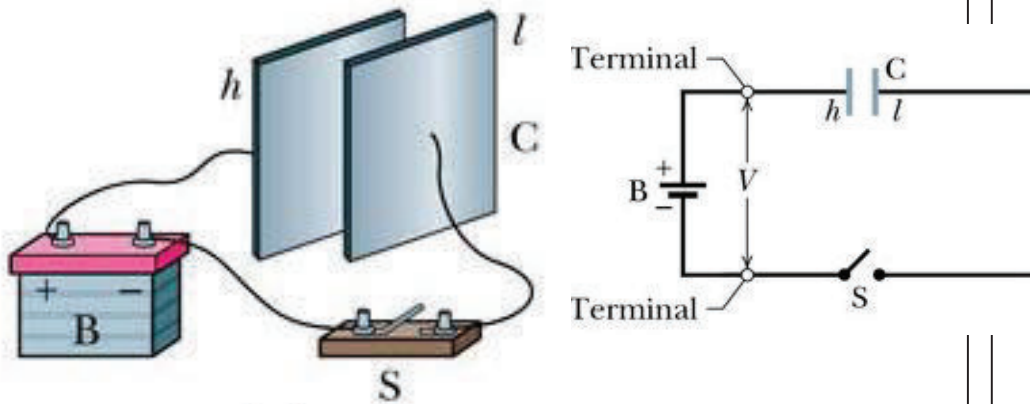


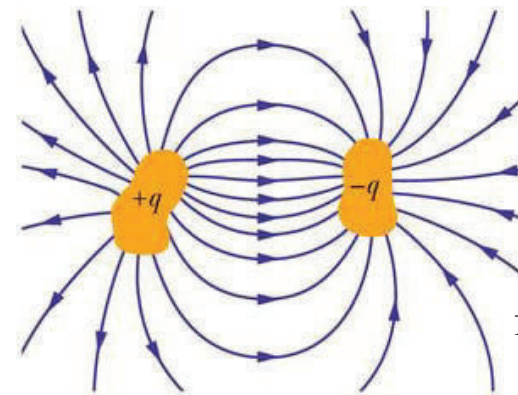
Após a introdução dos conceitos básicos de **Força Eletrostática, Campo Elétrico e Potencial Elétrico**, damos início ao estudo das aplicações elétricas e eletrônicas, começando com as mais simples. Qualquer circuito elétrico ou eletrônico, necessita de pelo menos um dos seguintes componentes: Resistor (R); Capacitor (C); Indutor (L). Num circuito contendo esses três componentes, dois deles conservam energia, enquanto o terceiro dissipa energia. Nas aulas seguintes estudaremos os circuitos RC, RL, LC e RLC, nos quais os processos de acumulação e transferência de energia serão discutidos detalhadamente.

Considere duas placas paralelas feitas de um material condutor e separadas por um espaçamento vazio, estão ligadas a uma bateria através de um resistor e uma chave. Se as placas estão inicialmente descarregadas, e a chave está aberta, as placas permanecem descarregadas. No momento em que a chave é fechada, elétrons começam a sair da placa h e se acumulam na placa l, depois de passarem pela resistência e pela bateria. A corrente é inicialmente elevada, limitada apenas pela resistência do circuito. Com o tempo a corrente diminui, e após um certo tempo temos uma carga positiva na placa h.



Os elétrons se acumulam na placa l com a mesma rapidez que deixam a placa h. Esta transferência de elétrons continua até que a diferença de potencial entre as placas seja exatamente igual à tensão da bateria.

O resultado final é uma carga positiva na placa h e uma carga negativa na placa l, muito semelhante à distribuição de carga mostrada na figura abaixo.



Independentemente do formato destes condutores, os chamamos de **placas**.

Este elemento, constituído por apenas dois condutores isolados com formato qualquer, separados por um material isolante (no caso o ar), é chamado **CAPACITOR**.

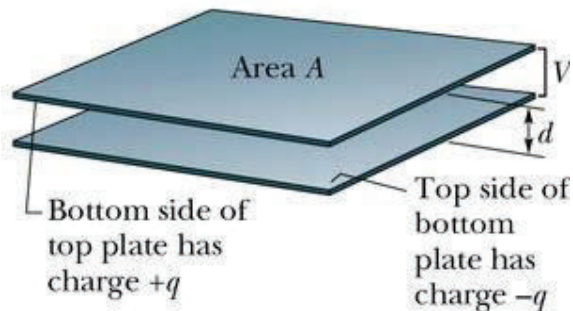
CAPACITOR E CAPACITÂNCIA

Quanto à sua aparência externa, podem variar de acordo com a voltagem máxima, com a capacitância e com a disposição de seus terminais. A figura ao lado mostra alguns dos vários tamanhos e formas dos capacitores. Podem ser do tipo axial, com um terminal



em cada extremidade, ou, do tipo radial, com os dois terminais na mesma extremidade.

O arranjo menos geral, porém mais convencional é chamado de capacitor de placas paralelas, formado por duas placas paralelas condutoras de área A separadas por uma distância d .



O símbolo usado para representar o capacitor é $\left(\parallel \right)$ para capacitores de qualquer geometria.

Inicialmente supomos que não haja nenhum meio material presente entre as placas. Quando um capacitor está carregado, suas placas possuem cargas iguais e opostas, $+q$ e $-q$, mas nos referimos à carga do capacitor como sendo q .

Como as placas são condutoras elas são superfícies equipotenciais, e há uma diferença ΔV entre as placas. A carga e a diferença de potencial para um capacitor são proporcionais, e a relação entre elas pode ser escrita como

$$q = C.V.$$

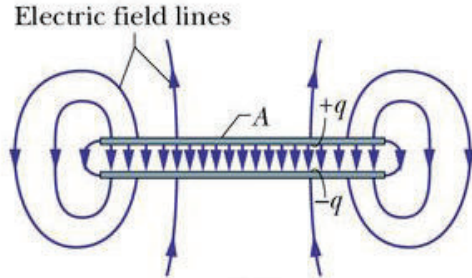
A constante de proporcionalidade C é chamada de capacitância do capacitor, e representa uma medida da quantidade de carga que o capacitor pode armazenar em suas placas, ou seja, é a sua capacidade de armazenamento.

Um capacitor possui uma capacitância de 1 farad se uma carga de 1 coulomb for depositada em suas placas por uma diferença de potencial de um volt entre elas.

O farad recebeu este nome em homenagem a Michael Faraday, um físico-químico do século XIX. Na prática, entretanto, se mostra uma unidade de medida muito grande para a maioria das aplicações, por isso é mais comum usarmos o microfarad (10^{-6} F) ou o picofarad (10^{-12} F).

CÁLCULO DA CAPACITÂNCIA

O campo elétrico devido às placas é uniforme na região central entre as placas, e não-uniforme nas bordas das placas. Nas bordas as linhas de campo apresentam uma deformação para fora das placas, conhecida como *efeito de borda*. De fato este efeito é ignorado na maioria das aplicações práticas.



Cálculo da capacitância

Uma vez conhecida a geometria do capacitor podemos calcular a sua capacitância. Receita:

- considera-se uma carga q sobre as placas;
- calcula-se E entre as placas através da Lei de Gauss.
- calcula-se ΔV entre as placas através da equação

$$V_f - V_i = - \int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{s}.$$

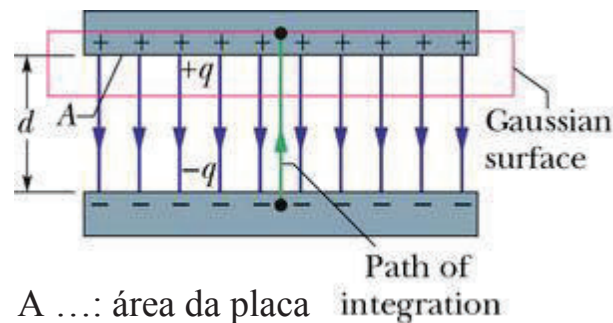
- calcula-se C sabendo-se que $q = C.V$.

Capacitor de placas paralelas

Por conveniência desenhamos uma superfície Gaussiana que envolva completamente a placa positiva.

Pela Lei de Gauss, $q = \epsilon_0 EA$

$$V = \int_{-}^{+} E ds = E \int_0^d ds = Ed. \quad C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$



A capacitância depende somente de fatores geométricos, a área A da placa e a separação entre elas, d .

A constante de permissividade do vácuo ϵ_0 pode agora ser expressa por uma unidade mais apropriada para problemas envolvendo capacitores $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

Ao invés de

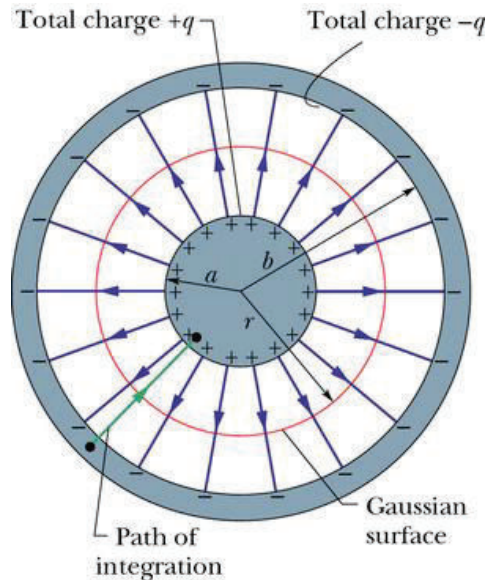
$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2.$$

CÁLCULO DA CAPACITÂNCIA

Capacitor Cilíndrico

A figura ao lado mostra, num corte transversal, um capacitor cilíndrico de comprimento L , formado por dois cilindros coaxiais concêntricos de raios a e b .

Supomos que $L \gg b$, de modo que podemos desprezar o efeito de borda do campo elétrico que ocorre nas extremidades do cilindro.



Cada placa contém uma carga de intensidade q . Escolhemos como superfície gaussiana um cilindro de comprimento L e raio r , como mostrado na figura acima.

$$q = \epsilon_0 EA = \epsilon_0 E(2\pi rL), \quad E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 Lr}$$

$$V = \int_{-}^{+} E ds = - \frac{q}{2\pi\epsilon_0 L} \int_b^a \frac{dr}{r} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 L} \ln\left(\frac{b}{a}\right),$$

$$C = 2\pi\epsilon_0 \frac{L}{\ln(b/a)}$$

Depende somente de fatores geométricos

Capacitor esférico

A figura anterior pode ainda representar uma seção transversal de um capacitor que é formado por duas cascas esféricas concêntricas, de raios a e b . A superfície gaussiana neste caso é uma esfera de raio r concêntrica com as duas cascas.

$$q = \epsilon_0 EA = \epsilon_0 E(4\pi r^2), \quad E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2},$$

$$V = \int_{-}^{+} E ds = - \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int_b^a \frac{dr}{r^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right)$$

$$= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{b-a}{ab}, \quad C = 4\pi\epsilon_0 \frac{ab}{b-a}$$

Esfera Isolada

Podemos atribuir uma capacitância a um único condutor esférico isolado de raio R supondo que a placa que está faltando é uma esfera condutora de raio infinito

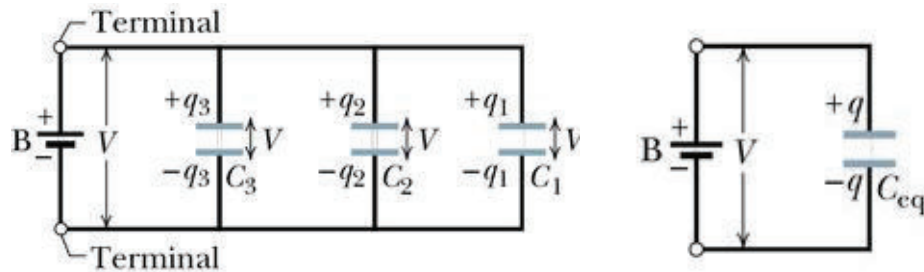
$$C = 4\pi\epsilon_0 \frac{a}{1-a/b}, \quad C = 4\pi\epsilon_0 R$$

CAPACITORES EM PARALELO E EM SÉRIE

Quando há uma combinação de capacitores em um circuito, pode-se substituir essa combinação por um capacitor equivalente, com a mesma capacitância da combinação de capacitores, podendo-se assim simplificar o circuito.

Capacitores em paralelo

Quando uma diferença de potencial V é aplicada entre as placas de vários capacitores ligados em paralelo, esta diferença de potencial V é aplicada entre as placas de cada capacitor. A carga total q armazenada sobre os capacitores é a soma das cargas armazenadas sobre todos os capacitores.



Capacitores ligados em paralelo podem ser substituídos por um capacitor equivalente que possui a mesma carga q e a mesma diferença de potencial V .

$$q = q_1 + q_2 + q_3 = (C_1 + C_2 + C_3)V.$$

$$C_{eq} = \frac{q}{V} = C_1 + C_2 + C_3, \quad C_{eq} = \sum_{j=1}^n C_j$$

Capacitores em série

Série significa que os capacitores estão ligados serialmente, um após o outro.

Quando uma diferença de potencial V é aplicada entre as placas de vários capacitores conectados em série, os capacitores possuem cargas idênticas q . A soma das diferenças de potencial entre as placas de todos os capacitores é igual à diferença de potencial aplicada.

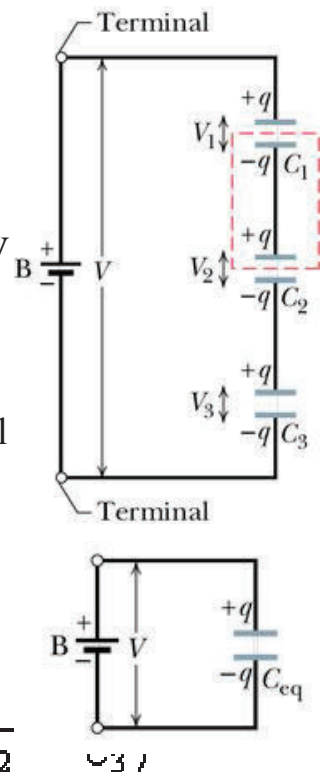
$$V_1 = \frac{q}{C_1}, \quad V_2 = \frac{q}{C_2}, \quad V_3 = \frac{q}{C_3}.$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

$$C_{eq} = \frac{q}{V} = \frac{1}{1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3},$$

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}, \quad \frac{1}{C_{eq}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{C_j}$$

Capacitores ligados em série podem ser substituídos por um capacitor equivalente com mesma carga q e mesma ddp.



ENERGIA ARMAZENADA EM UM CAMPO ELÉTRICO

Um agente externo deve realizar trabalho para carregar um capacitor.

O trabalho necessário para carregar um capacitor é armazenado na forma de energia potencial elétrica U no campo elétrico entre as placas. Esta energia pode ser recuperada a qualquer instante descarregando-se o capacitor em um circuito.

Suponha que em um dado instante, uma carga q' tenha sido transferida de uma placa de um capacitor para outra. A diferença de potencial V' entre as placas nesse instante é q'/C . Se um incremento extra de carga dq for transferido, o incremento de trabalho necessário será

$$dW = V' dq' = \frac{q'}{C} dq'.$$

O trabalho necessário para elevar a carga total do capacitor até um valor final q é

$$W = \int dW = \frac{1}{C} \int_0^q q' dq' = \frac{q^2}{2C}.$$

Este trabalho é armazenado como energia potencial U do capacitor, de modo que

$$U = \frac{q^2}{2C} = \frac{1}{2} CV^2$$

Estes resultados se aplicam não importando a geometria.

Em um capacitor de placas paralelas, desprezando-se o efeito de borda, o campo elétrico possui o mesmo valor em todos os pontos entre as placas. Assim a densidade de carga u , energia potencial por unidade de volume entre as placas também deve ser uniforme

$$u = \frac{U}{Ad} = \frac{CV^2}{2Ad}, \quad C = \frac{\epsilon_0 A}{d}, \quad u = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left(\frac{V}{d}\right)^2.$$
$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

Embora o resultado acima foi obtido para o caso do capacitor de placas paralelas, ele se aplica de forma geral.

CAPACITOR COM DIELÉTRICO

O que acontece com a capacitância quando preenchemos o espaço entre as placas de um capacitor com um dielétrico, isto é, com um material isolante ?

Usando equipamentos eletrostáticos simples, Michael Faraday descobriu que a capacitância aumentava de um fator numérico κ , que ele chamou de *constante dielétrica*.



Faraday descobriu que quando um dielétrico preenche totalmente o espaço entre as placas $C = \kappa \epsilon_0 \mathcal{A} / d = \kappa C_{\text{air}}$, com C_{air} a capacitância quando existe apenas ar entre as placas.

Em uma região completamente preenchida por um material dielétrico de constante dielétrica κ , todas as equações eletrostáticas contendo a constante de permissividade ϵ_0 devem ser modificadas substituindo ϵ_0 por $\kappa \epsilon_0$.

Assim, para uma carga pontual no interior de um dielétrico temos

$$E = \frac{1}{4\pi\kappa\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

O efeito de um dielétrico é enfraquecer o campo.

A introdução de um dielétrico entre as placas de um capacitor limita a diferença de potencial que pode ser aplicada entre as placas a um certo valor máximo V_{max} , chamado *potencial de ruptura*. Se este valor for excedido o material dielétrico se rompe. Todo material dielétrico possui uma rigidez dielétrica característica, que é o valor máximo de campo elétrico que o material pode tolerar sem se romper.

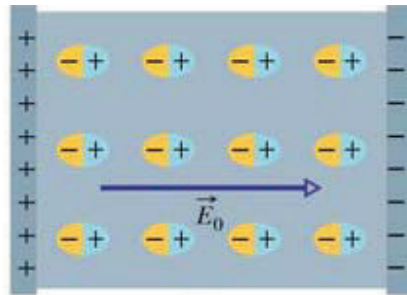
Então, para cada dielétrico existe um valor de campo elétrico, que se aplicado ao material irá destruir algumas ligações moleculares internas, possibilitando o aparecimento de uma corrente. Quando a ruptura ocorre, o capacitor passa a ter características semelhantes às de um condutor.

Um exemplo típico de ruptura é o raio que ocorre quando a diferença de potencial entre uma nuvem e a Terra se torna tão grande que pode haver escoamento de cargas de uma para a outra através da atmosfera, que se comporta como um dielétrico.

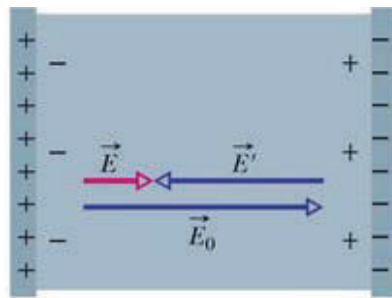
Dielétricos: Uma visão atômica

Podemos obter valores diferentes de capacitância para o mesmo par de placas paralelas, simplesmente inserindo vários materiais isolantes sobre elas.

Na figura ao lado um material isolante foi colocado entre duas placas paralelas submetidas a uma diferença de potencial V .



Como o material é isolante, os elétrons não conseguem deixar seus átomos e migrar para a placa positiva. Os prótons e elétrons de cada átomo se rearranjam formando dipólos. Independentemente das moléculas terem momento de dipólo permanente ou não, as moléculas adquirem momento de dipólo por indução quando colocadas num campo elétrico externo. Porém, como as moléculas estão colidindo continuamente umas com as outras, o alinhamento resultante é parcial, podendo-se tornar mais completo, quando se aumenta a intensidade do campo aplicado. O alinhamento produz um campo elétrico orientado no sentido oposto ao do campo e menos intenso.



Quando os dipólos se alinham dizemos que o material está polarizado.

O objetivo do dielétrico é criar um campo elétrico com sentido oposto ao campo criado pelas placas, diminuindo a intensidade do campo quando o dielétrico é introduzido.

Entretanto, com ou sem dielétrico, o campo elétrico total deve permanecer inalterado se a mesma V e a mesma separação d for mantida entre as placas, $E = V/d$.

Então, para garantir que o campo elétrico se mantenha constante, a quantidade de carga nas placas deve aumentar, aumentando consequentemente a capacitância, $C = Q/V$.

O dielétrico determina o número de linhas de campo elétrico entre as duas placas, e também a densidade de fluxo, isto é, o número de linhas por unidade de área.

A razão entre a densidade de fluxo e a intensidade de campo elétrico é a permissividade do dielétrico ϵ .

A permissividade é uma medida da facilidade com que o dielétrico permite o estabelecimento de linhas de campo em seu interior. Quanto maior a permissividade, maior a quantidade de carga depositada nas placas.

CORRENTE DE FUGA E CAPACITÂNCIAS PARASITAS

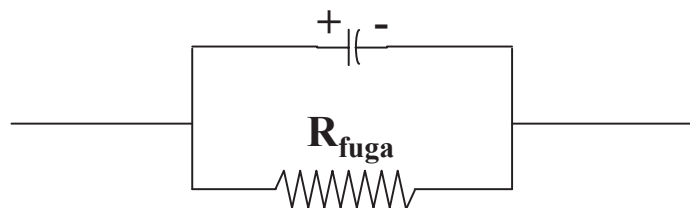
Até o momento, consideramos que somente ocorre fluxo de elétrons em um dielétrico quando a tensão aplicada excede a tensão de ruptura.

Entretanto, na prática existem elétrons livres em todo dielétrico devido à impurezas e forças internas no metal.

Quando aplicamos uma tensão entre as placas de um capacitor, uma *corrente de fuga*, causada pelos elétrons livres flui de uma placa para outra.

O que ocorre na maior parte das vezes é que a corrente é tão pequena que pode ser ignorada na maior parte das aplicações.

Este efeito pode ser representado por um resistor em paralelo com o capacitor, com valor típico maior do que 100 MΩ.



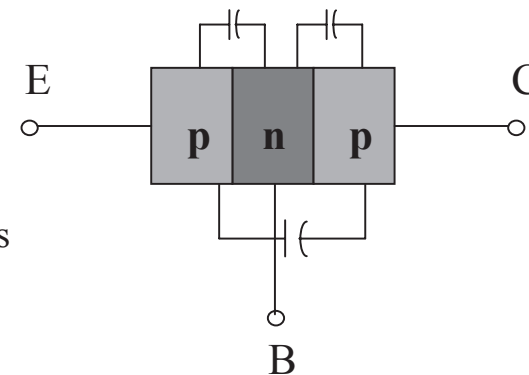
Quando carregado e depois desconectado do circuito, alguns capacitores podem perder a carga em muito pouco tempo devido à corrente de fuga de uma placa para outra.

Além dos capacitores propriamente falando, os circuitos podem também conter *capacitâncias parasitas*, que são introduzidas não-intencionalmente, se devendo à vários efeitos.

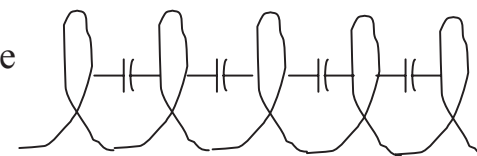
Quando dois fios de um circuito estão próximos existe uma capacitância parasita entre eles.



Nos circuitos transistorizados existem capacitâncias parasitas entre os diferentes elementos dos transistores.



No indutor aparecerá efeitos capacitivos entre suas espiras.

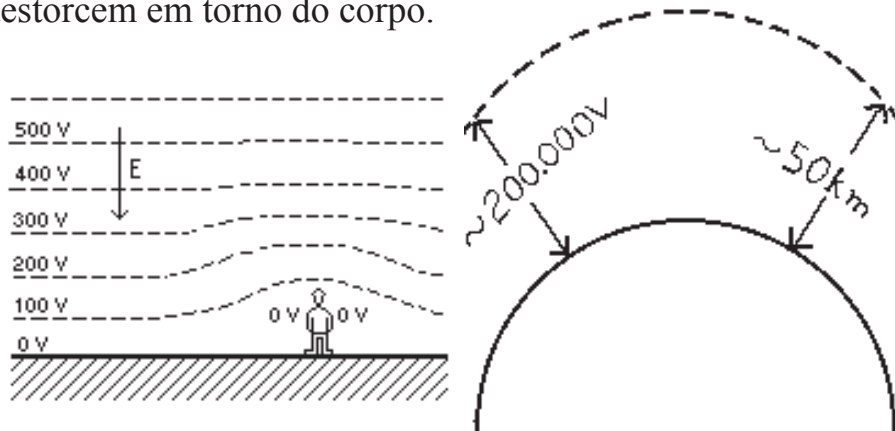


As capacitâncias parasitas podem causar sérios problemas se não forem levadas em conta no projeto de circuito.

APLICAÇÃO: CAPACITOR PLANETÁRIO

Normalmente existe na atmosfera um campo elétrico que vale cerca de 100 V/m e aponta para baixo. Isso significa que há uma tensão de quase 200 V entre sua cabeça e seus pés.

Então, por que não sentimos essa tensão ? Porque o nosso corpo é um condutor elétrico relativamente bom, se comparado com o ar. Por essa razão, o potencial do nosso corpo fica igual ao potencial do solo, e as linhas equipotenciais se distorcem em torno do corpo.



O campo elétrico que é de 100 V/m perto da superfície da Terra, vai diminuindo com a altitude e é praticamente nulo a uns 50 quilômetros de altura. No total, entre as camadas altas da atmosfera e o solo existe uma diferença de potencial de uns 200.000 Volts.

Para explicar esse campo o físico inglês Lord Kelvin supôs que a superfície da Terra e a "ionosfera", camada que fica a 50 Km de altura, formam um **capacitor esférico**, com uma diferença de potencial de 200.000 V entre as "placas". Neste caso, o dielétrico que preenche o espaço entre as placas é a atmosfera que não é totalmente isolante. Verificou-se, experimentalmente, que existe uma fraca corrente elétrica de "fuga" entre as placas desse capacitor hipotético.

De onde vem essa condutividade elétrica da atmosfera ? Vem da presença de "íons", partículas carregadas positiva ou negativamente. A concentração média de íons na atmosfera é de cerca de 1000 íons por centímetro cúbico. São eles que tornam a atmosfera fracamente condutora de eletricidade.

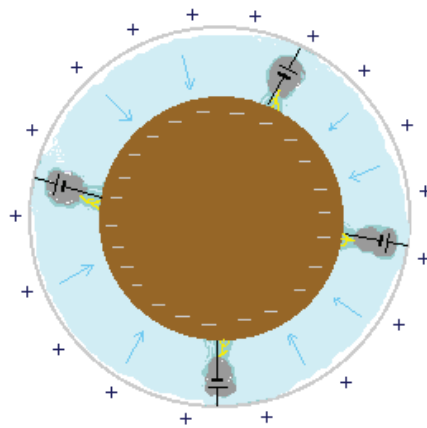
Com uma diferença de potencial de 200.000 V entre as "placas" e essa condutividade devida aos íons podemos explicar a corrente elétrica na direção do solo com densidade da ordem de $2 \cdot 10^{-12}$ A/m². Multiplicando essa densidade de corrente pela área do planeta obtemos uma corrente total de uns 1000 A!

CAPACITOR PLANETÁRIO: TEMPESTADES

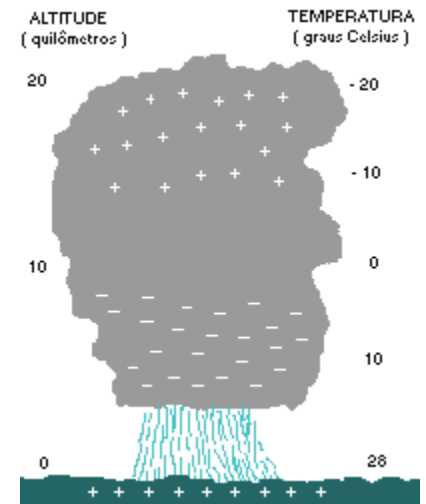
Com essa corrente descarregando o capacitor planetário, a diferença de potencial e o campo elétrico entre as placas deveriam se anular em pouco tempo. Só que isso não ocorre. Portanto, algo deve estar suprindo continuamente a diferença de potencial e mantendo o capacitor carregado.

O **gerador** que mantém o capacitor carregado são as tempestades e seus raios. As "descargas" elétricas que chamamos de **raio**, na verdade, *carregam* o capacitor terrestre, trazendo cargas negativas das nuvens para o solo. A superfície da Terra é a placa negativa do capacitor e a ionosfera é a placa positiva. Nas regiões de tempo bom, em azul, há uma corrente da placa positiva para a negativa. No total, essa corrente chega a 1000 A e tende a descarregar o capacitor.

As regiões onde ocorrem tempestades funcionam como se fossem enormes baterias suprindo uma corrente positiva do solo para cima. De uma maneira geral, os dois efeitos se compensam e o capacitor se mantém carregado.



As tempestades envolvem grandes nuvens chamadas "*cumulus nimbus*". São nuvens pesadas, com uns 10 Km ou mais de diâmetro na base e uns 10 a 20 Km de altura. Medidas da carga elétrica em nuvens de tempestade indicam uma distribuição de carga semelhante àquela mostrada ao lado. O topo da



nuvem é carregado positivamente e a base, negativamente. As cargas negativas concentradas no pé da nuvem induzem cargas positivas no solo. Entre a nuvem e o solo podem surgir diferenças de potencial elétrico da ordem de milhões de volts. É aí que se dão algumas das descargas elétricas que chamamos de **raio**. Uma tensão tão alta pode romper a capacidade de isolamento do ar, a "rigidez dielétrica", fazendo com que elétrons, comecem a se mover da nuvem para a terra.

CAPACITOR PLANETÁRIO

Os elétrons se movem na direção do solo em uma sucessão de passos, em zig-zag, abrindo caminho para outros elétrons. Quando a ponta do líder chega a uns 20 metros do solo, uma descarga, chamada "descarga de conexão", inicia-se de algum local pontudo no solo e fecha o circuito, formando um "fio condutor" que liga a terra à nuvem. As cargas negativas presentes no líder mais próximas do solo dão início à descarga, e um belo e apavorante risco luminoso corre do chão para a nuvem. O ar em redor do canal luminoso aberto pelo líder é subitamente aquecido e se expande com violência. O som dessa expansão é o que chamamos de **trovão**. Depois dessa descarga inicial, outras descargas secundárias costumam ocorrer, aproveitando o mesmo caminho aberto pelo líder. São de menor intensidade e ocorrem depois de um tempo tão curto que parecem ser um único raio.

