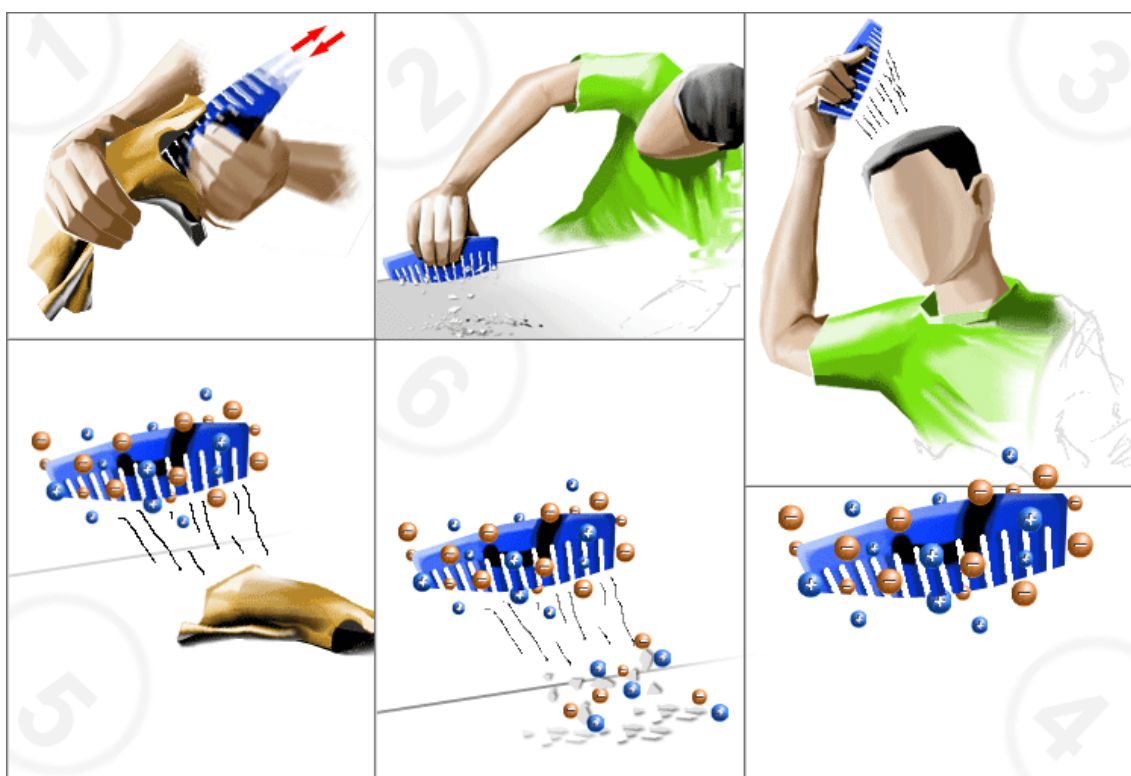


## 1: Introdução

Faça o leitor à seguinte experiência: aproxime um pente, ou uma caneta-tinteiro, de corpos leves, como por exemplo, pequenos pedaços de papel ou de cortiça (rolha). Verá que nada acontece. Depois atrite o pente, ou a caneta, com um pedaço de pano, ou lã, ou seda, e aproxime novamente dos pedaços de papel ou de cortiça. Verá que o pente, ou a caneta, depois de atritado, atrai aqueles corpos leves. Com essa observação simples concluímos que o pente ou a caneta, quando atritado, adquire uma propriedade nova, que não possui quando não é atritado.



Esse fenômeno foi descoberto com o âmbar, mais ou menos há 25 séculos, pelo filósofo grego Tales, da cidade de Mileto. Ele observou que o âmbar, depois de atritado, adquire a propriedade de atrair corpos leves. Essa observação de Tales permaneceu isolada. A segunda notícia que temos de uma descoberta em Eletricidade é de 19 séculos depois. No século XVI, William Gilbert, médico da rainha Izabel da Inglaterra, descobriu que muitos outros corpos, quando atritados, adquirem a propriedade de atrair corpos leves, isto é, se comportam como o âmbar.

**Autor: Roberto A. Salmeron**

Para indicar que esses corpos estavam se comportando como o âmbar, Gilbert dizia que estavam eletrizados. Isso porque em grego o âmbar se chama *electron*, e com a palavra eletrizado ele queria dizer "do mesmo modo que o *electron*". E à causa dessa propriedade que aparece quando os corpos são atritados, à qual Gilbert não conhecia, ele chamou eletricidade. Até hoje mantemos essas expressões: chamamos corpo eletrizado àquele que está com a propriedade de atrair outros corpos, isto é, que manifesta eletricidade. E chamamos corpo neutro àquele que não está eletrizado.

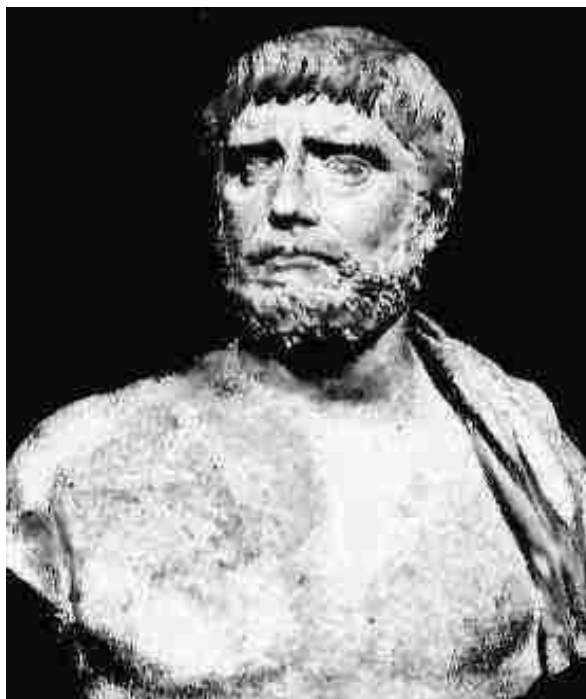


Figura de Tales

Atualmente sabemos que duas substâncias, contanto que sejam diferentes, quando atritadas sempre se eletrizam.

## 2: Condutores e Isolantes

Hoje sabemos que todos os corpos se eletrizam, sendo que uns com mais facilidade que outros. Mas se não tivermos cuidado, em certas condições podemos parecer que certas substâncias não se eletrizam, o que é errado. O leitor pode fazer a seguinte experiência: atrite um bastão de vidro numa região BC. Verá que nessa região o vidro atrairá corpos leves, como pedaços de papel ou de cortiça. Isso indica que o vidro ficou eletrizado nessa região (fig. 13). Depois atrite um bastão de metal numa região BC, e aproxime-o dos mesmos corpos leves. Se ele for seguro diretamente com as mãos, não atrairá nenhum corpo leve. Mas se for seguro através de um cabo de vidro, por exemplo, atrairá. À primeira vista ficamos com a impressão de que o metal se eletriza quando tem um cabo de vidro, e não se eletriza quando não tem. Mas, na realidade o metal se eletriza sempre, e os fatos mencionados se explicam do seguinte modo: o vidro, quando eletrizado na região BC isola a eletricidade desenvolvida nessa região, e é por isso que consegue atrair corpos leves. O metal quando eletrizado em BC, não isola a eletricidade nessa região, mas conduz a

**Autor: Roberto A. Salmeron**

eletricidade através do seu interior; quando está seguro com as mãos, a eletricidade chega ao corpo do experimentador e se escoia para a terra. Quando o metal tem cabo de vidro, esse cabo não permite o escoamento da eletricidade, que fica então localizada no metal.

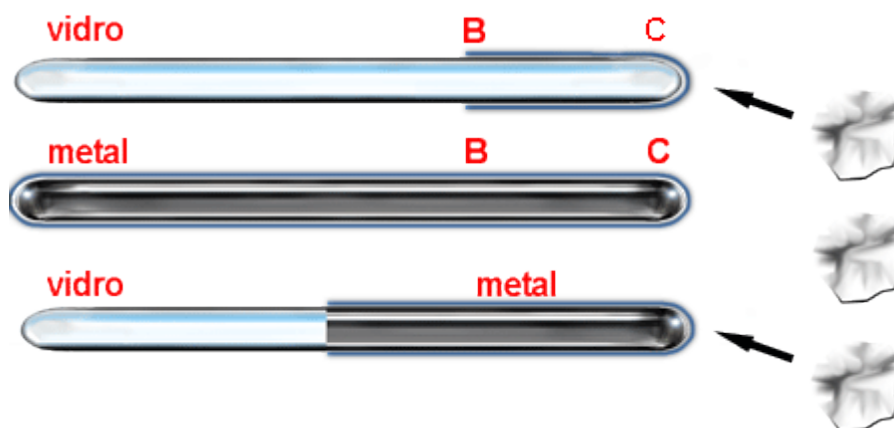


Figura 13

As substâncias que isolam a eletricidade no lugar em que ela aparece como o vidro, são chamadas **isolantes**, ou **dielétricos**. Os que se comportam como os metais, isto é, que conduzem a eletricidade, são chamados **condutores**.

Os condutores mais comuns são: os metais, o carbono, as soluções aquosas de ácidos, bases e sais, os gases rarefeitos, os corpos dos animais, e, em geral, todos os corpos úmidos. Os isolantes mais comuns são: vidro, louça, porcelana, borracha, ebonite, madeira seca, baquelite, algodão, seda, lã, parafina, enxofre, resinas, água pura, ar seco, etc.. Modernamente estão tomando importância cada vez maior como isolantes certas substâncias plásticas fabricadas sinteticamente.

Vimos acima que quando o observador segura com as mãos o bastão de metal, a eletricidade desenvolvida no metal passa pelo corpo do observador e se escoia para a terra. É claro que isso só é possível porque o corpo humano (e de todos os animais) é condutor e a terra também é condutora. Todas as vezes que um corpo eletrizado é colocado em contato com a Terra, a eletricidade do corpo passa para a terra. No Capítulo V demonstraremos que isso acontece não só porque a terra contém substâncias condutoras, mas principalmente porque seu volume é muito maior que o volume dos corpos que ficam em contato com ela. Como veremos mais adiante, fazemos numerosíssimas aplicações práticas dessas duas propriedades que a terra tem: de ser

**Autor: Roberto A. Salmeron**

condutora, e de "roubar" a eletricidade dos corpos eletrizados com que entra em contato.

A temperatura e a umidade influem muito na "qualidade" de um isolante e de um condutor. De modo geral, os isolantes úmidos são maus isolantes, porque passam a conduzir um pouco a eletricidade. À temperatura elevada os isolantes são também maus isolantes: o vidro, por exemplo, que à temperatura ambiente é ótimo isolante, quando aquecido até ficar pastoso se torna muito bom condutor. Nos condutores, a temperatura em geral tem ação inversa: eles são melhores condutores a baixas temperaturas. A umidade age sempre no mesmo sentido, quer nos condutores, quer nos isolantes: melhora a condução.

De modo geral, os bons condutores de eletricidade também são bons condutores de calor, e os isolantes elétricos também são isolantes térmicos.

### 3: Eletricidade positiva e negativa

Os corpos eletrizados exercem todas as ações idênticas, mas não iguais. De há muito sabemos que há dois tipos de eletricidade diferentes. A existência desses dois tipos pode ser observada com a seguinte experiência, que aconselhamos o leitor a fazer. Atritamos um bastão de vidro com seda. Aproximando o bastão de um corpo leve, este é atraído, entra em contato com o vidro e depois é repellido (fig. 14).

Atritamos depois um bastão de enxofre também com seda. Aproximando este bastão do corpo leve, observamos os mesmos fenômenos que no caso do vidro: o corpo é atraído, encosta no bastão e depois é repellido (fig. 14).

Concluimos que o vidro, atritado com seda, e o enxofre atritado com seda, comportam-se de maneira idêntica, quando atuam separadamente. Mas, se combinarmos as ações dos dois, veremos que há uma diferença nos seus estados de eletrização: aproximando o bastão de enxofre do corpo leve logo que este é repellido pelo vidro, veremos que o enxofre o atrai; reciprocamente, aproximando o bastão do vidro do corpo leve logo que este é repellido pelo enxofre, o vidro o atrai.

**Autor: Roberto A. Salmeron**

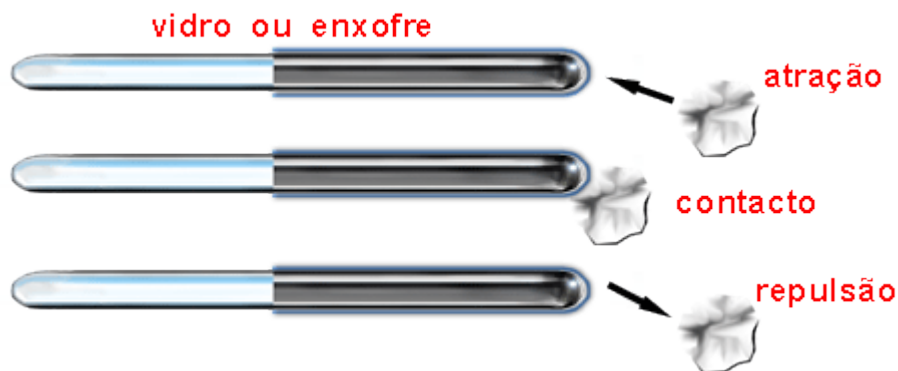


Figura 14

Concluimos que, quando o vidro exerce **força de atração**, o enxofre exerce **força de repulsão**, e vice-versa. Repetindo a experiência com todos os outros corpos veremos que todos eles dividem-se em dois grupos: uns comportam-se do mesmo modo que o vidro atritado com seda; outros, como o enxofre atritado com seda. Daí a distinção de duas espécies de eletricidade.

Arbitrariamente se chamou eletricidade positiva àquela que aparece no vidro atritado com seda; eletricidade negativa, àquela que aparece no enxofre atritado com seda.

#### 4: Eletricidade e magnetismo

O estudo dos fenômenos elétricos não pode ser separado do estudo de um outro grupo de fenômenos com os quais tem íntima ligação, chamados **fenômenos magnéticos** (porque são produzidos pelos ímãs, que também se chamam magnetos). Quase todos os autores dividem o estudo da eletricidade e do magnetismo nas seguintes partes:

**Eletrostática** - estuda os fenômenos provocados pela eletricidade em equilíbrio

**Eletrodinâmica** - estuda a eletricidade em movimento.

**Magnetismo** - estuda os fenômenos provocados pelos ímãs.

**Eletrromagnetismo** - estuda os fenômenos elétricos relacionados com os fenômenos magnéticos.

Nós dividimos este curso também nessas quatro partes

## 5: Processos de eletrização

Chama-se eletrização ao fenômeno pelo qual um corpo neutro passa a eletrizado. Os processos mais comuns para a obtenção da eletricidade estática são os seguintes.

### **1. Por atrito**

Foi o primeiro processo de eletrização conhecido. Quando duas substâncias de naturezas diferentes são atritadas, **ambas se eletrizam**.

### **2. Por indução**

Quando um corpo neutro é colocado próximo de um corpo eletrizado, sem que haja contato entre eles, **o corpo neutro se eletriza**. Esse fenômeno é chamado indução eletrostática.

O leitor que realizou as pequenas experiências que sugerimos até agora, já viu casos de eletrização por atrito e por indução. Assim, quando atritamos um pente, este se eletriza por atrito. Depois, quando aproximamos o pente eletrizado de pequenos pedaços de papel, o papel se eletriza por indução, e depois de eletrizado é atraído pelo pente ([veja Capítulo IV](#)).

### **3. Por contato**

Quando um corpo neutro é colocado em contato com um corpo eletrizado, por meio de um fio condutor, **o corpo neutro se eletriza**.

Um outro caso de eletrização por contato é o seguinte: quando duas substâncias de naturezas diferentes, ambas inicialmente neutras, são colocadas em contato durante muito tempo, com grande superfície de contato, ambas se eletrizarão. Este caso é mais difícil de ser observado, porque a eletrização de ambas é muito fraca.

### **4. Por aquecimento**

Certos corpos, quando aquecidos, eletrizam-se, apresentando eletricidades de nomes contrários em dois pontos diametralmente opostos. O fenômeno é

**Autor: Roberto A. Salmeron**

chamado fenômeno **piezoelétrico**. É mais comum em cristais, como por exemplo, na turmalina.

## 5. Por pressão

Certos corpos, quando comprimidos, eletrizam-se, apresentando eletricidades de nomes contrários nas extremidades. O fenômeno é chamado fenômeno piezoelétrico. Também é mais comum em cristais, como por exemplo, turmalina, calcita e quartzo.

Estudaremos em nosso curso a eletrização por atrito, por indução ([Capítulo IV](#)) e por contato ([Capítulo V](#)).

## 6: Princípios da eletrostática

Do mesmo modo que em qualquer outra parte da Física, o estudo da Eletrostática se baseia em certos **princípios fundamentais**, que são concluídos pela experiência, e que não tem demonstração teórica. Veremos inicialmente os dois seguintes.

### 1. Princípios da atração e repulsão

"Duas cargas elétricas de mesmo sinal se repelem, e de sinais contrários se atraem". Essa verdade só pode ser demonstrada experimentalmente: colocamos em presença, sucessivamente, corpos com cargas de mesmo sinal e sinais contrários, e observamos quais os sentidos das forças, conforme está esquematizado na figura 15. Mas, a melhor prova de que esse princípio é exato é que as consequências de sua aplicação são sempre verificadas experimentalmente.

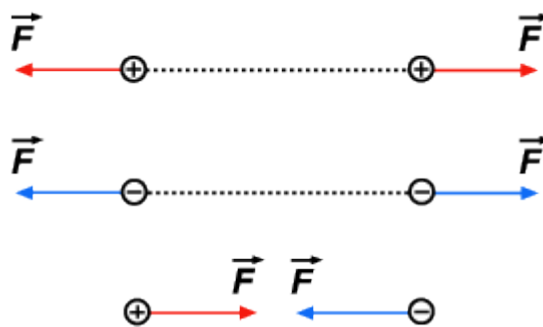


Figura 15

### 2. Princípio da conservação da energia

Este princípio que é um princípio geral para toda a Física, quando aplicado à eletricidade, é chamado, às vezes, "princípio da conservação da eletricidade",

**Autor: Roberto A. Salmeron**

ou mais precisamente "princípio da conservação da energia elétrica". É válido para um sistema isolado de corpos, e pode ser enunciado: "em um sistema isolado de corpos, a energia elétrica total é constante, desde que não haja transformação de energia elétrica para outras formas de energia". Com mais rigor esse princípio deve ser enunciado para a energia eletromagnética, e não para a energia elétrica somente.

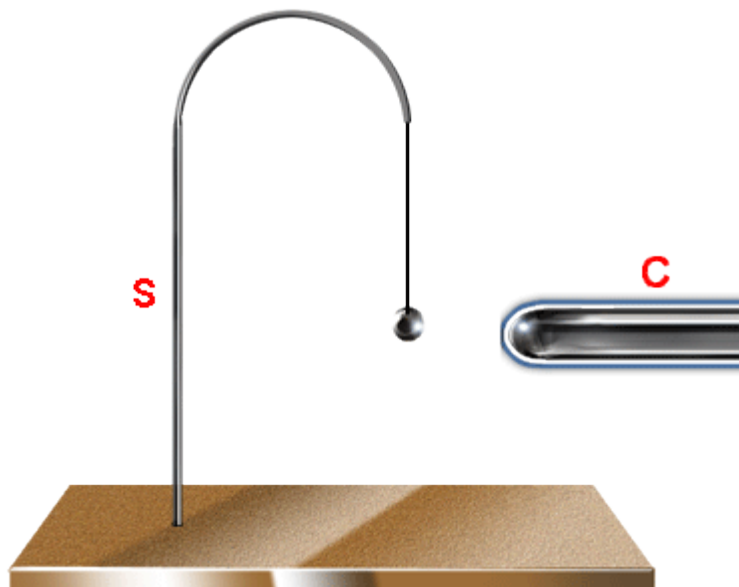
Dizemos que essas duas verdades são dois princípios fundamentais, porque não há nenhum raciocínio capaz de demonstrá-las. Nós observamos que elas acontecem na natureza e as tomamos como dois pontos de apoio, para os futuros raciocínios que vamos fazer em Eletrostática.

## 7: Eletroscópios

São instrumentos que servem para indicar se um corpo está ou não eletrizado. Existem vários tipos de eletroscópio.

### **Pêndulo elétrico**

É o mais simples de todos. É constituído de uma pequena esfera (de medula de sabugueiro, cortiça, etc.) suspensa por um fio de material mau condutor. Esse fio é preso a um suporte S (fig. 16). Para verificar se um corpo C está eletrizado, nós o aproximamos da esfera. Se o corpo estiver eletrizado, a esfera será atraída, entrará em contato com o corpo e depois será repelida. Se o corpo estiver neutro, a esfera permanecerá em repouso.





**Autor: Roberto A. Salmeron**

Figura 16

O pêndulo elétrico é usado somente em aulas de demonstração. As experiências indicadas nos parágrafos anteriores a respeito da atração e repulsão de corpos leves, etc. costumam ser feitas com o pêndulo elétrico. ([Veja a questão 12, nos exercícios propostos](#)).

Eletroscópio de folhas de ouro

É um dos mais usados. É constituído de uma haste h metálica, que é ligada na parte superior a uma esfera metálica E, e na parte inferior a duas folhas metálicas bastante delgadas a e b. As duas folhas são mantidas no interior de uma caixa metálica munida de uma janela de vidro (fig. 17). Para verificarmos se um corpo está eletrizado, colocamo-lo em contato com a esfera E. A esfera E, a haste h e as duas lâminas a e b, pelo contato, eletrizam-se com eletricidade do mesmo nome que a do corpo. Logo, as duas folhas a e b repelem-se. Esse eletroscópio nos permite conhecer o sinal da carga elétrica de um corpo. Para isso carregamos o eletroscópio com carga elétrica de sinal conhecido, por exemplo, positiva. Colocando em contato com a esfera E um outro corpo, se ele também estiver eletrizado positivamente a distância entre as folhas a e b aumentará. Se ele estiver carregado negativamente, a distância diminuirá. ([Veja a questão 13 no fim deste capítulo](#)).



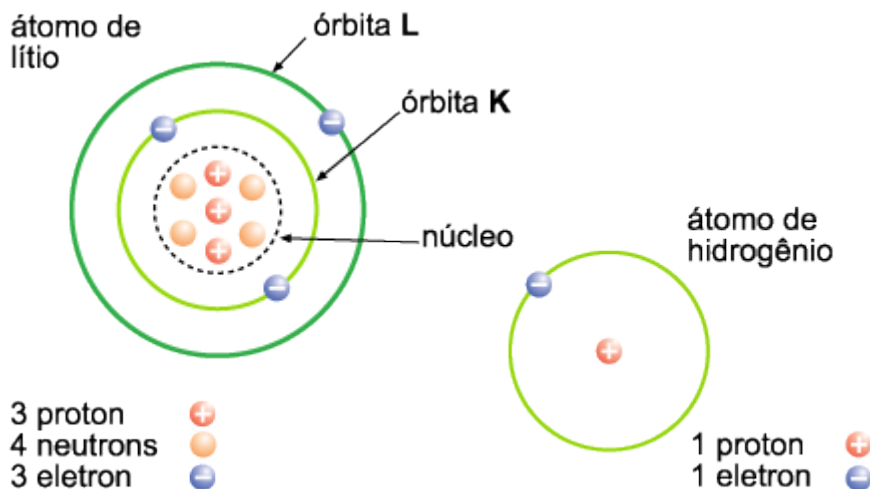
Quando estudarmos "indução eletrostática" veremos que não há necessidade de tocarmos com o corpo a esfera do eletroscópio nem a do pêndulo elétrico, para sabermos se ele está ou não eletrizado. Basta aproximarmos o corpo da esfera E do eletroscópio, ou do pêndulo ([ver Capítulo IV](#)).

## 8: Explicação do fenômeno de eletrização

Atualmente explicamos a eletrização dos corpos com a noção que temos da estrutura dos átomos. Qualquer fenômeno elétrico que observamos, como por exemplo, um pêndulo elétrico que oscila, as lâminas de um eletroscópio que divergem, um corpo que é atraído por outro, etc., na verdade é consequência de fenômenos atômicos.

Sabemos que os corpos são formados de moléculas, as moléculas são formadas de átomos, e os átomos de partículas, chamadas partículas fundamentais. As partículas fundamentais conhecidas até hoje são: elétron, ou negatron, próton, nêutron, elétron positivo ou pósitron, neutrino, fóton, méson leve positivo, méson leve negativo, méson pesado positivo, méson pesado negativo, méson pesado neutro, e mais várias outras partículas cujas propriedades são ainda mal conhecidas, pertencentes à família dos mésons.

Entre as partículas fundamentais são importantes para a explicação dos fenômenos elétricos o próton, o elétron e o nêutron. Os prótons e os nêutrons se encontram numa região do átomo chamada núcleo. Os elétrons ficam girando ao redor do núcleo, dispostos em várias órbitas. O átomo de hidrogênio, por exemplo, é o mais simples de todos: o seu núcleo é formado de um único próton, e ao redor do núcleo só há um elétron girando. O átomo de lítio tem o núcleo constituído por três prótons e quatro nêutrons; e tem três elétrons girando ao redor do núcleo, dispostos em duas órbitas: uma, mais próxima do núcleo, chamada órbita K, na qual giram dois elétrons; e outra, chamada órbita L, na qual gira um só elétron (fig. 18).



**Autor: Roberto A. Salmeron**

### Figura 18

Os prótons são partículas eletrizadas positivamente, e os elétrons, negativamente. A carga elétrica de um próton tem mesmo valor absoluto que a de um elétron. Como o número de elétrons de um átomo normal é igual ao número de prótons, o átomo é, no seu conjunto, normalmente neutro. (Um maior desenvolvimento sobre este assunto damos no último capítulo).

As teorias eletrônicas modernas admitem que nos corpos condutores, certo número de elétrons periféricos pode abandonar o átomo e se tornar elétrons livres. Por sua vez, os átomos que perdem elétrons tornam-se íons positivos. Os elétrons livres que abandonam um átomo podem entrar na coroa de um outro átomo que perdeu elétrons. Assim, nos corpos condutores, os elétrons livres formam um verdadeiro gás de elétrons, com grande mobilidade entre as moléculas. Um corpo eletrizado negativamente é um corpo cujos átomos receberam elétrons livres dos átomos de outro corpo, de maneira que fica um excesso de elétrons em relação aos prótons. Ao contrário, quando os átomos perdem elétrons, o corpo fica com excesso de prótons e se apresenta eletrizado positivamente.

De acordo com essa teoria os isolantes são corpos cujos átomos são constituídos e se acham ligados de tal modo que seus elétrons na quase totalidade não tem grande mobilidade, isto é, não podem tornar-se elétrons livres. Somente haverá elétrons livres se fizermos atuar forças externas ao corpo.

## 9: Eletrização por atrito

A eletrização por atrito tem duas características muito importantes.

**Autor: Roberto A. Salmeron**

1ª) Quando dois corpos são atritados, ambos se eletrizam: um positivamente e outro negativamente.

Uma experiência simples que revela esse fato é a seguinte: um disco de vidro é atritado com um disco de madeira enrolado em seda (fig. 19). Quando separados, o vidro apresenta eletricidade positiva e a seda, negativa. Se depois eles são postos em contato e separados, observaremos que se neutralizaram.

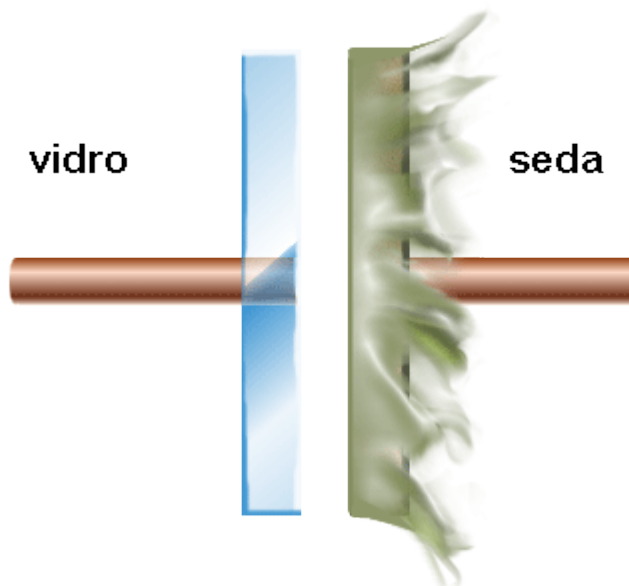


Figura 19

Essa experiência além de mostrar que ambos se eletrizam, mostra que a eletricidade positiva e a negativa foram desenvolvidas em quantidades iguais, porque quando em contato se neutralizaram.

2ª) Quando um mesmo corpo se eletriza por atrito com outros corpos, ele não adquire sempre eletricidade positiva, ou sempre negativa. Pode eletrizar-se positiva ou negativamente, de acordo com o outro corpo com o qual é atritado. A seda, por exemplo, atritada com vidro, eletriza-se negativamente; atritada com ebonite, eletriza-se positivamente. As substâncias da lista seguinte eletrizam-se positivamente quando atritadas com as substâncias que as seguem, e negativamente, quando atritadas com as que as precedem: pele de gato - vidro polido - marfim - lã - penas - madeira - papel - seda - goma laca - vidro despolido.

Baseado na explicação do fenômeno de eletrização, dada no capítulo *Explicação do Fenômeno de Eletrização*, como explica o leitor esta segunda característica da eletrização por atrito? Por exemplo, entre o marfim e a lã, qual dos dois tem mais tendência de perder elétrons?

**Autor: Roberto A. Salmeron**

## 10: Carga elétrica

Qualquer ciência está baseada em certos conceitos que não tem definição. Esses conhecimentos são adquiridos intuitivamente. São chamados "os conceitos primitivos" ou "as noções gerais" dessa ciência. Na Geometria, por exemplo, as noções gerais são as de: ponto, reta e plano. São esses os três conhecimentos básicos para o estudo da Geometria, e não tem definição. Na Mecânica, os conceitos primitivos são: o de comprimento, o de tempo e o de força. Significa que uma pessoa já deve possuir esses três conhecimentos para depois estudar Mecânica. Assim como uma pessoa já deve saber o que é um ponto, uma reta e um plano, para depois estudar Geometria. A Geometria se utiliza das noções de ponto, reta e plano, mas não ensina o que eles são.

Também em Eletricidade existem os conhecimentos primitivos. São os mesmos três da Mecânica (comprimento, tempo e força) e mais o de quantidade de eletricidade ou carga elétrica. Carga elétrica não tem definição. Mas apesar de não ter definição, pode ser medida. Para medirmos as cargas elétricas precisamos resolver dois problemas:

1º) estabelecer um critério que nos permita dizer quando duas cargas elétricas são iguais, ou quando uma é múltipla ou submúltipla da outra;

2º) escolher uma carga elétrica como unidade, com a qual se possa comparar todas as outras cargas elétricas.

### **Critérios de igualdade e multiplicidade**

Este critério será estabelecido para duas cargas elétricas puntiformes. Uma carga elétrica é chamada puntiforme quando podem ser desprezadas as dimensões do corpo que contém essa carga.

Suponhamos duas cargas elétricas puntiformes contidas em dois corpos 1 e 2. Para compará-las, imaginemos uma terceira carga puntiforme, auxiliar, contida em um corpo 3. A carga de 1 colocada à distância  $d$  da carga de 3, num certo meio, dará origem a uma força  $\vec{F}_1$  (de atração ou repulsão). A carga de 2, colocada à mesma distância  $d$  da carga 3, e, no mesmo meio, dará origem a uma força  $\vec{F}_2$ , (de atração ou repulsão). Podem acontecer dois casos relativamente aos módulos de  $\vec{F}_1$  e  $\vec{F}_2$  :

**Autor: Roberto A. Salmeron**

$$1^{\circ} \text{ caso: } c = \frac{a}{b}$$

$$2^{\circ} \text{ caso: } \frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2} = \dots = \frac{a_n}{b_n} = c$$

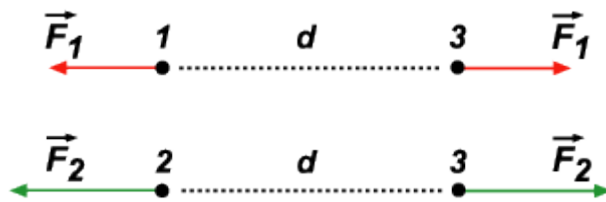


Figura 20

No primeiro caso dizemos que os corpos 1 e 2 possuem a mesma carga elétrica, ou a mesma quantidade de eletricidade. No segundo dizemos que o corpo 2 possui uma quantidade de eletricidade  $n$  vezes maior que a do corpo 1.

Representemos por  $Q_2$  e  $Q_1$  respectivamente essas quantidades de eletricidade. No  $1^{\circ}$  caso teremos  $Q_2 = Q_1$ . No  $2^{\circ}$  caso teremos  $Q_2 = n Q_1$ .

Esses critérios de igualdade e de multiplicidade consistem, portanto, em se considerarem as cargas elétricas como proporcionais às forças que elas podem exercer, pois eles dizem que, quando  $a = c.b$ , também

$$\frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2} = \frac{a_3}{b_3} = \dots = \frac{a_n}{b_n} = k$$

ou seja:

$$\frac{a}{b} = k$$

### Unidades de carga

Suponhamos que uma carga elétrica qualquer seja considerada a unidade de

**Autor: Roberto A. Salmeron**

carga elétrica, isto é, seja uma carga elétrica escolhida para ser comparada com todas as outras cargas. Comparando as outras cargas com essa unidade, por meio do critério já fixado, nós mediremos essas outras. Assim, por exemplo, se considerarmos  $Q_1 = 1$  nós poderemos medir  $Q_2$ . No 1º caso teremos  $Q_1 = Q_2$ , e, portanto,  $Q_2 = Q_1$ . No 2º caso, teremos  $Q_2 = n.1$ , e, portanto,  $Q_2 = n$ . A carga elétrica do corpo 2 ficará então medida pelo número 1 ou n.

No capítulo [Unidades de Carga Elétrica](#) veremos como se escolhe a unidade de carga elétrica nos sistemas de unidades usuais.

## 11: [Leis da atração e repulsão](#)

A força de atração ou repulsão que atua em duas cargas elétricas puntiformes em presença obedece a duas leis.

### 1ª Lei

Suponhamos duas cargas elétricas puntiformes  $Q_1$  e  $Q_2$ , colocadas em certo meio e separadas pela distância  $d$  (fig. 21). As cargas elétricas sendo proporcionais às forças que exercem concluímos que a força  $\vec{F}$  tem módulo proporcional a  $Q_1$  e  $Q_2$  ao mesmo tempo. Logo, o módulo de  $\vec{F}$  é proporcional ao produto  $Q_1 \cdot Q_2$  ([ver Introdução](#)). É a primeira lei: "a intensidade da força que atua em duas cargas elétricas puntiformes é proporcional ao produto dessas cargas".

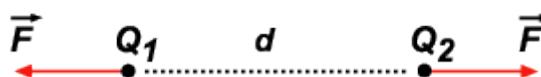


Figura 21

### 2ª Lei

Enquanto que a 1ª lei é uma consequência direta do critério usado para a medida das cargas, a 2ª lei é puramente experimental. Foi descoberta por **Coulomb**, que a demonstrou experimentalmente. É a seguinte: "a intensidade da força que atua em duas cargas elétricas puntiformes é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as duas cargas".

**Autor: Roberto A. Salmeron****12: Fórmula de Coulomb**

As duas leis precedentes podem ser expressas por uma única fórmula. De acordo com a primeira lei,  $\vec{F}$  é diretamente proporcional a  $|Q_1| \cdot |Q_2|$ . De acordo com a segunda lei,  $\vec{F}$  é inversamente proporcional a  $d^2$ , isto é, diretamente proporcional a  $1/d^2$ . Logo,  $\vec{F}$  é diretamente proporcional ao produto  $a = c \cdot b$ . Significa que:

$$s_1 = s \cdot \cos.a \text{ (constante)}$$

ou

$$\frac{S}{R^2} = \frac{S'}{R'^2} = \frac{S''}{R''^2} = \dots = \omega$$

Essa é a fórmula de Coulomb.

A constante é chamada constante dielétrica, ou poder indutor específico, ou permissividade do meio em que estão as cargas. Ela depende das unidades escolhidas e do meio. Que o valor numérico de  $\epsilon$  dependa das unidades escolhidas, isso era de se esperar, pois o valor numérico de qualquer constante física depende das unidades. Assim, por exemplo, o valor numérico da aceleração da gravidade em São Paulo é 978,622 se usarmos o sistema CGS, e 9,78622 se usarmos o MKS; a massa específica da água é  $1g/cm^3$ , isto é, no sistema CGS, e  $1kg/m^3$ , isto é, no MKS. Veremos no próximo parágrafo que a constante dielétrica do vácuo vale 1 no sistema CGS e  $1/9 \cdot 10^9$  no MKS. O fato de a constante dielétrica variar de meio para meio tem o seguinte significado físico: se duas cargas iguais forem colocadas a igual distância sucessivamente em meios diferentes, a força que atuar nelas terá um valor diferente para cada meio. Por exemplo, a constante dielétrica da água é 80 vezes maior que a do ar; concluímos que duas cargas elétricas, quando situadas no ar à distância  $d$ , exercem entre si uma força 80 vezes maior que quando estão na água à mesma distância  $d$ .

Algumas vezes se escreve a fórmula de Coulomb sob forma algébrica. Nesse caso,  $Q_1$  e  $Q_2$  são escritos com seus sinais. Sendo  $\epsilon$  e  $d^2$  sempre positivo, o



**Autor: Roberto A. Salmeron**

sinal do segundo membro da fórmula depende do sinal do produto  $Q_1 \cdot Q_2$ . Quando e tem mesmo sinal, o produto  $Q_1 \cdot Q_2$  é positivo, e portanto, a força é positiva; esse caso corresponde a uma repulsão, porque  $Q_1$  e  $Q_2$  tem o mesmo sinal. Quando  $Q_1$  e  $Q_2$  tem sinais opostos, o produto  $Q_1 \cdot Q_2$  é negativo, e, portanto, a força é negativa; esse caso corresponde a uma atração, porque  $Q_1$  e  $Q_2$  tem sinais opostos. Considerando-se os sinais, a fórmula fica:

$$w = \frac{S}{R^2}$$

### 13: Unidade de carga elétrica

Atualmente são usados dois sistemas de unidades em eletricidade: o CGS e o MKS, também chamado sistema MKSO ou sistema Giorgi. O sistema CGS acha-se dividido em dois sistemas: o CGS eletrostático (CGSES), que abrange as unidades eletrostáticas e eletrodinâmicas; e o CGS eletromagnético (CGSEM), que abrange as unidades magnéticas e eletromagnéticas. O sistema Giorgi estende-se pela eletrostática, eletrodinâmica, magnetismo e eletromagnetismo. Veremos que o sistema Giorgi é muito mais bem estruturado que o CGS. Em eletrostática estudaremos o sistema CGSES e o MKS.

#### **a. Sistema CGSES**

Sabemos que os sistemas coerentes têm as unidades divididas em dois grupos: fundamentais e derivadas. As unidades fundamentais são aquelas definidas arbitrariamente, isto é, sem qualquer dedução matemática. Pelo fato de serem arbitrárias, essas unidades devem sempre ser representadas por padrões. É o que acontece, por exemplo, com o metro, o quilograma e o segundo. Assim como o metro é a "distância, a 0°C, entre dois traços marcados numa barra de platina iridiada"; ele poderia ter sido uma outra distância qualquer; essa definição é arbitrária, não tem nenhuma justificação matemática, nem lógica. E, a própria barra de platina que serviu para definir o metro, automaticamente fica sendo o padrão do metro.

As unidades derivadas são aquelas definidas matematicamente, depois de escolhidas as fundamentais; não são mais arbitrárias. Assim, por exemplo, depois de escolhido o metro como unidade de comprimento, e o segundo como unidade de tempo, podemos definir como unidade de velocidade o metro por

**Autor: Roberto A. Salmeron**

segundo: é a velocidade de um móvel, que, em movimento retilíneo e uniforme, percorre um metro durante um segundo. Essa é, portanto, uma unidade derivada. E ela não precisa ser representada por nenhum padrão, pois uma vez sabido o que é o metro e o que é o segundo, ninguém terá dúvidas sobre o que seja o metro por segundo.

Os sistemas de unidades mecânicas tem sempre três unidades fundamentais. Mas, não é possível construir-se um sistema de unidades elétricas exclusivamente com as três unidades fundamentais da Mecânica, porque em Eletricidade aparecem grandezas novas, que a Mecânica não possui. Em Eletricidade precisamos, além das unidades mecânicas, de mais uma unidade fundamental (arbitrária) característica de fenômenos elétricos.

O sistema CGSES adota para unidade elétrica fundamental a unidade de constante dielétrica. Considera arbitrariamente a constante dielétrica do vácuo igual à unidade ( $\epsilon = 1$ ).

Tendo-se a unidade de constante dielétrica, a partir da fórmula de Coulomb se deduz a unidade de carga elétrica. Basta impor as quatro condições seguintes:

$$\frac{l}{R} = a \quad \text{Resulta: } Q_1 = 1 \text{ e } Q_2 = 1$$

Portanto: "a unidade de carga elétrica no sistema CGSES é a carga elétrica puntiforme que, colocada no vácuo a um centímetro de outra carga elétrica puntiforme igual, exerce sobre esta a repulsão de um dine". Essa unidade é chamada franklin, ou statcoulomb, ou unidade CGSES de carga elétrica. Os símbolos correspondentes são: f, statc, ues CGSq ou u CGSESq. Quando não há possibilidade de confusão, pode-se escrever simplesmente ues.

Sendo

$$l = a.R ,$$

a unidade de no sistema CGSES pode ser indicada de duas maneiras. Uma é:

$$S=4\pi R^2 .$$

Outra é simplesmente ues CGS  $\epsilon$ . Na tabela abaixo estão os valores de algumas constantes dielétricas.

**Autor: Roberto A. Salmeron**

Vácuo	1,0000 (por definição)
Ar a 0°C e pressão normal	1,0006
Hidrogênio, a 0°C e pressão normal	1,0003
Ebonite	2,7
Vidro (varia com o tipo de vidro)	5,4 a 9,9
Álcool etílico	28,4
Água	81,1

Constantes dielétricas, em  $\omega = \frac{S}{R^2} = \frac{4\pi R^2}{R^2}$

### b. Sistema MKS

Este sistema tem uma estrutura diferente do CGS. Além de outras, uma crítica muito séria que se pode fazer ao sistema CGSES é o fato dele adotar a constante dielétrica do vácuo como unidade fundamental. Ora, uma unidade fundamental, sendo arbitrária, deve ser representada por um padrão. Precisaríamos então, adotar um padrão de vácuo. E essa operação é impossível. No Capítulo VI, em Eletrodinâmica, estudaremos como são escolhidas as unidades do sistema MKS. Ao contrário do CGSES, ele não se inicia com unidades eletrostáticas, mas com unidades eletrodinâmicas.

Por enquanto nos limitaremos a dizer que a unidade de carga elétrica do sistema MKS chama-se Coulomb. A sua definição veremos mais tarde. O símbolo é a letra c. A relação entre o c e a ues CGSq é:

$$1c = 2,99592 \cdot 10^9 \text{ ues CGSq}$$

Na prática aproximamos para:

$$1c = 3 \cdot 10^9 \text{ ues CGSq}$$

### c. Valor de para o vácuo no sistema MKS

Na fórmula de Coulomb consideremos:

**Autor: Roberto A. Salmeron**

$$Q_1 = Q_2 = 1 \text{ ues CGSq}$$

$$d = 1 \text{ cm}$$

$$F = 1 \text{ d}$$

Resulta:

$$\omega = 4\pi \text{ esferidianos}$$

ou

$$\omega = \frac{S}{R^2}$$

No sistema MKS a unidade de força é o newton (símbolo N) e a unidade de distância é o metro. Sabemos que:

$$S = S_1 \cdot \cos a$$

Substituindo no valor de  $\varepsilon$ , temos:

$$S = \cos a$$

ou

$$\omega = \frac{S_1 \cdot \cos a}{R^2}$$

Concluimos então que para o vácuo, a constante dielétrica vale 1 no sistema CGSES e no MKS. Como consequência, se a constante dielétrica de um determinado meio valer  $n$  no sistema CGSES, no MKS valerá

$$\overline{AF}^2 = \overline{AB}^2 + \overline{BF}^2 - 2\overline{AB} \cdot \overline{BF} \cdot \cos \hat{B}$$

## 14: Uma máquina eletrostática simples

Chama-se máquina eletrostática a qualquer dispositivo capaz de produzir eletricidade estática. Um tipo simples, que utiliza a eletrização por atrito, é o que está esquematizado na figura abaixo. Um disco de vidro tem uma manivela adaptada ao centro, com a qual pode ser colocado em rotação. Uma peça P de

**Autor: Roberto A. Salmeron**

madeira, em forma de U, é internamente revestida de couro seco, que fica bem apertado ao disco. Quando o disco gira, o vidro, atritando-se com o couro, perde elétrons e se eletriza positivamente. Esses elétrons perdidos pelo vidro passam para o couro, que se eletriza negativamente. O couro, através de uma barra metálica, acha-se em contato com um cilindro C também metálico, e vai passando os elétrons para o cilindro, que os vai acumulando, carregando-se, portanto, negativamente.

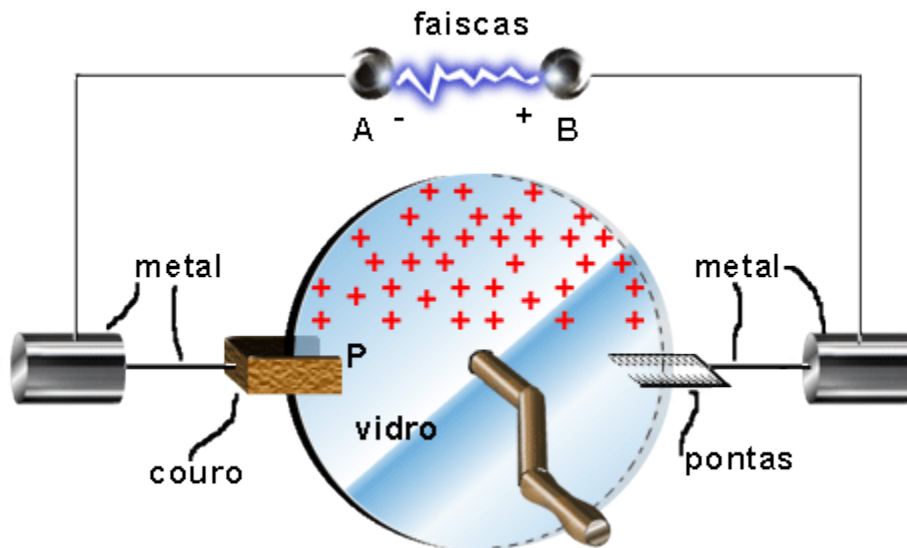


Figura 22

Diametralmente oposta à peça de couro acha-se uma peça com muitas pontas metálicas. Essas pontas, através de uma haste metálica, estão em contacto com um cilindro D metálico. A parte do vidro que já passou pelo couro, acha-se eletrizada positivamente, e quando passa em frente às pontas, rouba elétrons dessas pontas e se neutraliza outra vez. Na figura 22 o semicírculo superior de vidro está sempre eletrizado positivamente, e o semicírculo inferior está sempre neutro. Quando as pontas perdem elétrons, o cilindro D fornece

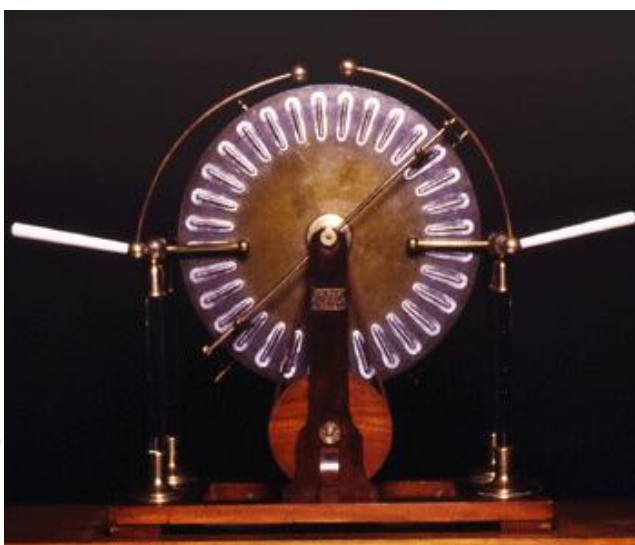


Figura de uma máquina eletrostática

**Autor: Roberto A. Salmeron**

novos elétrons a elas. Então o cilindro D vai acumulando carga elétrica positiva. Os cilindros C e D chamam-se os "terminais", ou os "polos" da máquina eletrostática.

Se os dois cilindros estiverem ligados por barras metálicas a duas esferas metálicas A e B, essas esferas vão acumulando, cada vez mais, cargas de sinais opostos. Então, depois de um certo número de revoluções do cilindro, saltará uma faísca entre as duas esferas.

No [Capítulo IV](#) voltaremos a tratar das máquinas eletrostáticas. Mas, quisemos já aqui descrever esse tipo extraordinariamente simples, para aconselhar ao leitor que construa uma dessas máquinas com os elementos de que dispõe em sua própria casa. O disco deve ter uns 15 a 20 centímetros de raio, mas, se não tiver um disco de vidro, pode usar um disco de ebonite, ou de matéria plástica (muito comum em brinquedos); os cilindros C e D podem ser duas latas vazias, de uns dez centímetros de altura, as hastes metálicas podem ser de arame grosso, e as pontas metálicas podem ser alfinetes. O leitor que tiver a iniciativa de construir uma dessas máquinas terá oportunidade de realizar uma série de pequenas experiências muitíssimo úteis, como por exemplo, carregar um corpo com carga positiva ou negativa, carregar eletroscópios, ver escoamento de eletricidade para a terra, carregar condensadores, etc.. Essa maquinazinha funcionará muito melhor num ambiente seco, porque como o ar úmido é condutor, as cargas dos cilindros e das esferas vão se escoando para o ar, e não se chega a acumular muita carga neles.

## 15: Como são evitados alguns perigos da eletricidade estática

Nas tecelagens e nas fábricas de papel onde o papel é fabricado em rolos (como papel de jornal), quando o tecido ou o papel passa ao redor de rolos metálicos se gera carga elétrica. Essa carga pode produzir faíscas, que dão lugar a incêndios. Para evitar isso, se umedece o ar, nesses lugares, de maneira que se formam filmes de umidade sobre as superfícies, filmes esses que vão retirando as cargas elétricas.

Quando a gasolina é transportada em caminhões, o chacoalhar da gasolina,

**Autor: Roberto A. Salmeron**

fazendo com que ela se atrite com as paredes do caminhão, pode gerar carga elétrica. Quando uma pessoa toca com as mãos a válvula para descarregar a gasolina, pode saltar uma faísca que produzirá a combustão do vapor de gasolina. Para evitar isso, esses caminhões mantêm uma corrente metálica se arrastando no chão. Essa corrente conduz para a terra qualquer carga elétrica que se possa gerar.

Nos lugares muito secos, isto é, onde há pouco vapor d'água no ar, é perigoso limpar-se roupa atritando-a com um pano embebido em gasolina, porque o atrito pode gerar cargas elétricas, que podem dar faíscas, que por sua vez podem incendiar os vapores de gasolina.

## 16: Nota histórica

Desde que começaram os estudos de Eletrostática, os homens se preocuparam por saber qual seria a natureza da eletricidade. A primeira teoria a esse respeito foi formulada por Benjamin Franklin, e é conhecida como teoria do fluido único. Admitia que todo corpo possuísse certa quantidade de um fluido indestrutível, associado à matéria em maior ou menor quantidade. Um corpo em estado neutro teria uma quantidade desse fluido elétrico que era chamada a quantidade normal de fluido para esse corpo. Se o corpo tivesse excesso desse fluido estaria eletrizado positivamente. Se tivesse falta, estaria eletrizado negativamente. Para explicar as atrações e repulsões entre os corpos eletrizados admitia que as partículas que constituem a matéria se repeliam umas com as outras, e atraíam o fluido elétrico. A eletrização por atrito entre os dois corpos era explicada pela passagem de fluido de um corpo a outro.

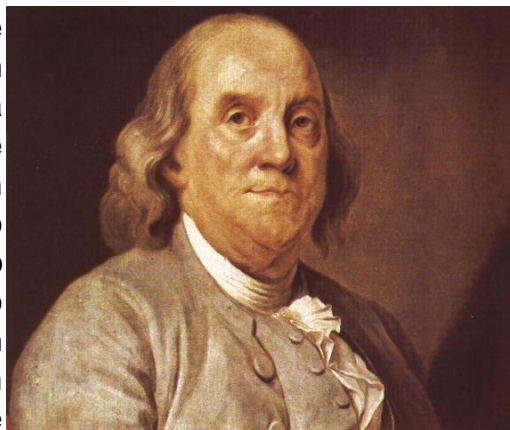


Figura de Benjamin Franklin

Posteriormente se criou a teoria dos dois fluidos. Consistia em admitir que em todos os corpos existissem, em quantidades praticamente ilimitadas, dois fluidos elétricos: um positivo, outro negativo. Os fluidos de mesma espécie se repeleriam, e os de espécies diferentes se atrairiam. Um corpo estaria

***Autor: Roberto A. Salmeron***

eletrizado positiva ou negativamente de acordo com o excesso de um fluido sobre o outro.

As idéias atuais a respeito da eletricidade só puderam surgir depois que os físicos começaram a desconfiar da existência do elétron, em fins do século passado, e pouco tempo depois vieram a confirmar a sua existência.

"Atualmente, tomando como ponto de partida que os elétrons e os prótons são partículas materiais dotadas de carga elétrica, nós conseguimos explicar quase a totalidade dos fenômenos elétricos conhecidos. Apesar disso existe uma verdadeira lenda entre os leigos de que "não sabemos nada a respeito da eletricidade". Essa idéia é falsa, e é tremendamente prejudicial para os principiantes, que passam a considerar a eletricidade como uma coisa um tanto misteriosa e um tanto perigosa. Não estamos querendo afirmar aqui que os físicos já sabem tudo a respeito da eletricidade. Não, porque há muitos e muitos fatos que ainda não foram explicados. Por exemplo, não sabemos até hoje porque os elétrons têm carga elétrica, porque o próton tem carga elétrica, como a atração entre prótons e elétrons no átomo se combina com a atração gravitacional (devida às massas mecânicas deles), não sabemos explicar bem porque certas substâncias são condutoras quando a eletricidade passa num sentido e são isolantes quando a eletricidade passa em sentido oposto, e muitos outros fatos. Mas não é porque ignoramos muita coisa que vamos passar a olhar a eletricidade assim meio de esquelha, e a não acreditar em fatos se passam diante de nós todos os dias. Em qualquer parte de qualquer ciência existem e sempre existirão muitos e muitos fatos que o homem não sabe explicar. E são exatamente esses fatos que puxam a ciência para a frente.