

Autor: Roberto A. Salmeron

1: Indução eletrostática

Suponhamos que um condutor A carregado, por exemplo positivamente, seja aproximado de um condutor B neutro (fig. 80). Verificaremos que na parte do condutor B próxima do outro, aparecerá eletricidade negativa e na parte afastada, eletricidade positiva. Esse fenômeno é chamado indução eletrostática, ou influência eletrostática.

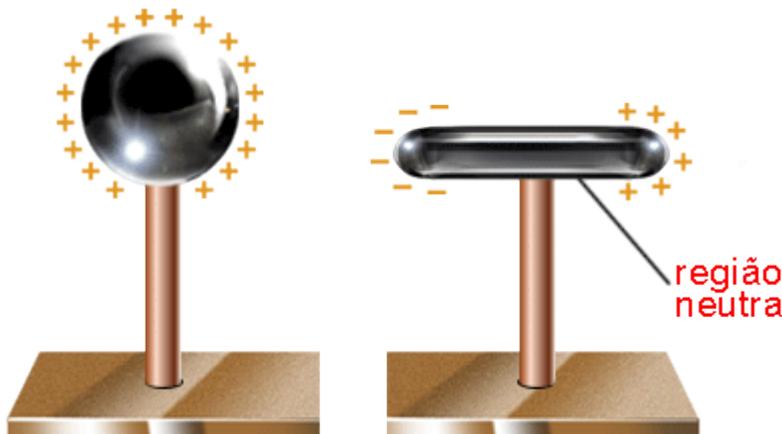


Figura 80

Portanto, chama-se indução eletrostática ao fenômeno pelo qual um condutor se eletriza pela simples aproximação de um outro já eletrizado. O condutor que está eletrizado é chamado indutor, ou influenciante; o condutor que se eletrizou é chamado induzido ou influenciado.

Explicação do fenômeno

Vimos, no Capítulo I, uma explicação sumária da eletrização dos corpos por meio dos elétrons livres dos condutores, os quais constituem uma “nuvem de elétrons”, de grande mobilidade. Com essas idéias sobre a eletrização, a indução eletrostática é explicada do seguinte modo: o corpo B normalmente se apresenta neutro porque a carga negativa de seus elétrons é neutralizada pela carga positiva dos prótons. Quando ele é colocado próximo do corpo A, fica dentro do campo elétrico de A. O corpo A, tendo carga positiva, atrai elétrons livres, que se deslocam e ficam na parte de B próxima de A. A extremidade oposta de B fica então com excesso de carga positiva.

Se o indutor A tiver carga negativa, ele repele elétrons livres, que também tem carga negativa. Esses elétrons se dispõem então na extremidade de B

Autor: Roberto A. Salmeron

afastada de A. E à extremidade de B próxima de A fica eletrizada positivamente, porque fica com excesso de cargas positivas.

A indução é explicada então por meio de movimento de elétrons livres dentro do condutor. Isso explica também porque o induzido sempre se eletriza com carga positiva e com carga negativa ao mesmo tempo, aparecendo uma em cada extremidade.

Vemos que na indução não há passagem de carga elétrica do indutor para o induzido. Há uma simples separação de cargas elétricas que já existiam no induzido, mas se neutralizavam.

Entre a carga positiva e a negativa do induzido existe uma região sem carga, chamada região neutra, ou zona neutra.

2: Características da indução

Neste fenômeno são observados os seguintes fatos fundamentais.

1º) No induzido aparecem ao mesmo tempo cargas positivas e negativas e uma região neutra.

2º) Afastando-se o indutor, o induzido volta ao estado neutro, porque foi afastado o campo elétrico que produzia separação nas cargas do induzido. Isso mostra que as cargas positiva e negativa desenvolvidas no induzido são de mesmo valor absoluto. Compreende-se considerando-se que as cargas positiva e negativa do induzido eram cargas que se neutralizavam antes da indução e que foram separadas.

3º) Aproximando-se o indutor do induzido, a região neutra se desloca. Porque, diminuindo a distância entre as cargas do indutor e as do induzido, a força de atração sobre as cargas de nome contrário aumentam e elas se aproximam mais do indutor; a força de repulsão sobre as cargas de mesmo nome também aumentam, e elas se afastam mais.

4º) Ligando-se o induzido à Terra, a carga de mesmo nome que a do indutor se escoia para a Terra, qualquer que seja o ponto do induzido pelo qual façamos ligação. No caso da figura 81 é a carga positiva que se escoia para a Terra.

Autor: Roberto A. Salmeron

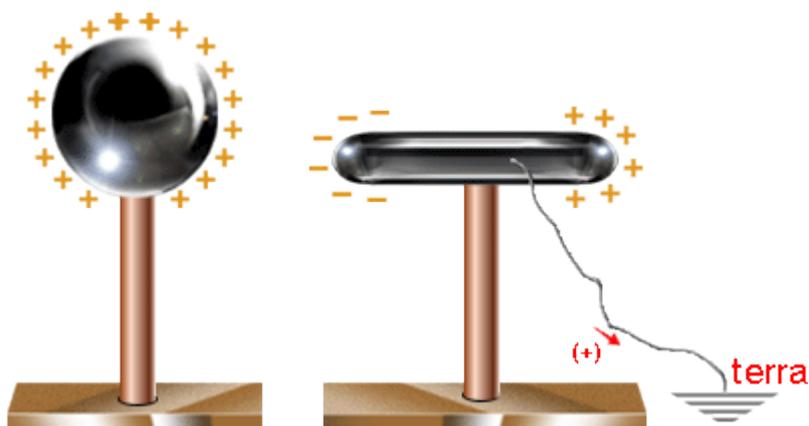


Figura 81

5º) O fenômeno da indução produz modificação na **densidade elétrica** do indutor. A densidade aumenta no lado do indutor voltado para o induzido. Isso porque tanto a carga positiva do indutor atrai a negativa do induzido, como esta do induzido atrai a positiva do indutor. Assim há um acúmulo de carga de indutor na região mais próxima do induzido (fig. 82).

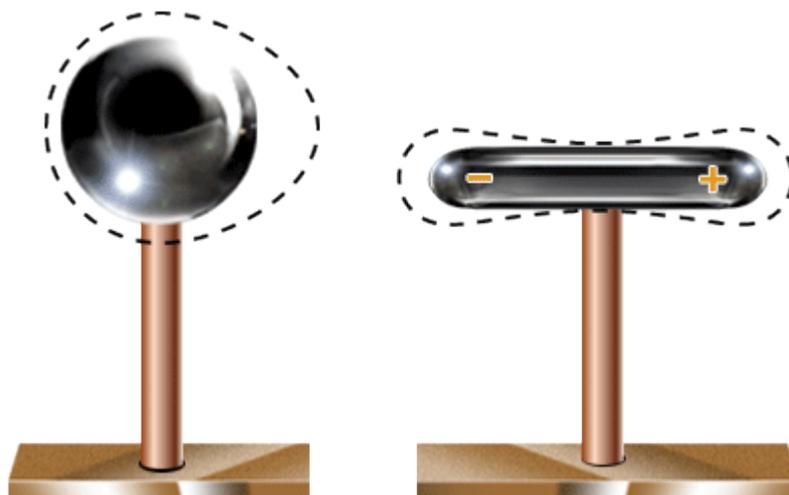


Figura 82

6º) O meio interposto entre os dois corpos influi muito no fenômeno. A indução se processa tanto mais facilmente quanto mais elevado for o poder indutor específico do meio interposto.

3: Elementos correspondentes

Suponhamos um indutor carregado, por exemplo positivamente. Na parte do induzido próxima do indutor aparece carga elétrica negativa. As linhas de força

Autor: Roberto A. Salmeron

do campo elétrico existente entre o indutor e o induzido “saem” do indutor e “chegam” ao induzido. Assim, em um ponto da superfície do indutor o vetor campo elétrico é \vec{E}_1 e tem o sentido indicado na figura; em um ponto da superfície do induzido o vetor campo elétrico é \vec{E}_2 (fig. 83).

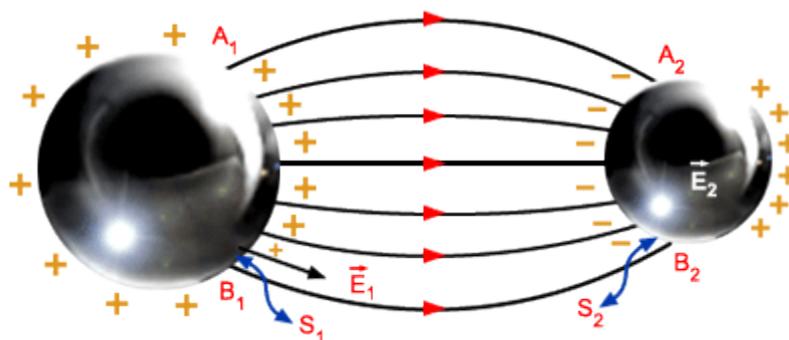


Figura 83

Consideremos no indutor um elemento de superfície de área ΔS_1 , e o tubo de forças determinado por ΔS_1 . Esse tubo de forças determina, no induzido, um elemento de superfície de área ΔS_2 . Essas duas superfícies correspondentes do mesmo tubo de forças chamam-se elementos correspondentes. É muito importante o seguinte:

Teorema

“Dois elementos correspondentes possuem cargas elétricas de mesmo valor absoluto e de sinais contrários”.

Seja ΔQ_1 a carga elétrica contida em ΔS_1 e ΔQ_2 a carga elétrica contida em ΔS_2 . Que elas tem sinais opostos, é evidente. Precisamos provar que $|\Delta Q_1| = |\Delta Q_2|$. Consideremos os elementos correspondentes suficientemente pequenos para que em cada um deles o campo possa ser considerado uniforme. Como as linhas de força sempre encontram a superfície do condutor perpendicularmente, \vec{E}_1 é normal a ΔS_1 e \vec{E}_2 normal a ΔS_2 . Então o fluxo que sai de ΔS_1 , vale:

$$\phi_1 = |\vec{E}_1| \Delta S_1$$

Autor: Roberto A. Salmeron

O fluxo que chega a ΔS_2 vale:

$$\phi_2 = |\vec{E}_2| \Delta S_2$$

Por definição, os elementos correspondentes são abrangidos pelo mesmo fluxo. Então $\phi_1 = \phi_2$, ou seja:

$$|\vec{E}_1| \Delta S_1 = |\vec{E}_2| \Delta S_2$$

Mas, pelo [Teorema de Coulomb](#),

$$|\vec{E}_1| = \frac{1}{\epsilon} 4\pi |\sigma_1| \text{ e } |\vec{E}_2| = \frac{1}{\epsilon} 4\pi |\sigma_2|$$

Logo:

$$\frac{1}{\epsilon} \cdot 4\pi |\sigma_1| \Delta S_1 = \frac{1}{\epsilon} \cdot 4\pi |\sigma_2| \Delta S_2$$

ou:

$$|\sigma_1| \Delta S_1 = |\sigma_2| \Delta S_2$$

o que significa que:

$$|\Delta Q_1| = |\Delta Q_2|$$

como queríamos demonstrar.

4: [Dois casos de indução](#)

Podemos considerar dois casos no fenômeno de indução.

1º caso

O indutor não é envolvido pelo induzido (fig. 84). É o caso da figura anterior. Neste caso, toda a região negativa do induzido, $A_2 B_2$, tem como correspondente uma região $A_1 B_1$ do indutor. Sendo iguais em valor absoluto as cargas dos elementos correspondentes, concluímos que a carga total negativa

Autor: Roberto A. Salmeron

induzida em A_2B_2 tem igual valor absoluto que a carga do indutor que está contida na região A_2B_2 e, portanto, menor que a carga total do indutor.

A carga positiva induzida, tendo mesmo valor absoluto que a negativa induzida, também é menor que a carga total do indutor.

2º caso

O indutor é envolvido pelo induzido. Este caso é chamado indução completa. Vemos que, qualquer elemento de superfície considerada no indutor tem um correspondente no induzido. Como em dois elementos correspondentes há cargas elétricas de mesmo valor absoluto, concluímos que a carga induzida tem o mesmo valor absoluto que a carga indutora. Sendo $+Q$ a carga indutora, as induzidas valerão $+Q$ e $-Q$.

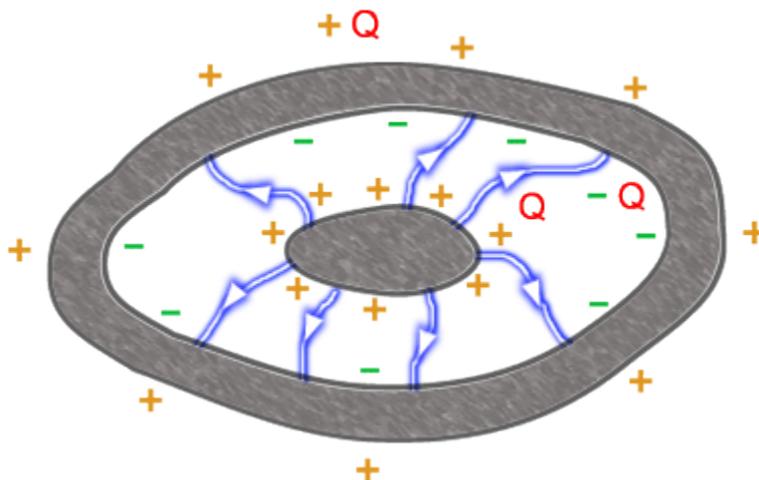


Figura 84

Autor: Roberto A. Salmeron

Este caso de indução já tinha sido observado por Faraday, quando fez a experiência com o chamado “cilindro de Faraday”. É um cilindro de altura muito maior que o diâmetro, que funciona como induzido (fig. 85). O indutor é uma pequena esfera presa a um cabo isolante. Um eletrômetro é ligado à face externa do cilindro. A esfera é eletrizada e depois introduzida vagarosamente no cilindro. À medida que a esfera vai penetrando, as lâminas do eletrômetro vão divergindo mais, o que indica que a quantidade de eletricidade induzida vai aumentando. Quando o indutor atinge certa profundidade, as lâminas do eletrômetro mantêm a abertura constante, indicando que a carga induzida atingiu máximo. Para essa posição da esfera, a indução já é completa. Ligando-se o cilindro à terra, a sua carga positiva se escoia, e, ele fica eletrizado negativamente, passando a carga negativa para a face externa. Tocando-se depois a esfera na parede do cilindro, tanto a esfera como o cilindro se neutralizam. Isso mostra que a carga negativa desenvolvida na face interna do induzido é de mesmo valor absoluto que a positiva do indutor.

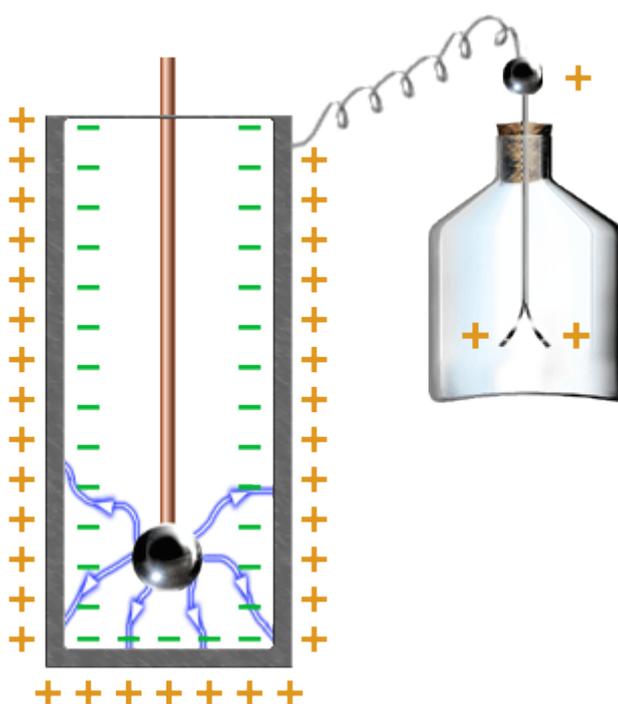


Figura 85

5: Indução mútua

Somente por questão de ordem foi apresentado o fenômeno de indução com o induzido inicialmente neutro. Mas, na realidade, isto não é necessário. A indução existe mesmo no caso em que dois corpos carregados estão em presença. Isso porque cada um dos corpos fica situado no campo elétrico do outro corpo e sofre indução.

Exemplo: Suponhamos o corpo A, com carga negativa, próximo do corpo B com carga positiva (fig. 86). No corpo A aparecem cargas negativas e positivas como indica a figura abaixo.

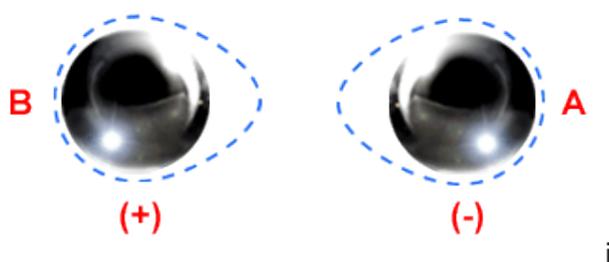


Figura 86

Vemos que essas cargas novas produzem um aumento de densidade elétrica do corpo A na região mais próxima de B porque nessa região aparece carga negativa, e uma diminuição da densidade elétrica do corpo A na região afastada do corpo B porque nessa região aparece carga positiva. Raciocínio idêntico se aplica ao corpo B. Na realidade sempre existe indução mútua mesmo quando o induzido está inicialmente neutro. Suponhamos o corpo A com carga positiva e o corpo B neutro (fig. 87). Neste último aparecem cargas negativas e positivas. A carga negativa do corpo B, estando próxima do corpo A, induz nesse corpo cargas positivas e negativas. Isso explica porque no corpo A vai haver um aumento da densidade elétrica na região próxima do corpo B e uma diminuição na região oposta, como tínhamos já mencionado na propriedade 5ª do tópico "[Características da Indução](#)".

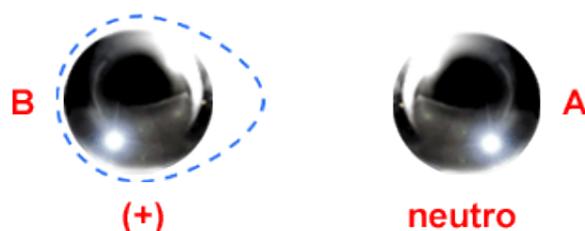


Figura 87

6: Aplicações da indução

1ª) O fenômeno da indução é usado quando queremos carregar um corpo com carga de sinal determinado. Suponhamos por exemplo que queremos carregar o corpo A com carga positiva. Aproximamos dele um corpo B eletrizado negativamente, e no corpo A aparecerá, por indução, carga positiva e carga negativa (fig. 88-1º). Ligamos o corpo A à terra; é assim escoada a carga negativa (fig. 88-2º). Cortando a ligação com a terra, e afastando o indutor, a carga positiva de A se espalha por toda a superfície, e esse corpo fica eletrizado positivamente. Esse processo é usado frequentemente nos laboratórios para carregar um eletroscópio com carga de sinal determinado

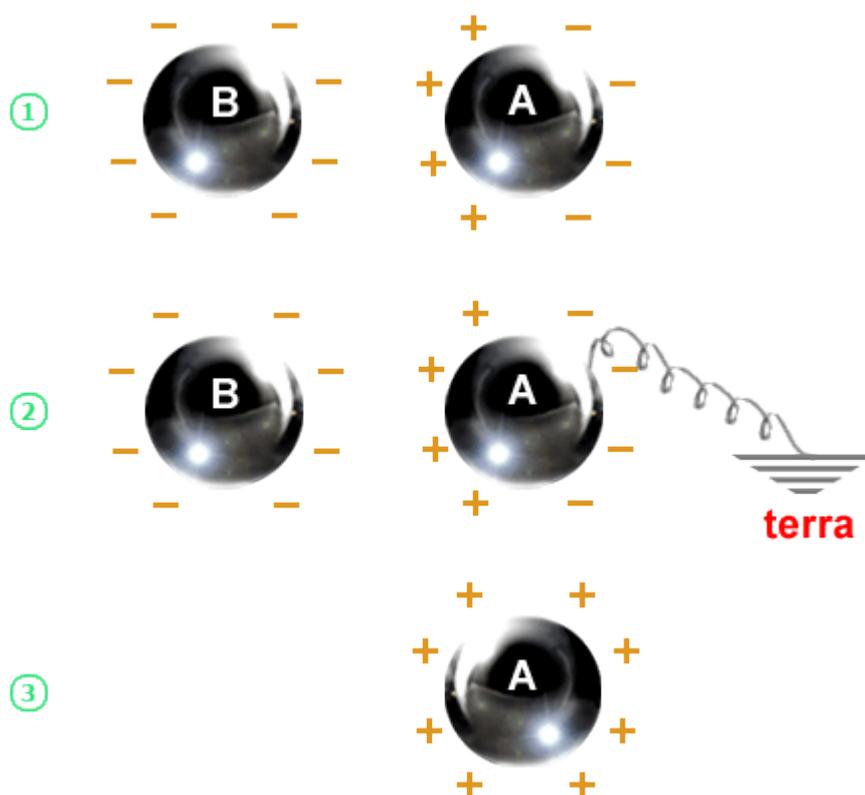


Figura 88

Autor: Roberto A. Salmeron

2ª) Com o fenômeno da indução, podemos explicar a atração de corpos leves pelos corpos atritados. Suponhamos que o corpo A é atritado e adquira carga positiva. Um corpo leve B colocado nas proximidades fica com carga negativa e carga positiva. Entre a carga positiva de A e a negativa do leve aparece uma força \vec{F}_a de atração. Entre a carga positiva do corpo A e a positiva do corpo leve aparece uma força de repulsão \vec{F}_r .

O corpo leve fica sujeito a três forças: \vec{F}_a , \vec{F}_r e o peso \vec{P} . As forças \vec{F}_r e \vec{P} dão uma resultante \vec{R} . Quando \vec{F}_a for superior a essa resultante o corpo é deslocado para o corpo A. Mas, para isso, é necessário que o peso \vec{P} seja pequeno, isto é, que o corpo B seja leve.

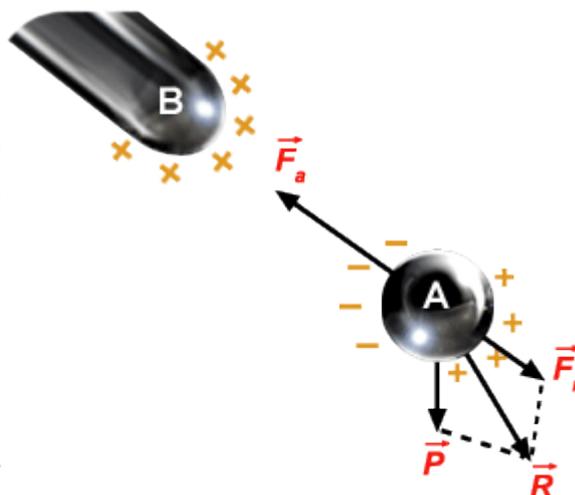


Figura 89

3ª) Uma grande aplicação do fenômeno está nos condensadores. Um condensador é constituído por um indutor e um induzido separados por um dielétrico. (Será estudado no [Capítulo V](#)).

7: [Máquinas eletrostáticas](#)

São dispositivos que fornecem eletricidade estática, por meio da separação de cargas positivas e negativas existentes nos condutores. Os tipos principais são os seguintes:

- máquinas de atrito
- máquinas de indução
- máquina de Van de Graaf.

a. Máquinas de atrito

O princípio de funcionamento é o seguinte: um cilindro A de material isolante, por exemplo de vidro ou ebonite, gira. Ao girar, atrita-se com uma pele ou

Autor: Roberto A. Salmeron

flanela B e se eletriza (fig. 90). Se o atrito for entre vidro e pele, o vidro se eletriza positivamente. O cilindro A, continuando a girar, a sua parte eletrizada passa em frente do corpo E, que possui uma ponta D. Quando a carga positiva está em frente do corpo E, a ponta D se eletriza, por indução, negativamente, e a parte oposta C, positivamente. A carga negativa induzida depois escapa pela ponta D e neutraliza a carga positiva indutora. E o corpo E fica eletrizado positivamente. Continuando a girar o cilindro A, a carga positiva de E vai aumentando e esse corpo fica com potencial elevado em relação a terra T. A carga de E pode depois ser utilizada.

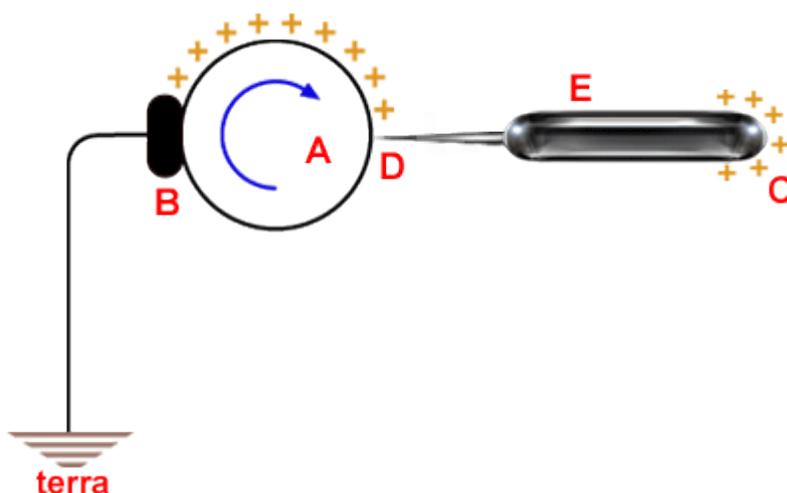


Figura 90

Todas as máquinas eletrostáticas de atrito funcionam de acordo com esse princípio exposto. A diferença entre os diversos tipos existentes está na construção, isto é, na forma geométrica e na disposição de suas peças. No tópico [Uma Máquina Eletrostática Simples](#) demos a descrição de uma máquina eletrostática de atrito de construção muito simples.

b. Máquinas de indução - eletróforo

O exemplo típico dessas máquinas é o eletróforo, inventado por Volta em 1775. Consta de duas peças: um disco isolante, A, feito de enxofre ou cera, e um disco metálico B, com um cabo isolante. Inicialmente atritamos o disco A com flanela. Ele fica com excesso de elétrons e, portanto, se eletriza negativamente (fig. 90-a) Depois colocamos o disco metálico sobre o disco isolante. Como as superfícies são rugosas, embora a olho nú pareçam muito lisas, só vai haver contato entre elas em poucos pontos, e pouca carga escapa do isolante para o metal. Mas, por indução, no metal aparecem cargas positiva e negativa (fig. 91-b). Pondo-se o disco metálico em comunicação com a Terra, os seus elétrons escapam. Cortando-se a ligação com a Terra e afastando-se o

Autor: Roberto A. Salmeron

disco metálico, ele fica eletrizado positivamente. Aproximando-se uma mão, uma faísca soltará. Podemos assim carregar e descarregar sucessivamente o metal sem que haja uma diminuição apreciável da carga do enxofre.

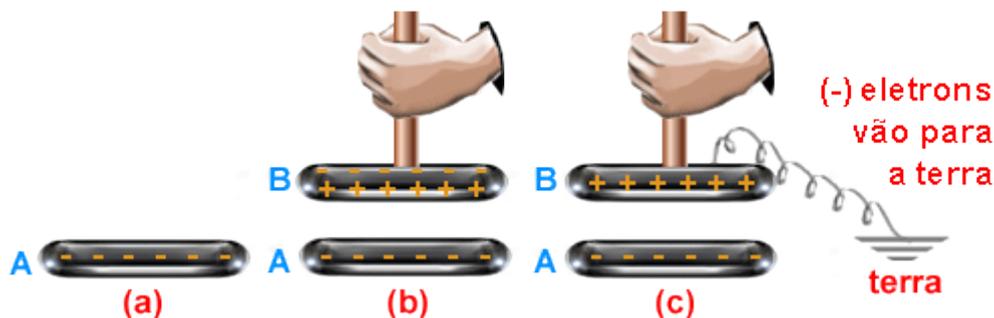


Figura 91

Nota: Quando se produz a faísca entre o eletróforo e nossa mão, produz-se luz, som e calor, e, portanto, há gasto de energia. Essa energia provém da carga elétrica acumulada no disco metálico, e que resultou da indução eletrostática. A indução foi provocada pela carga do enxofre. E a carga do enxofre por sua vez resultou do atrito com a flanela. A energia mecânica gasta com o atrito é então a causa do aparecimento da luz, do som e do calor que acompanham a faísca. Com o exemplo do eletróforo concluímos duas coisas importantes:

1ª que a carga elétrica acumulada em um condutor significa energia, pois pode fazer aparecer a energia sob a forma de luz, som e calor.

2ª Que a carga elétrica não aparece do nada, mas é necessário um gasto de energia para a libertação das cargas existentes nos condutores. Uma máquina eletrostática é então um dispositivo que gasta um certo tipo de energia para fazer aparecer carga elétrica estática em um condutor. Expressimos esse fato dizendo que a máquina eletrostática transforma um tipo qualquer de energia em energia eletrostática. (E um dispositivo que gasta um tipo qualquer de energia para fornecer carga elétrica em movimento, não estática, é chamado gerador. Em Eletrodinâmica estudamos os geradores).

Sugestão: Sugerimos ao leitor construir um eletróforo. A placa de enxofre pode ser obtida fundindo-se enxofre em pó numa bandeja.

c. gerador eletrostático de Van de Graaf

Autor: Roberto A. Salmeron

Nota: Colocando-se duas esferas ou duas pontas próximas e aumentando-se lentamente a diferença de potencial entre elas, quando a diferença atingir um certo valor salta bruscamente uma faísca entre as esferas ou as pontas (fig. 92-a). Mas, colocando-se uma ponta em frente a um plano e aumentando-se lentamente a diferença de potencial entre eles, não há faísca (fig. 92-b). Quando a diferença de potencial atingir um certo valor, o ar compreendido entre a ponta e o plano se ioniza e se estabelece uma corrente elétrica de pequena intensidade através do ar, entre a ponta e o plano. O ar que envolve a ponta se torna ligeiramente colorido.

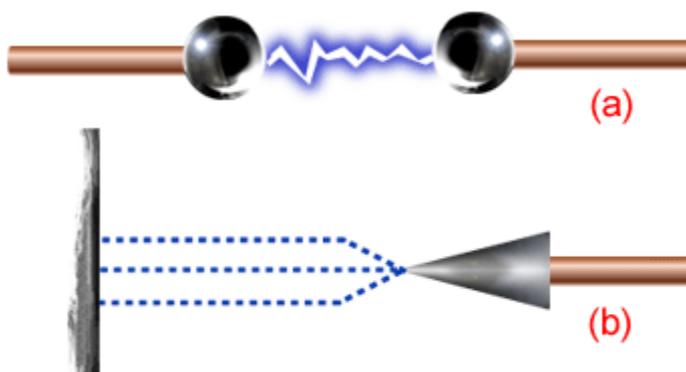


Figura 92

A essa passagem lenta de eletricidade por um gás chamamos eflúvio. Esse fenômeno é empregado no gerador Van de Graaf, que passamos a descrever (fig. 93).

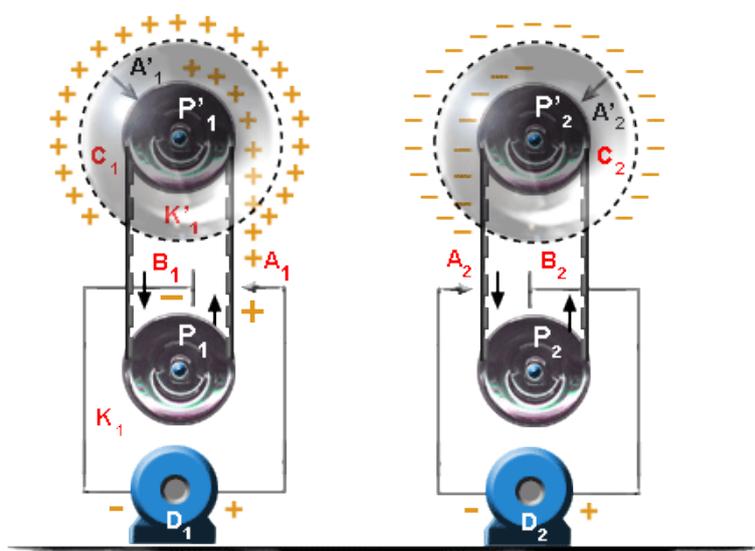


Figura 93

Autor: Roberto A. Salmeron

Entre os polos de um dínamo D_1 de alta tensão (por exemplo, uns 10.000 volts) é ligada uma ponta A_1 (ao polo positivo) e uma placa B_1 (ao polo negativo). Entre A_1 e B_1 há então uma descarga em forma de eflúvio. Uma correia K_1K_1' que gira sobre as polias P_1 e P_1' , ao passar entre A_1 e B_1 se eletriza positivamente. Girando no sentido indicado pelas flechas, essa correia leva suas cargas para o interior de um cilindro. A carga da polia age então como um indutor colocado dentro de um induzido. Vemos que é análogo ao que se passa com o cilindro de Faraday. O induzido é o cilindro C_1 , que possui na parte interna uma ponta A_1' , próxima da correia. A carga negativa induzida no cilindro se acumula nessa ponta, e, quando a correia passa em frente à ponta com a sua carga positiva, há uma descarga por eflúvio que neutraliza a carga da correia e a da ponta. A parte esquerda da correia deve ser então neutra. A carga positiva induzida passa então para a face externa do cilindro C_1 . Com o movimento contínuo da correia se consegue acumular no cilindro uma grande carga e uma diferença de potencial elevadíssima em relação à terra. O gerador possui um outro sistema análogo a esse, mas que acumula no cilindro carga negativa (parte direita da figura). Para isso, a ponta é ligada ao polo negativo do dínamo D_2 , e não ao positivo. Desse modo se acumula no cilindro C_2 uma grande carga negativa e ele fica com grande diferença de potencial negativa em relação à terra. Chamando $+V_1$ ao potencial positivo do cilindro C_1 e $-V_2$ ao potencial negativo do cilindro C_2 , a diferença de potencial que se pode aproveitar entre C_1 e C_2 é:

$$V = V_1 = (-V_2) = V_1 + V_2$$

Autor: Roberto A. Salmeron

O gerador Van de Graaf é o mais potente gerador eletrostático que se conseguiu até nossos dias.



Fotografia de um Gerador de Van de Graaf

8: Nota histórica

O físico Van de Graaf inventou em 1931 o gerador que leva o seu nome. A sua idéia foi obter um gerador capaz de produzir diferenças de potencial elevadas, para utilizá-lo em Física Atômica. As diferenças de potencial que eles fornecem são de vários milhões de volts, tendo sido já construído vários que fornecem 4,5 a 5 milhões. São usados para acelerar partículas eletrizadas constituintes do átomo, como, por exemplo, elétrons ou prótons. Essas partículas, colocadas no campo elétrico produzido pela grande diferença de potencial ficam sujeitas a forças, e são aceleradas. Ganham então, energia cinética. Depois se estudam propriedades das partículas em função da energia cinética que elas adquirem.

Na Faculdade de Física da Universidade de São Paulo, o Prof. Oscar Sala está construindo um gerador Van de Graaf que dará 4 milhões de volts, e que deverá entrar em funcionamento em princípios de 1953.