm um raio grande. A aplicação de (b) é restrita pelo fato da escolha dos materiais em qualquer caso ser estritamente limitada pelas propriedades necessárias de mecânica, química e térmica. O método (c) é empregado em buchas de capacitores, nas quais as lâminas têm potenciais ajustados pela correlação de suas dimensões.

M.G. SAY

Ph.D., M.Sc., C.Eng., A.C.G.I., D.I.C., F.I.E.E., F.R.S.E.

Colaboradores **e** especializados

MANUAL DO ENGENHEIRO ELETRICISTA

Unidades e grandezas físicas • Eletrotecnologia •
Análise de redes • Materiais

Alexandre Luiz Bertozzi
ENG. ELETRICA

