

## INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO. LEI DE COULOMB. CAPACITÂNCIA

Em um dos capítulos anteriores iniciamos o estudo da Eletrostática e, naquela oportunidade, definimos CAMPO ELÉTRICO ou CAMPO ELETROSTÁTICO como a região em torno de um corpo eletrizado na qual podem ser observadas as ações que o corpo carregado é capaz de exercer sobre outros corpos com carga ou não. Voltando ao estudo da Eletrostática é oportuno esclarecer que certos autores fazem distinção entre CAMPO ELÉTRICO e CAMPO ELETROSTÁTICO, ou melhor, consideram o campo eletrostático como uma modalidade do campo elétrico. Assim, dizem existir um campo elétrico numa região, quando uma carga elétrica colocada na mesma experimenta uma força mecânica; o campo eletrostático é um campo elétrico associado com cargas elétricas em repouso, com relação ao observador.

### Teorema de Gauss

O teorema de Gauss afirma que o fluxo elétrico total que atravessa qualquer superfície fechada é numericamente igual à carga no interior dessa superfície.

Embora a afirmação em apreço não possa ser provada, nada há que contrarie

os resultados obtidos com base na mesma, justificando assim a sua designação como teorema.

### Intensidade de Campo Elétricos ( $E$ )

Um dos efeitos bem característicos de um campo elétrico é a força mecânica que atua sobre qualquer carga elétrica colocada no mesmo. O valor dessa força varia normalmente de ponto para ponto do campo, diminuindo à medida que os pontos considerados ficam mais afastados da carga que originou o campo.

Designa-se por INTENSIDADE DE UM CAMPO ELÉTRICO EM UM CERTO PONTO a força que age sobre a unidade de carga elétrica colocada nesse ponto:

$$E = \frac{F}{Q}$$

$E$  = intensidade do campo elétrico  
EM NEWTONS/COULOMB  
(N/C)

$F$  = força, em NEWTONS (N)

$Q$  = carga elétrica, em  
COULOMBS (C)

A intensidade de campo elétrico é uma grandeza vetorial, apenas numericamente igual à força exercida sobre a carga unitária colocada no campo; sua direção e seu sentido são os mesmos da força.

### Permissividade ( $\epsilon$ )

Permissividade é a relação entre a densidade de fluxo elétrico ( $D$ ) e a intensidade de campo elétrico ( $E$ )

$$\epsilon = \frac{D}{E}$$

Esta grandeza exprime a influência que o meio exerce na criação de um campo elétrico.

Se fizermos um mesmo capacitor adquirir várias cargas diferentes, tendo o cuidado de anotar os valores da densidade de fluxo elétrico e da intensidade de campo referentes a cada carga, observaremos que o quociente  $D/E$  não se altera. Entretanto, se trocarmos o dielétrico do capacitor e efetuarmos a mesma série de cargas, observaremos que o resultado da divisão em apreço continuará sendo constante, porém diferente do valor determinado com o outro dielétrico.

Como as placas não sofreram alteração e as cargas nas duas experiências foram as mesmas, é evidente que as densidades de fluxo nos dois casos foram também iguais, tendo havido mudança, portanto, nos valores das intensidades do campo entre as placas do capacitor.

A permissividade de um material, ou sua PERMISSIVIDADE ABSOLUTA, é dada em FARADS/METRO (F/m).

Como permissividade padrão foi escolhida a do vácuo, cujo valor é

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$\epsilon_0$  = símbolo especial escolhido para a permissividade do vácuo

A relação entre a permissividade absoluta de um material qualquer e a permissividade do vácuo é chamada PERMISSIVIDADE RELATIVA DO MATERIAL

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

A permissividade relativa de um material, também conhecida como CONSTANTE DIELÉTRICA do material, depende da sua composição, da sua pureza, da temperatura, etc., e é apenas um número abstrato, encontrado em tabelas organizadas experimentalmente.

### Lei de Coulomb

Para que possamos entender a expressão que permite o cálculo da força entre cargas que se atraem e se repelem, vejamos como se pode determinar a intensidade do campo elétrico produzido por uma carga "Q", sem a utilização de uma carga de prova, como foi analisado no início deste capítulo.

Suponhamos que desejamos determinar a intensidade do campo elétrico produzido por uma carga "Q", em um ponto situado a uma distância "r" da mesma. Admitindo a existência de uma superfície esférica fechada de raio "r", no centro da qual estaria colocada a carga em questão, podemos escrever que a densidade de fluxo na superfície dessa esfera é

$$D = \frac{Q}{4 \pi r^2}$$

Vimos nos parágrafos anteriores que

$$E = \frac{D}{\epsilon}$$

e portanto,

$$E = \frac{Q/4 \pi r^2}{\epsilon}$$

$$E = \frac{Q}{4 \pi r^2 \epsilon}$$

Uma equação para determinar a força de atração ou de repulsão entre duas cargas elétricas ( $Q_1$  e  $Q_2$ ) pode ser obtida a partir do seguinte raciocínio:

No ponto onde está a carga  $Q_2$ , a intensidade do campo produzido por  $Q_1$  é

$$E = \frac{Q_1}{4\pi r^2 \epsilon}$$

e a força que atua sobre  $Q_2$  é

$$F = E Q_2 = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi r^2 \epsilon}$$

Evidentemente, " $Q_2$ " age sobre " $Q_1$ " com uma força igual e oposta, e a expressão

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi r^2 \epsilon}$$

" $Q_1$ " e " $Q_2$ " = em COULOMBS (C)

$r$  = em METROS (m)

$F$  = em NEWTONS (N)

$\epsilon$  = em FARADS/METRO (F/m)

corresponde à Lei de Coulomb já enunciada em capítulo anterior. Resumindo, concluímos que a força de atração ou de repulsão entre duas cargas elétricas é

a) diretamente proporcional ao produto de suas cargas;

b) inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas;

c) inversamente proporcional à permissividade do meio que separa as cargas.

Coulomb chegou a esta conclusão experimentalmente, utilizando um dispositivo chamado balança de torção, não fazendo referência, porém, à influência exercida pelo meio.

### Gradiente de Potencial Elétrico

Quando ligamos duas placas condutoras planas e paralelas separadas por um isolante a uma fonte de C.C. (Fig. XVIII-1), elas adquirem cargas

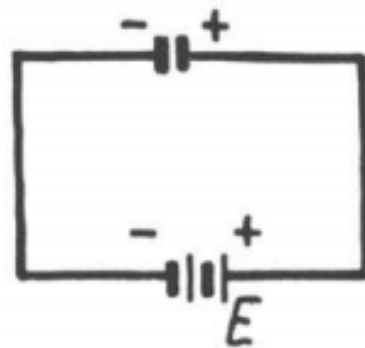


FIG. XVIII-1

e estabelece-se entre as mesmas uma d. d. p. igual à existente entre os terminais da fonte. O campo elétrico entre as placas, não muito perto das extremidades das mesmas, é uniforme. Isto quer dizer que a intensidade do campo é sempre a mesma, seja qual for a parte do campo considerada. Realmente, qualquer carga de prova colocada entre as placas fica



sujeita a uma força de valor constante, resultante da soma das forças de atração e repulsão, exercidas pelas placas. À medida que a carga se aproxima de uma das placas, a força de atração torna-se maior, mas a de repulsão diminui na mesma razão.

A intensidade do campo elétrico neste caso pode ser calculada com qualquer das expressões estudadas e também com uma nova equação

$$E = \frac{E}{d}$$

$E = d$ . d. p. entre as placas, em VOLTS (V)

$d$  = distância entre as placas, em METROS (m)

$E$  = intensidade do campo elétrico entre as placas, em VOLTS/METRO (V/m) (o mesmo que N/C).

A expressão acima é justificada pelo seguinte raciocínio:

Havendo uma d. d. p. ( $E$ ) entre as placas, o trabalho para transportar uma carga positiva ( $Q$ ), por exemplo, da placa negativa para a positiva, é igual a

$$W = E Q$$

De acordo com o que já foi estudado, a força que atua sobre a carga é

$$F = E Q$$

Ora, designado a distância entre as placas pela letra  $d$ , o trabalho efetuado no transporte da carga é igual também a

$$W = E Q d$$

Do exposto, podemos concluir que

$$E Q = E Q d$$

donde

$$E = \frac{E Q}{Q d}$$

e

$$E = \frac{E}{d}$$

Se aplicássemos uma das pontas de prova de um voltímetro eletrostático a uma das placas e fôssemos movendo a outra ponta de prova, segundo uma das linhas de força, no espaço entre as placas, observaríamos que o voltímetro acusaria valores diversos, indicando o máximo quando cada ponta de prova estivesse em contato com uma das placas.

Tudo ocorreria como se a linha de força fosse um divisor de tensão, com a tensão máxima entre seus extremos (as placas).

Por este motivo falamos de GRADIENTE DE POTENCIAL, que neste caso se confunde numericamente com a intensidade do campo elétrico.

Esta característica do campo elétrico é de particular interesse em Eletrônica, como nos campos elétricos entre os elementos de uma válvula.

### Capacitor de Placas Planas e Paralelas

A permissividade do meio entre as placas de um capacitor é a relação

$$\epsilon = \frac{D}{E}$$

Sabemos que

$$D = \frac{Q}{S} \quad e \quad E = \frac{E}{d}$$

donde

$$\varepsilon = \frac{Q/S}{E/d} = \frac{Q}{S} \times \frac{d}{E} = \frac{Q}{E} \times \frac{d}{S}$$

Mas

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

logo

$$\varepsilon = \frac{Cd}{S}$$

Da equação acima concluímos que

$$C = \frac{\varepsilon S}{d}$$

C = capacitância de um capacitor de placas planas e paralelas, em FARADS (F)

$\varepsilon$  = permissividade do dielétrico do capacitor, em FARADS/METRO (F/m)

S = área útil de uma das placas (parte relacionada com o campo entre as placas), em METROS QUADRADOS (m<sup>2</sup>)

d = distância entre as placas do capacitor, em METROS (m). Este fator confunde-se com a espessura do dielétrico.

Para melhor aproveitamento do espaço, as placas do capacitor podem ser construídas como mostra a Fig. XVIII-2.

Duas plaquinhas formam um pequeno capacitor e a capacitância do conjunto é a soma das capacitâncias parciais. É fácil concluir que o número de pequenos capacitores é sempre igual ao número de plaquinhas menos 1.



ARRANJO PARA MELHOR APROVEITAMENTO DO ESPAÇO DISPONÍVEL

FIG. XVIII-2

Quando todas as capacitâncias parciais são iguais, a capacitância total é dada pela expressão

$$C = \frac{\varepsilon (n-1) S}{d}$$

n = número de plaquinhas

EXEMPLOS:

1 – Um corpo com uma carga de  $-0,05\text{ C}$  foi colocado no campo elétrico existente entre duas placas condutoras paralelas. Sabendo que ele foi submetido a uma força de  $0,4\text{ N}$ , quando estava a  $2\text{ centímetros}$  da placa positiva, dizer o valor da força que suportou quando estava a  $5\text{ centímetros}$  da mesma placa. Determinar, também, a intensidade do campo nos dois pontos considerados.

SOLUÇÃO:

Num campo entre placas condutoras planas e paralelas a intensidade é constante, logo a força que age sobre o mesmo corpo colocado em diversos pontos também é constante. Assim,

$$F = 0,4 \text{ N}$$

A intensidade do campo é

$$E = \frac{F}{Q}$$

$$E = \frac{0,4}{0,05} = 8 \text{ N/C}$$

2 – A distância entre duas placas condutoras planas e paralelas é de 0,003 m. Determinar a diferença de potencial entre elas, sabendo que a intensidade de campo é de 5.000 V/m.

SOLUÇÃO:

$$E = E d = 5.000 \times 0,003 = 15 \text{ V}$$

3 – Duas cargas positivas iguais estão no ar, separadas por uma distância de 5 centímetros, e a força de repulsão entre elas é de 0,16 N. Qual é o valor de cada carga?

SOLUÇÃO:

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4 \pi r^2 \epsilon} \quad \left| \quad Q_1 = Q_2 = Q \right.$$

$$F = \frac{Q^2}{4 \pi r^2 \epsilon}$$

$$Q = \sqrt{4 \pi r^2 \epsilon F}$$

$$Q = \sqrt{1256 \cdot 10^{-2} \cdot 25 \cdot 10^{-4} \cdot 885 \cdot 10^{-14}}$$

$$Q = 2,1 \times 10^{-6} \text{ C}$$

4 – Calcular a capacitância de um capacitor formado por nove placas paralelas separadas por folhas de mica de 0,2 mm de espessura. A área de um lado de cada placa é 12 cm<sup>2</sup> e a constante dielétrica da mica é igual a 5.

SOLUÇÃO:

$$C = \frac{\epsilon (n-1) S}{d} \quad \left| \quad n-1 = 9-1 = 8 \right.$$

$$C = \frac{8,85 \times 10^{-12} \times 5 \times 8 \times 12 \times 10^{-4}}{2 \times 10^{-4}}$$

$$C = 2124 \times 10^{-12} \text{ F}$$

## PROBLEMAS

### INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO. LEI DE COULOMB. CAPACITÂNCIA

1 – Determinar a carga de um corpo sabendo que ele sofreu a ação de uma força de 10 N, ao ser colocado em um ponto de um campo elétrico, onde a intensidade era de 2N/C.

$$R.: 5 \text{ C}$$

2 – Um corpo com uma carga de -5 C foi colocado em um ponto de um campo elétrico cuja intensidade era de 2 N/C. Determinar a força que atuou sobre o corpo.

$$R.: 10 \text{ N}$$

3 – Duas placas condutoras paralelas, separadas por uma distância de um centímetro, estão ligadas a uma fonte de 500 V. Qual a força que será exercida sobre um elétron livre entre elas?

$$R.: 8.015 \times 10^{-18} \text{ N}$$

4 – Calcular a densidade de fluxo elétrico e a intensidade de campo a uma distância de um centímetro de uma carga pontual positiva e de valor igual a  $10^{-9}$  C. A carga está imersa em um líquido que tem uma constante dielétrica igual a 40.

R.:  $7,96 \times 10^{-7}$  C/m<sup>2</sup>; 2,25 V/m

5 – Determinar a força de atração entre o elétron e o núcleo do átomo de hidrogênio, que estão separados por uma distância de  $5,28 \times 10^{-9}$  centímetros. O átomo de hidrogênio só

possui um elétron e o núcleo tem uma carga igual, porém de sinal oposto à do elétron. A carga do elétron é de  $1,603 \times 10^{-19}$  C.

R.:  $8,29 \times 10^{-8}$  N

6 – Qual o valor de um capacitor feito de duas placas metálicas separadas por uma distância de 0,1 mm, cujo dielétrico é o ar? Cada placa tem as seguintes dimensões: 12 cm de comprimento e 10 cm de largura.

R.: 1.062 pF