

# Motor Eletrostático: Conversão de Energia Eletrostática em Trabalho mecânico.



Aluno: Thiago de Freitas Viscondi. RA: 025270

Orientador: Prof. Richard Landers.

Coordenador do curso: Prof. José J. Lunazzi.

Disciplina: F-809, Instrumentação para o Ensino, 1<sup>o</sup> semestre, 16/06/06.

## Conteúdo:

1- Resumo .....	3
2- Introdução .....	3
2.1-Diferenças entre os motores elétricos. ....	6
2.2- Quais são as vantagens e desvantagens do Motor Eletrostático? .....	7
2.3- Motores duais eletromagnéticos. ....	7
3- Como o motor eletrostático funciona (detalhadamente)? .....	8
4- Construção do motor eletrostático. ....	10
4.1- Material. ....	11
4.2- Procedimento. ....	11
5- Gerador com tubo de PVC. ....	13
5.1- Garrafa de Leyden. ....	13
5.2- Funcionamento do gerador com cano de PVC. ....	15
5.2- Construção do gerador por atrito com tubo de PVC e Garrafa de Leyden. .	16
6- Conclusão do Projeto. ....	18
6.1- Comentários do coordenador da disciplina.....	19
7- Referências Comentadas. ....	20
8- ANEXOS. ....	21

## **1- Resumo:**

Neste projeto construímos um motor eletrostático feito de materiais de uso doméstico, como papel alumínio e garrafas plásticas. Este motor é um instrumento pedagógico excelente para ilustrar as forças de repulsão e atração de cargas elétricas e conversão de energia eletrostática em trabalho mecânico; pois, além de tornar estes efeitos claramente visíveis, é também um experimento de grande beleza.

Quando ligamos a TV, aproximamos nossa mão de sua tela e sentimos formigamento ou quando esfregamos em nossos cabelos uma bexiga de borracha e com ela conseguimos atrair pedaços de papel, estamos vendo manifestações de forças de origem eletrostática, ou seja, de cargas elétricas encontradas nestes materiais.

A pergunta é: Podemos usar estas cargas e estas forças para criar um motor? A resposta é sim! O motor eletrostático, diferentemente de outros motores elétricos, como os dos liquidificadores ou dos carrinhos de brinquedo à pilha, funciona utilizando estas forças de atração e repulsão entre as cargas elétricas e pode funcionar até mesmo com a famosa energia eletrostática da sua TV ou da bexiga esfregada em seus cabelos.

Hoje, estes motores se tornam muito importantes na ciência com os avanços da nanoeletrônica (eletrônica feita em dimensões de um bilionésimo de metro) e com a necessidade de encontrarmos novas fontes de energia que não gere poluição. Como exemplo de fonte de energia, temos nossa atmosfera, que está repleta de corpos ionizados (com carga elétrica total não nula), como podemos ver com o fenômeno dos relâmpagos.

Também construímos, com materiais comuns, um capacitor (garrafa de Leyden) e carregamos este capacitor utilizando o atrito entre um tubo de PVC e uma flanela. Este conjunto, que chamamos de “Gerador de tubo de PVC”, foi uma tentativa de criar também com materiais domésticos uma fonte de energia para o motor eletrostático. Infelizmente, o potencial elétrico gerado desta maneira foi inferior aos 10kV necessários ao funcionamento do motor.

## **2- Introdução:**

O motor eletrostático foi criado por Benjamin Franklin em 1748 (figura 1). Que utilizou garrafas de Leyden carregadas (capacitores) para atrair e repelir esferas metálicas ligadas por hastes não condutoras a um eixo que permite que elas girem livremente. [5]

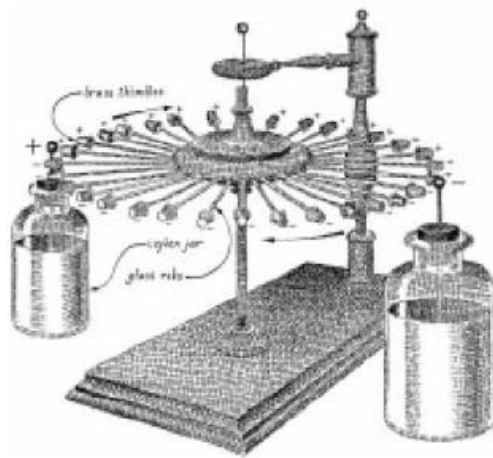


Figura 1 – Motor eletrostático de Franklin.

Motores mais potentes desde então já foram construídos. Chamado de motor de descarga de corona, figura 2, foi criado por Oleg D. Jefimenko, conhecido professor e pesquisador na área do eletromagnetismo.

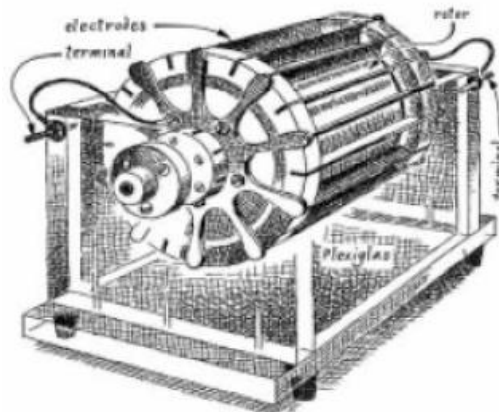


Figura 2 – Motor eletrostático de Jefimenko.

Hoje em dia temos dois grandes motivos para a pesquisa dos motores eletrostáticos. Primeiramente, estes motores são fundamentais com o advento da tecnologia da nanoeletrônica, pois eles podem ser construídos nesta escala ( $10^{-9}$ m) e assim podendo fazer parte de um mecanismo muito complexo, mesmo que muito diminuto. [6]

Nos anos 80, já eram realidade os MEMS, sigla para *Micro-Electrical-Mechanical Systems*, ou micro-sistemas eletromecânicos, ou seja, motores eletrostáticos da ordem de  $50.10^{-6}$  m comparáveis ao tamanho de células sanguíneas, figura 3.

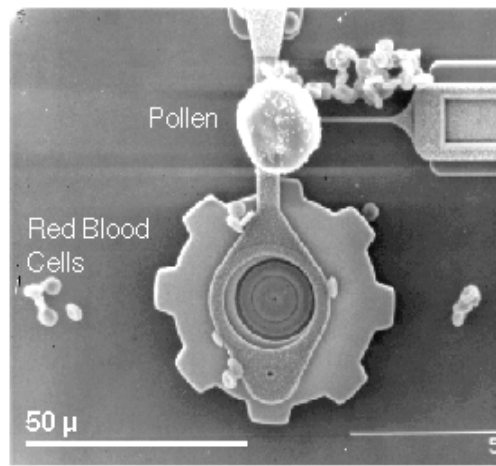


Figura 3 – MEMS, motor da ordem de micrômetros.

Um motor eletrostático de 500nm já foi criado em 2003 por Alex Zettl, físico de Berkeley, figura 4. Ele possui rotor de ouro e eixo de rotação feito de um nanotubo de carbono. Estima-se que ele gire a centenas milhões de rotações por segundo, mas como os mais poderosos microscópios eletrônicos podem somente fazer 30 imagens por segundo é ainda impossível saber sua velocidade exata ou mesmo saber se ele está girando ou apenas oscilando.

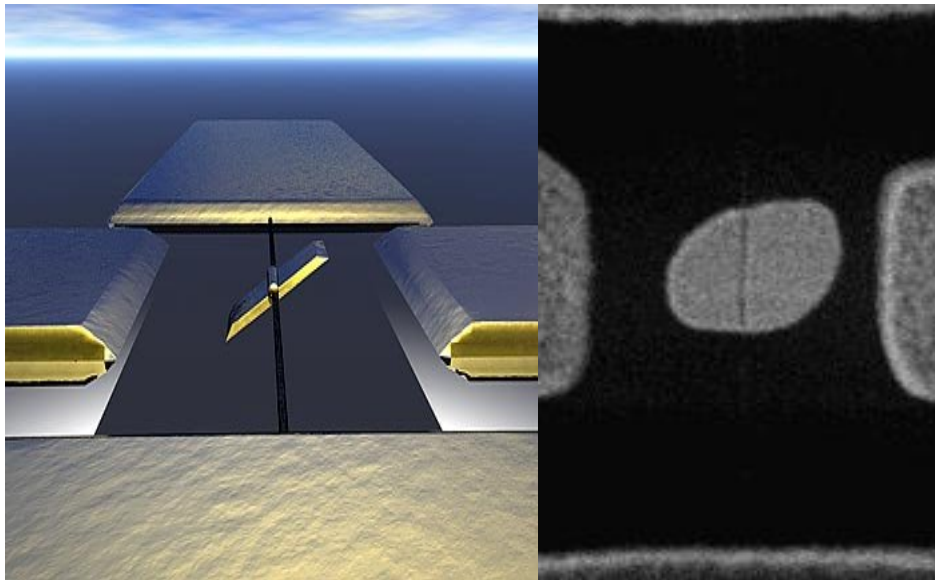


Figura 4 – Idealização (à esquerda) e realização (à direita) do Nanomotor eletrostático.

Outro grande motivo é que com estes motores podemos aproveitar uma fonte limpa e ainda não explorada de energia: A atmosfera da Terra. Sabe-se que entre o solo e a ionosfera existe uma grande diferença de potencial de 360.000 volts. Em todo globo poderíamos retirar uma potência equivalente a 1 bilhão de kW da atmosfera para o uso humano. É fato também que a cada metro de altura a partir do solo o potencial aumenta 100V em dias secos e até 1000V em dias chuvosos. Os efeitos desta diferença de potencial são muito visíveis nos dias chuvosos, os relâmpagos! Conclusão, podemos ligar um motor

eletrostático ligando-se um terminal do motor ao solo e outro a um balão, pipa ou antena colocada em grandes alturas.

Franklin já sabia tudo isto quando inventou o motor eletrostático, assim como sabia que as correntes que podemos obter pela atmosfera são contínuas e da ordem de microamperes, mais que suficiente para seu motor.

## 2.1-Diferenças entre os motores elétricos.

Os motores conhecidos popularmente como motores elétricos, são na verdade motores magnetostáticos. Ou seja, ele funciona, resumidamente, fazendo-se passar corrente elétrica alternada por uma bobina e nesta é gerada um dipolo magnético, o qual interagindo com um campo magnético externo faz a bobina girar. Logo, apenas inspecionando as equações matemáticas que regem este fenômeno, vemos que a potência do motor é diretamente proporcional a corrente elétrica aplicada na bobina.

$$P = \frac{d}{dt}(-\vec{M}_H \cdot \vec{H}) \quad (1)$$

Nas equações ao lado "P", a potência é a derivada no tempo, da energia do dipolo magnético, " $\vec{M}_H$ ", no campo magnético externo " $\vec{H}$ ". (1)

$$\vec{M}_H = NIA\hat{n} \quad (2)$$

O dipolo magnético é dado pelo número de espiras da bobina, "N", a corrente que passa por ela "I" e "A" é a área da espira,  $\hat{n}$  é o versor perpendicular à espira, com o sentido dado pela "regra da mão direita" orientada pelo sentido da corrente.(2)

Já o motor eletrostático tem sua potência diretamente proporcional à diferença de potencial aplicada em seus terminais.

Como o motor funciona devido ao princípio de atração de cargas elétricas de sinais opostos e repulsão de cargas elétricas de mesmo sinal, quando colocamos altos potenciais nas partes metálicas do motor eletrostático, carregamos eletricamente com cargas positivas um dos terminais do motor e negativas o outro. A quantidade destas cargas nos terminais do motor é proporcional à diferença de potencial aplicada por  $\Delta V \cdot C = q$ , ou seja a carga do sistema,  $q$ , é diretamente proporcional a diferença de potencial,  $\Delta V$ , sendo a constante de proporcionalidade,  $C$ , a capacitância do sistema. E, por fim a força aplicada no motor é diretamente proporcional à quantidade destas cargas pela lei de Coulomb:

$$\vec{F}_1 = -\frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad (3)$$

" $F_1$ " a força na carga 1 " $q_1$ " devido à carga 2, " $q_2$ ", inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas " $r$ ",  $\epsilon$  é a permissividade elétrica do meio. E  $\hat{r}$  é o versor que aponta da carga 1 para carga 2, na direção que une as cargas. (3)

Logo, vemos que os motores magnetostáticos e eletrostáticos são duais eletrônicos, ou seja, enquanto para aquele a variável de interesse é a corrente elétrica, neste a variável

de interesse é a voltagem ou diferença de potencial. Outros exemplos de duais eletrônicos são os pares indutor/capacitor e condutância/resistência. [4]

Como a potência do motor magnetostático é diretamente proporcional à magnitude da corrente aplicada estes motores dependem de altas correntes e não necessitam de grandes tensões para funcionar. Já os motores eletrostáticos dependem de altas tensões e não necessitam de grandes correntes. Isto explica porque os eletrodomésticos utilizam motores magnetostáticos; pois, em nossas casas possuímos fontes de baixa tensão (nas tomadas). Tensões de 220V ou 110V, são muito menos que o necessário para rodar motores eletrostáticos, os quais necessitam de diferenças de potencial da ordem de 10KV (tensão próxima das encontradas nos fios dos postes elétricos).

## **2.2- Quais são as vantagens e desvantagens do Motor Eletrostático?**

Como explicado na subseção anterior, os motores eletrostáticos necessitam de alta voltagem para funcionar. Altas voltagens são muito perigosas para o uso comum humano, apresentando risco de morte (por este motivo não temos tomadas fornecendo 10KV em nossas casas). Logo, os motores eletrostáticos não podem ser facilmente utilizáveis domesticamente. Fontes de energia eletrostática, como exemplo geradores de Van de Graff e tubo de PVC, podem produzir diferenças de potencial bastante altas, mas com correntes contínuas bastante baixas, tornando-os bastante seguros, infelizmente o funcionamento deste geradores é bastante prejudicado pela umidade do ar, que facilita correntes de fuga e assim não havendo acúmulo de carga.

Mas os motores eletrostáticos possuem duas vantagens muito interessantes já citadas. Primeiramente, é possível criá-los em escala de nanômetros. Segundo, podemos aproveitar a diferença de potencial da atmosfera como fonte de energia. Estima-se que a cada metro que subimos o potencial da atmosfera sobe 100V.

## **2.3- Motores duais eletromagnéticos.**

Além de duais eletrônicos, os motores eletrostáticos e magnetostáticos, são duais eletromagnéticos, ou seja, enquanto neste os campos de interesse são magnéticos, nos motores eletrostáticos os campos de interesse são os campos elétricos.

Campos elétricos são gerados basicamente por cargas elétricas, enquanto campos magnéticos são gerados basicamente por correntes elétricas (excetuando variação no fluxo dos campos). Quando falamos em efeitos eletrostáticos, estamos nos referindo aos campos

elétricos gerados por cargas elétricas que não se movem com o tempo (em relação ao referencial observando os campos). Enquanto falamos em efeitos magnetostáticos, falamos em campos magnéticos gerados por correntes elétricas que não se alteram no tempo.

Normalmente a intensidade dos campos elétricos encontrados nos laboratórios e na natureza é bem maior que dos magnéticos. Na maioria dos casos os campos magnéticos só possuem papel importante quando os elétricos não estão presentes. Isto pode acontecer facilmente já que a matéria no universo na maioria das vezes neutra, ou seja, possui o mesmo número de cargas positivas e negativas. As correntes elétricas na afiação doméstica, por exemplo, são neutras, as correntes são geradas pela movimentação das cargas negativas (elétrons) presentes na matéria, mas não são gerados campos elétricos já que para cada carga negativa nos fios, há uma carga positiva (próton) tornando o fio como um todo neutro.

### 3- Como o motor eletrostático funciona (detalhadamente)?

Eletrostática é o ramo da física que estuda os campos elétricos e forças elétricas gerados por cargas elétricas estacionárias. Praticamente toda eletrostática esta resumida na equação (3) acima, a Lei de Coulomb, que é uma expressão para a força elétrica entre duas cargas pontuais.

O motor eletrostático é composto de dois “estatores”, que são ligados à fonte de alta tensão e se carregam eletricamente; um “rotor” que fica entre os estatores e é a parte livre para girar do motor e, por fim, duas “escovas” que são os entes que transferem cargas entre os estatores e o rotor. A figura a seguir ilustra bem todo o processo.

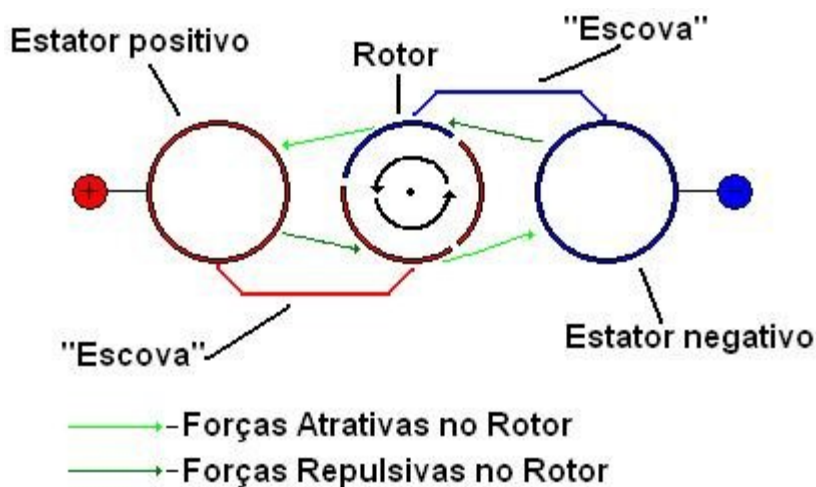


Figura 5 – Esquema de funcionamento do motor eletrostático.



Os estatores estão fixos na base do motor. Eles serão carregados eletricamente em uma fonte de alta tensão qualquer. Um estator fica carregado positivamente (vermelho), o outro negativamente (azul). Note que todo o estator é carregado com o mesmo sinal de carga.

Já o rotor possui três partes distintas isoladas eletricamente. As “escovas” transferem cargas de um dos estatores para uma destas três partes. As “escovas” estão ligadas aos estatores, mas não diretamente ao rotor, ou seja, elas não se encostam ao rotor. A carga é transferida através de uma faísca, muito comum em experimentos com alta voltagem, ou seja, há a ionização do ar pela alta tensão e o ar, tratado até agora como isolante, se torna condutor nesta região, sendo rompida sua rigidez dielétrica.

Quando as “escovas” transferem parte da carga dos estatores para uma das três partes do rotor, esta parte fica com carga do mesmo sinal do estator a ela ligada pela “escova”, então a parte do rotor é atraída pelo estator de carga contrária e repelida pelo estator de mesma carga (forças de Coulomb). Estas forças provocam um torque não nulo no rotor em torno de seu eixo livre (todas as forças provocam torques no mesmo sentido de rotação) que começa a girar.

Toda vez que uma das três partes do rotor se aproxima das “escovas” uma nova faísca salta para ela alterando o sinal de sua carga e fazendo que sempre surjam os torques no mesmo sentido de rotação, fazendo o motor continuar a girar enquanto houver alta tensão nos estatores.

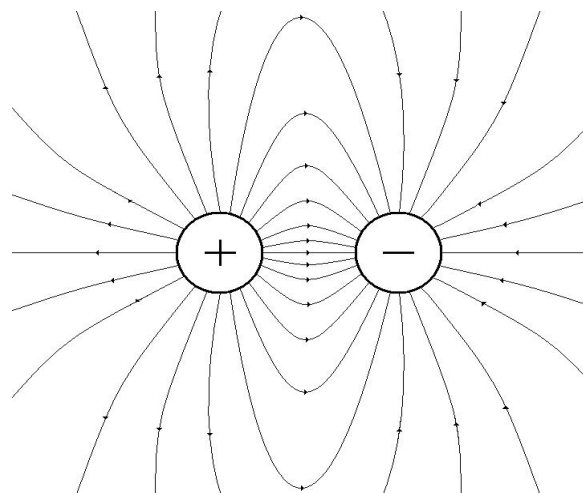


Figura 6 – Linhas de Campo geradas pelos estatores.

Na figura 6 temos uma figura com as linhas de campo elétrico geradas pelos estatores. Se uma carga de prova de carga positiva for colocada neste campo, a força sobre

ela terá direção tangente à linha de campo onde ela se situa e sentido dado pelas setas na figura. Se a carga é negativa a direção da força é a mesma, mas no sentido oposto.

Podemos fazer uma análise quantitativa da dinâmica do sistema. Um elétron colocado próximo ao estator negativo tende a ir ao positivo, como mostra as linhas de campo da figura 6. Em um motor eletrostático, ao fazer este trajeto, o elétron passa pelo rotor.

Se o elétron parte com velocidade nula do estator negativo e chega ao estator positivo também com velocidade nula, toda energia potencial elétrica do elétron é convertida em energia cinética do motor.

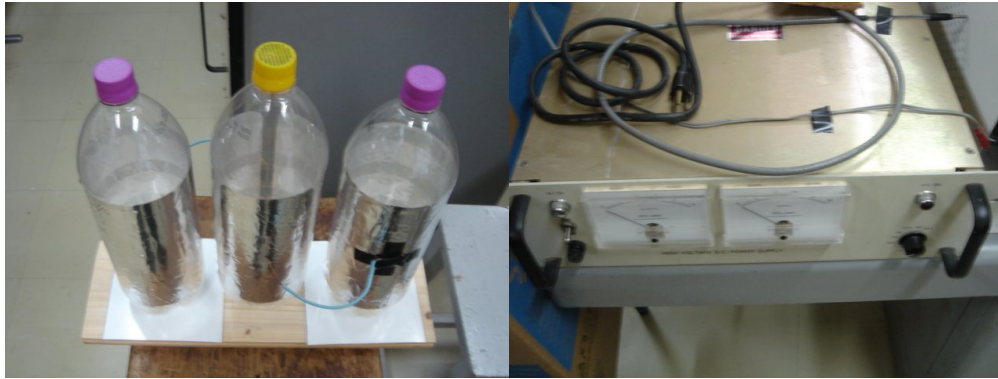
Em um motor com diferença de potencial de  $\Delta V = 10\text{kV}$  nos terminais um elétron tem energia potencial, em valor absoluto,  $E = e \cdot \Delta V$ , com  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{C}$ , a carga do elétron. Logo a energia transferida por um elétron ao motor é  $1,6 \cdot 10^{-15}\text{J}$ . Mas imagine que a corrente elétrica no motor é  $i = 1\mu\text{A}$ , o que é a corrente comum nestes motores. O número de elétrons por segundo que chegam ao estator positivo é  $n = i/e = 6,25 \cdot 10^{12}$  elétrons/s, conferindo uma potência ao motor  $P = n \cdot E = i \cdot \Delta V = 0,01\text{W}$ . Potência bastante pequena em comparação com motores magnetostáticos.

O momento de inércia da garrafa em torno do eixo de rotação, se aproximada por um cilindro, é  $I = MR^2$ , se estimarmos o peso da garrafa em 10g e o seu raio em 5cm temos  $I = 2,5 \cdot 10^{-5}\text{Kg} \cdot \text{m}^2$ . Temos que a energia cinética da garrafa é  $E_c = I\omega^2/2$ , onde  $\omega$  é a velocidade angular da garrafa, e se desconsiderarmos o atrito  $P = dE_c/dt = I\omega\alpha$ , com  $\alpha = d\omega/dt$  a aceleração angular. Logo para pequeno atrito e como  $I$  e  $P$  são constantes, partindo de velocidade inicial zero a garrafa chegaria em 10s a  $\omega = (2 \cdot P \cdot t/I)^{1/2} = 89,4\text{Hz}$ , ou seja, aproximadamente 5.000 rotações por minuto!

#### 4- Construção do motor eletrostático.

Nas figuras 7 estão o motor montado e a fonte utilizada em seu funcionamento.





Figuras 7 - Motor construído e fonte de alta tensão utilizada.

#### 4.1- Material.

Para a construção deste motor foram utilizadas:

- Três garrafas plásticas de 2 litros idênticas com tampas.
- Um pedaço de madeira de aproximadamente 40cm de comprimento, 13cm de largura e 2,5cm de espessura.
- Arame de aproximadamente 3mm de diâmetro por 45cm de comprimento.
- Duas plaquetas de fórmica de aproximadamente 13cm de comprimento por 10cm de largura.
- Fio de cobre.
- Pedaço de placa de alumínio.
- Papel alumínio.
- Fita dupla-face.
- Fita isolante.
- Cola para carpetes.

#### 4.2- Procedimento.

A construção foi feita da seguinte maneira:

1. Primeiramente as garrafas foram limpas e secas, isto é uma necessidade já que colaremos estas garrafas em várias superfícies.
2. Então, cortamos e lixamos o pedaço de madeira disponível nas medidas necessárias para fazer a base do experimento.
3. Cortamos o pedaço de arame na medida proposta e com uma máquina afiadora de metais tornamos uma das extremidades do arame bem pontiaguda.

4. Com uma broca fizemos um furo no centro da base de madeira de modo que seu diâmetro fosse um pouco menor que o arame do item anterior e inserimos o lado não pontiagudo deste arame no orifício, de forma que fique bastante firme, pois esta será a haste em torno da qual girará nossa garrafa central.
5. Cortamos um pedaço de placa de alumínio no formato do fundo da tampa das garrafas plásticas e produzimos um sulco no centro desta placa com um martelo. Encaixamos a plaqueta no fundo da tampa da garrafa que girará (garrafa central). Esta placa serve para que a haste de arame encaixe na garrafa central no momento da montagem e também para diminuir o atrito entre estas duas.
6. Furamos o centro do fundo da garrafa central com uma broca. O diâmetro do furo deve ser pouco maior que o diâmetro da haste de arame.
7. Cortamos dois pedaços da placa de fórmica no tamanho indicado na lista de materiais e colamos com a cola para carpetes cada uma das garrafas laterais, no centro destas placas.
8. Com fita dupla-face envolvemos a parte central de cada garrafa lateral com papel alumínio (pedaços de aproximadamente 32cm de comprimento por 18cm de largura).
9. Cortamos três pedaços de papel alumínio de aproximadamente 18cm de altura por 10cm de largura e colamos com fita dupla-face na parte central da garrafa central deixando estes pedaços de papel igualmente espaçados.
10. Cortamos dois pedaços de fio de cobre de 15cm e desencapamos as pontas. Em uma das pontas fizemos um “s” entortando o fio. Cada “s” foi colado à meia altura das garrafas laterais com fita isolante, tomando cuidado para que o cobre esteja em contato com o papel alumínio.
11. Colocamos a garrafa central na haste e colamos as garrafas laterais (em placas de fórmica) na base com fita dupla-face à 1cm da central.
12. Ajustamos as outras extremidades dos fios de cobre colados às garrafas laterais para que se aproximem, sem encostar, da garrafa central.

O esquema é mostrado na figura 8.

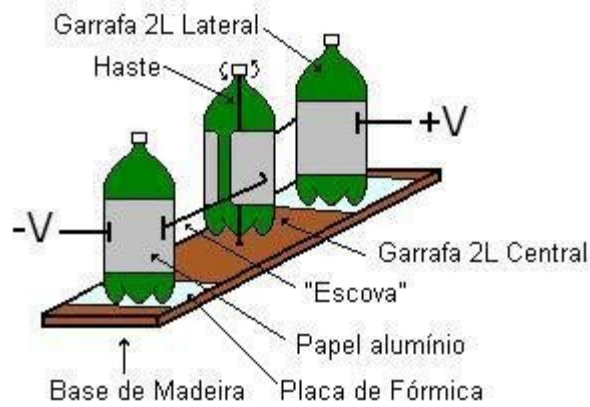


Figura 8 – Esquema de montagem do Motor

Agora para testar o motor, utilizamos uma fonte de alta tensão e aplicamos nas garrafas laterais voltagens de 10KV a 15KV e o motor girou em alta velocidade.

Na apresentação utilizaremos, como medida de segurança, uma caixa de proteção devida à alta voltagem no experimento.

## 5- Gerador com tubo de PVC.

Na Tentativa de construir uma fonte de energia eletrostática também feita com materiais comuns (de uso doméstico), construímos um gerador que com um tubo de PVC. Este gerador consiste somente em atritar um tubo de PVC a uma flanela e assim carregar estes corpos eletricamente. Para armazenar as cargas elétricas produzidas no PVC pelo atrito, construímos uma garrafa de Leyden no intuito de aumentar o potencial elétrico produzido pelo gerador, armazenando as cargas livres geradas lentamente. Infelizmente o potencial gerado pelo aparato não foi suficiente, principalmente devido às correntes de fuga produzidas pela umidade do ar, grande vilã dos experimentos com eletrostática.

### 5.1- Garrafa de Leyden.

Garrafas de Leyden são formas primitivas dos atuais capacitores de alta tensão. Em 1745, independentemente dois cientistas inventaram este instrumento: Von Musschenbroek em Leyden (daí o nome) na Holanda e Von Kleist na Pomerânia [8]. Desde então estes capacitores são feitos praticamente da mesma forma. Toma-se um recipiente feito de material isolante (por exemplo, uma garrafa de vidro) e em suas laterais internas e externas são feitas armaduras metálicas. À armadura interna é ligada a uma haste metálica que sai pelo gargalo de garrafa e é utilizada como terminal para carregar o capacitor. Normalmente,

na ponta da haste é feito um anel ou uma esfera metálica para que não se perda carga devido ao poder das pontas (grande densidade de carga formada em corpos condutores pontiagudos). A garrafa de Leyden é exemplificada na figura 9.



Figura 9 – Garrafa de Leyden.

A garrafa de Leyden montada neste projeto, foi feita utilizando um tubo de armazenamento de filme fotográfico (aqueles tubinhos pretos). A sua construção é dada nas próximas seções, mas a montagem final está na figura 10.



Figura 10 – Garraga de Leyden montada, já ao fundo o gerador de PVC montado.

A vantagem da garrafa de Leyden é que, além de sua fácil construção, ela é muito boa para lidar com altas tensões dada à forma que é feito o isolamento do terminal coletor de carga. E com este instrumento muitos dos cientistas pioneiros em eletricidade conduziram seus experimentos.

Vamos estimar a capacitância da garrafa de Leyden montada. Utilizando a lei de Gauss da eletrodinâmica e assumindo simetria cilíndrica (cilindro infinito ou  $h \gg b$ , onde  $h$  é a altura do cilindro e  $b$  o raio externo) chegamos à expressão para a capacitância:

$$C = \kappa \cdot 2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot h / \ln(b/a) \quad (4)$$

Onde  $\kappa$  é a constante dielétrica do plástico,  $\epsilon_0$  é a permissividade elétrica do vácuo,  $h$  a altura do capacitor,  $b$  o raio externo e  $a$  o raio interno. Com os valores medidos ou obtidos de tabela:

- $\kappa = 2,6$ .
- $\epsilon_0 = 8,85 \text{ F/m}$ .
- $h = 4,3\text{cm}$ .
- $b = 1,63\text{cm}$ .
- $a = 1,49\text{cm}$ .

Logo  $C$  é aproximadamente  $70\text{pF}$ , da ordem de uma capacitância comum para capacitores comerciais.

## 5.2- Funcionamento do gerador com cano de PVC.

Quando fazemos o tubo de PVC ir e voltar por entre os suportes feitos com “caixinhas de tomada”, nós atritamos o tubo com um pedaço de flanela contido em um dos suportes.

Acontece então o efeito triboelétrico, ou seja, o fenômeno de troca de cargas elétricas quando dois materiais de natureza diferente são atritados. Os materiais podem ser listados em uma série triboelétrica, ordenando-os quanto à facilidade de “roubar” o de “doar” elétrons quando atritados com outros materiais. Em nosso caso o PVC tem grande tendência a “roubar” elétrons, tornando-se carregado negativamente; enquanto a flanela carregasse positivamente.

A carga destes materiais é conduzida a um a garrafa de Leyden (capacitor) onde é armazenada até que a diferença de potencial seja suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar e gerar uma faísca. O gerador montado está na figura 12.



Figura 11 – Carregando garrafa de Leyden.

### 5.3- Construção do gerador por atrito com tubo de PVC e Garrafa de Leyden.



Figura 12 – Gerador de PVC montado.

Aqui colocamos a os materiais e esquema para construção da garrafa de Leyden, este capacitor será carregado eletricamente por um cano de PVC carregado atritando-o a um pedaço de flanelas.

Materiais necessários:

1. Tubo de PVC,  $\frac{3}{4}$  polegadas de diâmetro e 60cm de comprimento.
2. Duas caixinhas de tomadas para suporte.
3. Pedaço flanela.
4. Papel alumínio.
5. Tubo de plástico preto usado para guarda filmes fotográficos.
6. Fios de cobre.
7. Pequeno conjunto de um parafuso e uma porca.
8. Pedaço de madeira para a base.
9. Parafusos.
10. Fita dupla-face.

Esquema para construção da garrafa de Leyden está na figura 13, do gerador com PVC na figura 14.



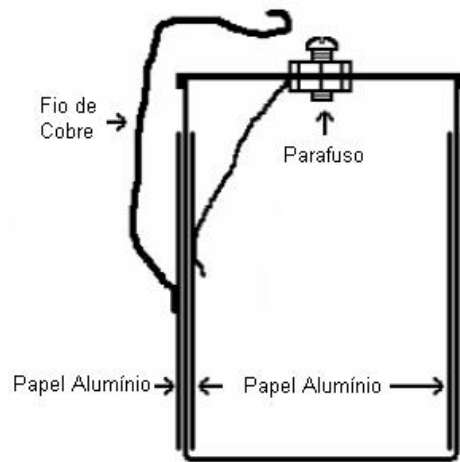


Figura 13 – Esquema de montagem da garrafa de Leyden.

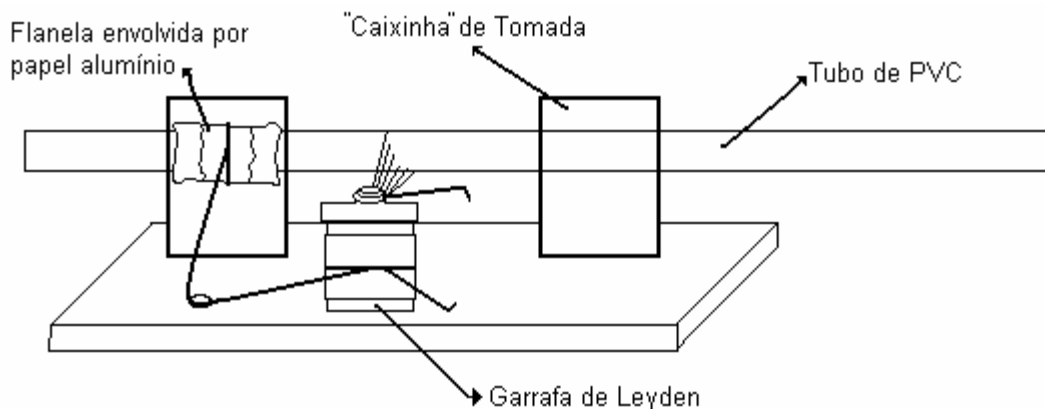


Figura 14 – Esquema de montagem do gerador com tubo de PVC.

Procedimento de montagem:

1. Primeiramente o procedimento de montagem da garrafa de Leyden. Com fita dupla-face, prender uma tira de papel alumínio em toda volta da lateral externa do tubo de filme fotográfico. Deixar uma margem entre a tira de alumínio e as extremidades da lateral.
2. Fazer o mesmo na parte interna do tubo.
3. Furar o centro da tampa do tubo de filme, com o diâmetro do parafuso que será utilizado a seguir.
4. Passar um parafuso pelo buraco na tampa e com a “porca” apropriada, prender o parafuso à tampa. Mas, também prendendo a extremidade de um pedaço de fio de cobre (5cm) entre a tampa e a porca. O pedaço de fio não deve ser muito mole, pois, deve-se entortá-lo de forma que quando o tubo é fechado pela tampa o fio de cobre encoste-se à tira de papel alumínio interna do tubo.

5. Envolver o tubo, sobre a tira de alumínio externa, com um pedaço de fio de cobre desencapado deixando sobras grandes de fio que serão utilizadas para ligar o capacitor à flanela.
6. Enrolar a cabeça do parafuso da tampa com fios bem finos de cobre desencapados para funcionar de “escova” e “capturar” as cargas do tubo de PVC.
7. Enrolar outro fio de cobre, mais resistente, à cabeça do parafuso. Este será outro terminal do capacitor.
8. Agora a montagem do restante do gerador. Sobre a base de madeira fixe com parafusos as caixas de tomada, de tal forma que seus orifícios laterais permitam passar livremente e simultaneamente nas duas caixinhas o tubo de PVC como mostra a figura (14). Deixar aproximadamente 20cm entre elas.
9. Dentro de uma das caixinhas, fixar um pedaço de flanela ao redor do tubo de PVC com um pedaço de barbante, por exemplo, de forma a deixar a flanela deslizar no tubo de PVC, mas com alguma dificuldade para haver atrito.
10. Ao redor da flanela fixar uma tira de papel alumínio, com um pedaço de fio de cobre desencapado. Este fio deve ser ligado também ao fio enrolado na parte externa da garrafa de Leyden.
11. Fixar a garrafa de Leyden à base de madeira de forma que a “escova” na cabeça do parafuso encoste-se ao tubo de PVC. Pode-se fazer isto parafusando o fundo do capacitor à madeira.
12. Agora basta fazer o tubo de PVC ir e voltar por entre as caixinhas de tomada que o capacitor será carregado.

## **6- Conclusão do Projeto.**

A proposta inicial do projeto era construção de um motor eletrostático com materiais domésticos que possa ser usado adequadamente como ferramenta de exposição dos fenômenos eletrostáticos. O projeto foi concluído com sucesso, ou seja, um motor eletrostático operante foi construído e possui efeito visual e sonoro (devido às faíscas) muito bonitos e interessantes, ilustrando de maneira satisfatória a fenômenos como a transformação de potencial eletrostático em energia mecânica e forças coulombianas de

atração e repulsão. Efeitos como as faíscas produzidas podem ser usadas também para explicar conceitos como o relâmpago, ionização do ar ou rompimento da rigidez dielétrica.

A extensão do projeto também foi executada, na tentativa de produzir uma fonte eletrostática limpa e não perigosa para o motor. Então, construímos um gerador com cano de PVC munido de uma garrafa de Leyden, ambos feitos com materiais domésticos. Mas o gerador produziu carga insuficiente para o funcionamento do motor, isto se deve basicamente ao efeito de correntes de fuga muito comuns em experimentos com eletrostática e alta tensão, principalmente devido a umidade do ar. Mas de qualquer forma o gerador de PVC com garrafa de Leyden está operante e podemos facilmente produzir faíscas com o aparelho. Com este instrumento podemos demonstrar conceitos como conversão de energia mecânica em energia elétrica, capacitores, efeito triboelétrico e também ionização do ar.

Como proposta de futuro projeto, deixamos a construção de um gerador eletrostático mais potente, como um gerador de Van de Graff, que pode tornar possíveis ou seguros outros experimentos com eletrostática, como o motor eletrostático.

### **6.1- Comentários do coordenador da disciplina.**

O comentário a respeito do projeto é dado a seguir:

“Projeto aprovado, tema muito interessante. Apenas vai ter que explicar melhor qual é o limite entre o que chamamos eletrostática e eletricidade, em princípio na eletrostática não teríamos corrente e conseqüentemente nem gasto de energia, e por isso não poderia movimentar um motor. Está sendo encarado um projeto sobre "Levitação Eletrostática", que tem algo em comum com o seu”.

Espero que este relatório final possa ter esclarecido as dúvidas que ficaram sobre o projeto. Agora coloco o comentário do coordenador sobre o relatório parcial da disciplina:

“Nota 10,0. Lembrando que o ideal seria conseguir a ativação por meio de garrafas de Leyden ou outro meio que, além de seguro, não obrigue a usar fonte de alta tensão. Se com fonte de alta tensão, porque não usa a de uma TV ou monitor de micro, que se conseguem como sucata?”

Como vimos, tentamos a ativação por meio de garrafas de Leyden, mas este tipo de fonte de energia eletrostática foi insuficiente. Talvez devido a grande sensibilidade destas fontes a umidade do ar. Por fim, a fonte de alta tensão será utilizada na apresentação, mas com todas medidas de segurança tomadas.

## 7- Referências Comentadas.

Nesta seção encontramos também alguns comentários sobre o assunto tratado em cada referência, assim como indicações para público alvo.

[1] [http://www.feiradeciencias.com.br/sala11/11\\_05.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala11/11_05.asp), acessado em 27.04.06. Esta página é trabalho do Prof. Luiz Ferraz Netto. Nela encontramos centenas de experimentos de física, inclusive o motor eletrostático. A página é extremamente bem feita e é recomendada para público geral, com interesse é claro. Trechos utilizados encontram-se nos anexos.

[2] <http://www.eskimo.com/~billb/emotor/emotor.html>, acessado em 27.04.2006. Esta página foi inspiração inicial de meu projeto, basicamente todo o esquema de montagem foi adquirido aqui. A página está em língua inglesa, por isso o público alvo é reduzido. O projeto do motor encontrado na página está nos anexos, assim como muitas interessantes experiências que podem ser feitas com o motor.

[3] [http://www.feiradeciencias.com.br/sala11/11\\_04.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala11/11_04.asp), acessado em 30.05.06. Também obra do Prof. Luiz Ferraz Netto. Desta vez sobre o gerador de PVC. Público geral e nos anexos.

[4] [http://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic\\_motor](http://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic_motor), acessado em 27.04.06. Enciclopédia eletrônica. A entrada sobre o motor eletrostático é muito interessante. Está em inglês e nos anexos. É indicado como aprofundamento.

[5] <http://f3wm.free.fr/sciences/jefimenko.html>, acessado em 27.04.06. Ótima página que conta detalhadamente sobre a história e importância dos motores eletrostáticos. Em inglês. Está nos anexos e é um ótimo aprofundamento.

[6] [http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2003/07/23\\_motor.shtml](http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2003/07/23_motor.shtml), acessado em 27.04.06. Esta é uma reportagem de divulgação de 2003 sobre a criação de um motor eletrostático nanométrico. Em inglês. Também aprofundamento.

[7] Na página do curso podemos encontrar um relatório sobre a garrafa de Leyden de autoria de Paulo Leandro Cavicchio, também um relatório sobre experimento com eletrostática por Geraldo Magela Severino Vasconcelos. Neste semestre temos também a apresentação de um trabalho sobre levitação eletrostática por Wyllerson Evaristo Gomes. Na página podem ser encontrados muitos outros trabalhos sobre eletricidade e eletrostática.

Para acessar os relatórios entre em [www.ifi.unicamp.br](http://www.ifi.unicamp.br), então clicar em graduação, então em página da graduação, disciplinas e por fim em F-809 – Instrumentação para o ensino.

[8] <http://www.coe.ufrj.br/~acmq/leydenpt.html>, acessado em 30.05.06. Página sobre a garrafa de Leyden. Em português. Indicada para público geral. Está nos anexos.

## 8- ANEXOS.

Em seguida estão os anexos. Todos estes são páginas da Internet muito interessantes tratando do assunto de construção, funcionamento e importância de motores eletrostáticos. Muitos têm figuras ou fotos muito esclarecedoras sobre os experimentos.

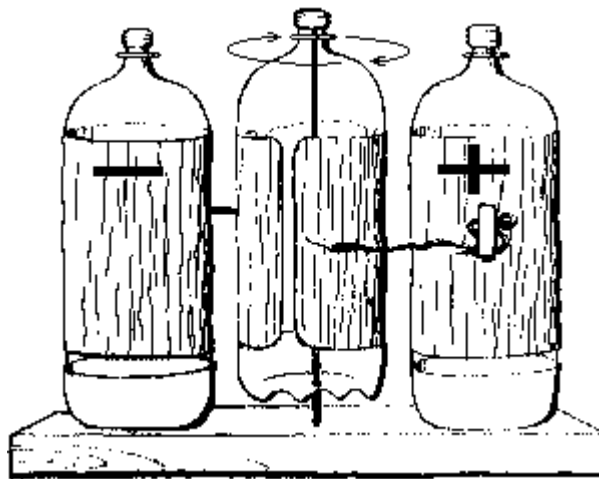
Junto a cada página copiada, coloco o endereço eletrônico, a data de acesso (pois muita coisa pode ter mudado nestas páginas desde então) e um breve comentário sobre o que se trata:

1-<http://www.eskimo.com/~billb/emotor/emotor.html>, acessado em 27.04.2006.

**Comentário:** Este endereço eletrônico é a fonte original da idéia e do modelo de motor utilizados neste projeto. Nela encontramos explicações detalhadas da construção e correções possíveis se o motor não funcionar. Ao final, ela oferece idéias muito interessantes de experimentos possíveis utilizando este motor.

O único problema para o público geral é que a página está na língua inglesa, mas prefiro não a traduzir para não perder sua clareza e completeza. Se a língua for um problema, veja a segunda página eletrônica anexada que possui conteúdo semelhante e em português.

### CONSTRUCTION:



### Metal Rod

Cut the rod so it's about 1 in. longer than the middle bottle. Sharpen the rod using a file. Drill a hole in the center of the plank using a drill bit slightly smaller than the sharpened rod. Carefully force the rod into the plank, unsharpened end first. (Note: coathanger wire will work as the center rod, sort of. But it's very wobbly. 1/8" welding rod works much

better.)(Note: instead of filing a sharp point, try attaching a piece of a sharpened pencil to the top of the rod. The sharp graphite point makes a good bearing.)

### **"Rotor" Bottle**

Find the exact center of the bottom of the middle bottle, and drill a hole there that's slightly larger than the rod diameter. When slid onto the sharpened rod, the bottle should spin very freely. If the hole is too big, the bottle will rattle around and make the brushes drag on its surface

If you can find a bottle with a metal cap, make a dimple in the center of the cap. The dimple is there so the point on the rod will have something to ride in to stay centered. Take care not to poke through the metal bottlecap with the sharp rod! If you can't find a metal cap, glue a hard object such as a small glass test tube into the bottle cap. If you use the pencil point mentioned above, a plastic bottle cap might work (I haven't tried this.) You'll still have to make a dimple in the plastic somehow.

Precisely cut three broad strips of aluminum foil so they are just wide enough to give a 1/2" spaces when attached to the center bottle. You want the middle bottle to have three regions of foil, with half-inch gaps between the regions. Trim the corners of the foil so they are round, and test-fit them on the bottle and trim as needed.

Glue the foil to the center bottle as shown in the drawing. (It doesn't matter if the shiny side of the foil faces out or in.) I used rubber cement to glue the foil strips. I coated the whole bottle with cement, coated one side of each pre-cut foil strip, allowed the glue to dry a couple of minutes, then CAREFULLY layed on the strips and burnished them down with a spoon as I went. The end result should look like an aluminum coating on the bottle, with three broad foil sections separated by 1/2in gaps running vertically. No part of each foil section should touch any other foil section. Bubbles in the foil don't hurt anything, and can be punctured with a pin and flattened with a spoon. Instead of glue and foil, you might instead try using a roll of adhesive aluminum foil tape available at some hardware stores.

### **Two "Stator" Bottles**

Glue large sheets of foil around the entire center areas of both of the two 'stator' bottles, leaving a 2 in. foil-free space at the bottoms. The bottom must remain clear of foil, and no foil on these bottles should come close to touching the wooden base or close to any duct tape you might use to connect the stator bottles to the base.

### **Commutator "brush" wires**

The commutators (or "brushes") are pieces of heavy wire or coathanger 8in long, each attached to a stator bottle, and each extending sideways so their ends are very near (but not touching) the rotor bottle surface. After attaching them to the bottles, bend the tips so they point towards the surface of the rotor bottle. See the diagram and photos.

I attached them to the stator bottles by bending the wire ends into an S-shape and embedding the S-shaped part in silicone caulk on the foil bottles. After the glue sets, the remaining short ends of each S-shape should be bent so they make solid contact with the bottle's foil. Don't let the silicone insulate the wire from the foil, because the stator foil and the commutator wire must both be electrically connected to one of the power supply terminals.

### **Attaching the Stator Bottles**

Attach the two stator bottles to the plank so they are spaced about 1/2" from the rotor bottle. I used nuts and bolts through the bottoms, which allowed me to rotate the bottles a bit for easy adjustment of the spacing between the commutator wire tips and the center bottle. (Yes, it was really hard to position the bolts inside the bottles!)

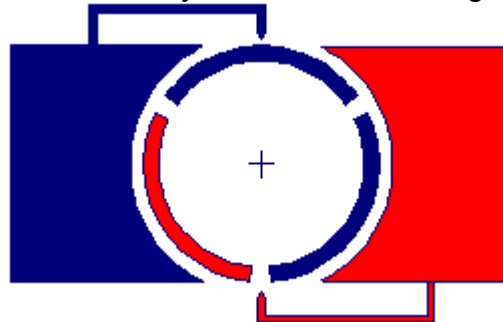
If you use tape to attach the stator bottles, make sure it DOES NOT reach up to contact the foil. Duct tape, masking tape and wood are slightly conductive, and when the humidity is high, they can provide an unwanted leakage path to ground, preventing motor operation.

### The Bearing

The metal-cap-with-dimple bearing is pretty crude. I improved it by obtaining a 1/4" diameter test tube, cutting the bottom 1/2" off it (by nicking with a file and snapping by hand with gloves.) This I glued into the exact center of the bottlecap. The sharpened rod spun nicely against the glass. Avoid dropping the center bottle suddenly down onto the metal rod, or the sharp point will shatter the glass bearing.

### RUNNING IT:

**It takes more than 5,000 volts to operate this motor.** This source of voltage is available from "static electric" sources. Try the Van de Graaff generator.



Any power supply will have two output terminals (although one terminal might be invisibly connected to ground.) The positive lead must connect to one stator-bottle's foil and commutator wire, while the negative lead goes to the other. If you use a Van de Graaff machine, use tape and bare wire to connect the foil on one stator bottle to the upper sphere, and connect the foil on the other bottle to the generator's metal base.

If your source of high voltage has just one output wire, then its missing wire is actually connected to ground internally. In this case connect the output wire to the foil on one bottle, and connect the foil on other bottle to electrical ground. Electrical ground can be found in many places, for example, use a metal faucet, metal sink, or the metal screw on the cover plate of a light switch or electric outlet. In a pinch you can use a metal tabletop for "ground", or use a few feet of aluminum foil layed on the floor, or even touch the other bottle with your finger to provide a crude ground-path out through your feet.

### HOW IT WORKS:

When a high voltage is applied between the two stator bottle foils, one stator bottle acquires a negative charge imbalance, while the other one becomes positive. Also, a tiny spark

jumps from the tip of each commutator brush to one of the foil sectors on the rotor bottle. The sector under the positive brush becomes positive, the one under the negative brush becomes negative. The rotor's foil sectors are then repelled from the alike-charged stator bottle and attracted to the unlike charged stator bottle. This sideway electrostatic force causes the center bottle to rotate, which brings new foil sectors under the brushes. Tiny sparks then jump to the new sectors and charge them, which makes them attract/repel from the stator bottles, etc. The foil on the rotor bottle that's under the commutator is always charged the same as the commutator, so it's always being repelled/attracted sideways.

The force is continuous, therefore the speed of the rotor bottle will keep rising higher and higher. In practice the rotor speed will not increase forever, but will stabilize because of air turbulence, bearing resistance and bearing chatter, etc. If the entire motor could be put inside a vacuum chamber, it would REALLY run fast. But then the sparks couldn't jump from the commutator wires, and you'd have to arrange some kind of sliding contact brushes instead. (Sparks cannot exist in vacuum, since a spark is made of air which has turned into plasma.)

Here's another way to visualize the motor: if you turn it sideways, you'll see that the motor is sort of like a waterwheel. On one side the excess negative charge is pouring into the side of the rotor bottle and "falling" towards the positive bottle. On the other side the positive excess is "falling" upwards and dragging the rotor bottle surface up. The moving charge gets temporarily stuck in the foil surfaces of the rotor, and it drags the rotor along with it as it moves from one stator bottle to the other. The motor rotates because it blocks the flow of moving electric charge, just as a waterwheel rotates because it blocks the flow of moving water.

Yet another way to imagine it: Normal coil-and-magnet motors often are built like this: three electromagnet coils in the rotor, two permanent magnets as the stator, a commutator, and they operate by magnetic attraction/repulsion. In the pop-bottle motor all the coils are replaced with capacitor plates. The rotor has three capacitor plates instead of three electromagnetic coils. The stator permanent magnets are replaced by (+) and (-) charged stator plates. All the electric currents have become voltages, and all the magnetic fields are replaced by electric fields. In electronics, the swapping of coils with capacitors and voltage with current is called the "electromagnetic dual." Capacitors are the "dual" of inductors. The popbottle motor is the "electromagnetic dual" of the common coil/magnet motor. Small slot-car PM (permanent magnet) motors represent one side of the electric/magnetic duality found in light, radio, electric energy, and all EM phenomena. The popbottle electrostatic motor is the other half of the duality. Light waves, radio waves, and electrical energy are where the voltage/current and electric/magnetic duality blends into a single thing called... Electromagnetism.

## **High Voltage Motor Experiments**

### **Just running the motor**

If you have a safe, current-limited high voltage DC supply, simply connect the output wires from the supply to the commutator wires of your bottle motor. I found that a minimum of 4500V is needed to make the motor barely turn. At 7000V, the motor will spin quite rapidly. DC high voltage power supplies are dangerous, so unless you are familiar with High Voltage and electrical safety procedures, use some other power supply. If you have a VandeGraaff machine, then use one wire to connect the grounded base of the VDG machine to the foil of one stator-bottle. Connect the other bottle's to the sphere of the VDG machine with wire and tape.



### **Electric Current Through the Air**

If you have a VandeGraaff machine or other type of ultra-high voltage source, try attaching a sharp point to its main terminal to create charged electric wind. Aim the wind at one stator bottle of the bottle motor, and ground the other stator bottle with a wire going to a water faucet (or to the screw on an electric outlet plate.) The motor will spin! Start with a spacing of a few inches between the sharp point and the stator bottle. Get the motor to run this way, then move the motor farther and farther from the generator, until it just barely turns. I was able to run my motor (very feebly) from a VandeGraaff machine about 15 ft. away, totally through the microamp currents conducted by the charged wind. When I stood in the path, the motor would stop. An Ion-Beam burglar alarm! If you want to make it work over long distances, a draft-free room is required.

### **Electric Current Through the Demonstrator**

Connect one side of the motor to ground. Stand on an insulated platform, touch the main terminal of an operating VandeGraaff machine with one hand, then touch the non-grounded stator bottle foil with the other. The motor will spin rapidly. You can even run the motor by POINTING at the appropriate stator bottle foil from a few inches away. Charged air streaming from your finger conducts a few microamps to the motor. So, how many people, standing on insulating platforms, can you connect in series and still have the motor run? Leakage to ground, rather than the resistance of the people, would be the limiting factor. Everyone's hair should be standing on end during the demonstration. I've never tried this. You be first!

### **Running the motor with a balloon**

Connect one stator bottle foil to ground. Pass the surface of a charged balloon along the foil of the other stator bottle, and the motor will slowly turn. With several people working, it is possible to keep the motor turning by sequentially charging several balloons and passing each across the foil. Hint: this works better if you place the balloon against the stator bottle at the top edge of the foil, then carefully ROTATE the balloon so its charged surface passes over the foil edge.

### **The awesome power of Television**

Dr. Krienke at SPU in Seattle suggested this one. Use tape to tack a sheet of aluminum foil to the screen of a TV set (leave a 1" to 2" space around the foil, and fold the corners back). Tape the bare end of a wire to the foil connect the wire to one side of the motor, and connect the other side of the motor to ground. When the TV is turned on, the motor will spin a few times then quit. When the TV is turned off, the motor again spins briefly.

Capacitive coupling right through the glass picture tube! Turn the TV on and off very slowly, to generate slow AC and run the motor continuously. It would be wise to use an old, half-dead TV, so you don't damage it by turning on and off so much. If the screen lights up and crackles, the TV should work, even if it doesn't receive pictures.

### **Stored Energy**

Fill both stator bottles with water, and place the two ends of a single wire in the water of both, to electrically connect the water together. Now connect and run the motor as you normally do, however...

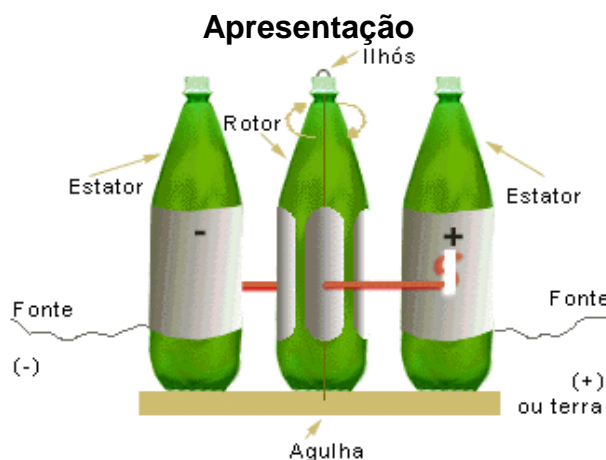
## **DON'T TOUCH ANY OF ITS METAL PARTS OR WIRE CONNECTIONS, OR THE STORED ENERGY MAY ELECTROCUTE YOU!**

After the motor begins to turn, carefully disconnect the power supply (use proper safety procedures and protection.) The motor will continue running for up to a minute or two. You have created two Leyden Jar capacitors which can store enough electrical energy to run the motor for a while.

When finished, be sure to carefully discharge the capacitors, to each other AND to the water conductor, then dump out the water before handling it again. Be warned, this demo is dangerous if you don't know how to safely handle high voltage capacitors. If it zaps you, at the very least it will knock you on your butt and make your arm numb for hours. If you accidentally discharge it through your body, it very well might kill you. Only attempt this demonstration if you have done this type of demonstration before, and you know how to work safely with high voltage at lethal energy levels.

2-[http://www.feiradeciencias.com.br/sala11/11\\_05.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala11/11_05.asp), acessado em 27.04.06.

**Comentário:** Este anexo possui informações detalhadas da construção e possíveis correções se o motor não funcionar. Foi feito por um professor de física brasileiro (Prof. Luiz Ferraz Netto) para sua página na internet. Ao final, possui também interessantes variações do projeto e muito boas gravuras.



Este motor eletrostático simples foi construído com três garrafas plásticas (PET) de refrigerante de 2 litros e folha de alumínio - material esse inteiramente caseiro. Funciona com corrente elétrica de intensidade de fração de um microampère, mas pode girar com velocidade bastante alta, mesmo acima de 1.000 rpm!

### **Material necessário**

- . Base de material isolante (plástico, vidro ou madeira, secos e bem envernizados).
- . Três garrafas de refrigerante de 2 litros, pelo menos uma delas com tampa.
- . Folha de alumínio (papel-alumínio simples ou com face gomada).
- . Agulha de tricô rígida (cobertura plástica, com alma de aço), nº 3 ou nº 3,5.
- . Ilhós (macho).
- . Dois pedaços de fio de cobre rígido (fio 1,5 mm<sup>2</sup>, desencapado) de 20 cm de comprimento

cada um.  
. Supercola.

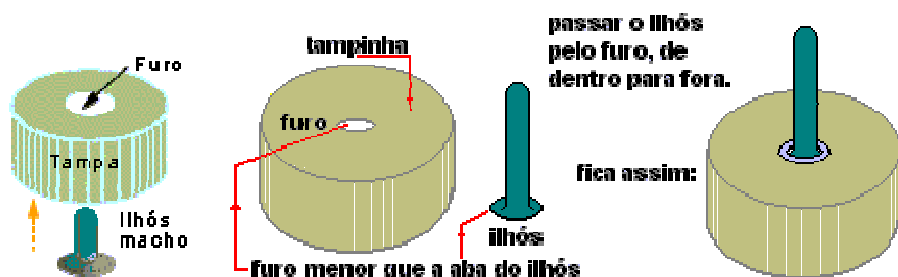
## Fontes de Energia Eletrostática

Para um funcionamento perfeito, esse motor requer tensão mínima de 5.000 volts DC (do inglês *Direct Current*, ou CC - Corrente Contínua). Essa tensão pode ser obtida de diferentes fontes de energia eletrostática (consulte o seu professor sobre qual dessas fontes poderá ser disponibilizada para esse experimento): gerador eletrostático de Van der Graaff ou VDG (de melhor rendimento), máquina eletrostática de Wimshurst, gerador de íons negativos, antena sustentada por balão (balão de hidrogênio suportando fio com agulhas no topo), eletróforo grande (requer umidade zero), máquina eletrostática de Kelvin (máquina de gotas de água; que faz o motor girar em baixa velocidade), técnica do liga-desliga a tevê (fonte eletrônica de alta-tensão DC) e até mesmo com um balão de borracha atritado contra um tecido de flanela. Para Feiras de Ciências em escolas, é recomendável o gerador eletrostático de Van der Graaff, seja tocado à manivela ou motorizado.

## Montagem do rotor

1. Ache o centro exato do fundo da garrafa de refrigerante que irá funcionar como rotor. Faça nesse ponto um furo de diâmetro ligeiramente maior que a espessura da agulha de tricô. Recomenda-se que esse furo seja feito com furadeira elétrica e broca na medida correta. Tire todas as rebarbas.

2. Ache o centro exato da tampinha da garrafa e faça nesse ponto um furo de diâmetro igual ao do ilhós macho.



3. Introduza, de dentro para fora, o ilhós no furo da tampinha, observando se ficou bem apertado nesse orifício. Se necessário, fixe o ilhós na tampinha com supercola (à base de cianoacrilato, como Superbonder, ou à base de epóxi, como Araldite) ou massa epóxi (como Durepóxi de secagem rápida). Atenção: Não deixe entrar cola dentro do ilhós.

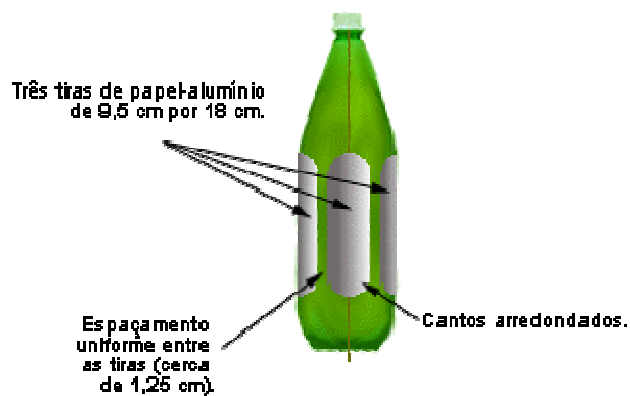


4. Rosqueie a tampinha na garrafa com firmeza. Introduza, em seguida, a agulha de tricô pelo orifício no fundo da garrafa e leve a ponta até tocar o fundo do ilhós. Recomenda-se que o plástico da ponta da agulha seja retirado, deixando para fora apenas 1,5 cm da

alma de aço dessa agulha. A extremidade livre dessa ponta de aço deve ser desbastada com lima fina para tomar uma forma arredondada. Faça, então, o primeiro teste de rotação da garrafa ao redor da agulha apoiada no ilhós. Segure firme a parte da agulha que restou fora da garrafa e faça a garrafa girar. A garrafa deve girar livremente, com atrito quase zero. Atenção: Essa etapa deve ser muito bem trabalhada, pois desse ajuste vai depender quase todo o funcionamento do motor.

5. Você deverá, agora, fixar a agulha no centro da base isolante. Primeiramente corte a saliência no pé da agulha (deixe a garrafa de lado para essas operações). Faça, no centro da base, um orifício com um diâmetro ligeiramente menor que o diâmetro da agulha. Fixe o pé da agulha nesse orifício com muita firmeza, formando um eixo vertical. Coloque a garrafa-rotor nesse eixo e teste novamente com que facilidade se dá a rotação. Uma gotinha de lubrificante colocada no ilhós pode ajudar.

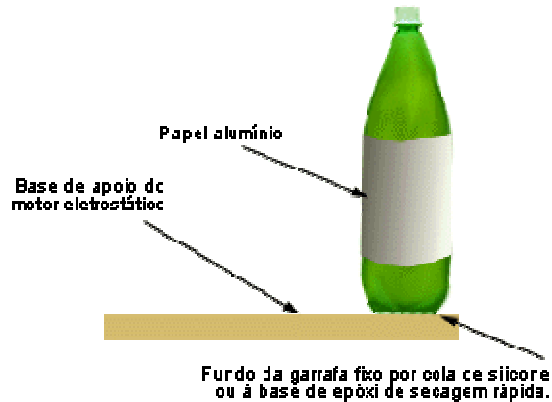
6. Para preparar as tiras de papel-alumínio que devem ser coladas no rotor, proceda como explicamos a seguir. Corte uma tira de papel-alumínio de 28,5 cm de comprimento por 18 cm de largura. Divida essa tira, ao longo de seu comprimento, em três novas tiras iguais - teremos três tiras de 9,5 cm por 18 cm. Coloque as três tiras uma sobre a outra e, com uma tesoura, arredonde os cantos. Com cola para borracha fixe as três tiras ao redor da garrafa-rotor, deixando um espaçamento uniforme entre elas (cerca de 1,25 cm).



Montagem com garrafas PETs de 2 litros

### Montagem dos estatores

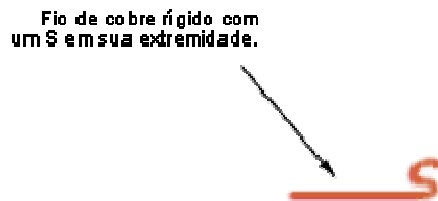
1. Cole tiras de papel-alumínio ao redor de cada garrafa-estator, como se fossem rótulos do refrigerante. Os próprios rótulos das garrafas servirão de molde para o corte do papel-alumínio. Não deixe bolhas, fure-as com alfinete e alise com uma colher. O papel-alumínio gomado ainda é a melhor opção. Deixe pelo menos 2 cm livres próximo aos fundos das garrafas.



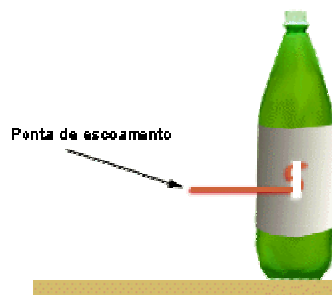
2. Fixe os fundos das garrafas-estatores na base de apoio do motor eletrostático usando cola de silicone ou à base de epóxi de secagem rápida. Cada estator deve ficar cerca de 1,25 cm distante do rotor.

### Montagem das pontas de escoamento

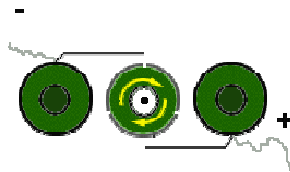
1. Faça um S em uma das extremidades de cada fio de cobre rígido (fio 1,5 mm<sup>2</sup>, descascado).



2. Fixe cada S bem no meio de cada estator, usando fita gomada (fita isolante ou de embalagem) e deixe o restante do fio bem horizontal. Cuidado para que a cola não penetre entre o S e o alumínio, formando um isolante entre eles. Essas pontas de escoamento funcionarão como "escovas", semelhantes àsquelas das máquinas eletrostáticas de Whimshurt.



3. As pontas dos fios devem ficar próximas do rotor, mas sem tocar nele.



### Fazendo funcionar

São necessários pelo menos 5.000 volts DC para o bom funcionamento do motor. Como já dissemos, esta "alta" tensão está disponível em diversas máquinas eletrostáticas. O gerador eletrostático de Van der Graaff, quer movido a motor quer a manivela, é sem dúvida o mais recomendado.

Há fontes eletrostáticas que oferecem dois terminais de acesso (um + e outro -) e, nesses casos, basta interligar esses terminais com os estatores do motor eletrostático. Se você usar uma máquina de Van der Graaff, ligue um dos estatores à esfera superior e o outro à base de metal do gerador. Se sua fonte apresenta apenas um dos terminais, ligue-o a um dos estatores; o outro estator, neste caso, deve ser aterrado, o que pode ser feito ligando-o ou a uma torneira, ou a uma pia de metal, ou a uma janela metálica ou até mesmo ao terminal de terra de uma tomada de 110 volts AC (do inglês *Alternate Current*, ou CA - Corrente Alternada). Use lâmpada *néon* para identificar o terminal de terra da tomada.

Em alguns casos, o simples toque com o dedo no estator livre aterrado é suficiente para o rotor começar a girar. Uma placa metálica (ou uma grelha de churrasqueira) colocada no chão e ligada ao estator livre é outra opção.

### O mistério do experimento Por que a garrafa-rotor gira?

Se a garrafa-rotor gira, e cada vez mais velozmente, é porque deve haver um torque proporcionado por força na periferia dessa garrafa. De onde vêm essas forças que originam o torque? É aqui que entra a eletrostática. O estator ligado ao pólo positivo da fonte eletriza-se positivamente, e o outro estator, negativamente. Por meio das pontas de escoamento, as cargas dos estatores são encaminhadas às placas de alumínio do rotor. É nessa fase que utilizamos o "poder das pontas". A placa abaixo da ponta positiva torna-se positiva e a placa abaixo da ponta negativa torna-se negativa.

Ocorre um par resultante de repulsões tangenciais (torque): o estator positivo repele a placa-rotor positiva e o estator negativo repele a placa-rotor negativa. Com a repetida passagem de cada placa-rotor pelas proximidades das pontas de escoamento, ocorrem minúsculas faíscas (eflúvios) que se encarregam das trocas de polaridades, mantendo sempre na posição tangencial cargas de mesmo sinal e suas conseqüentes repulsões. Como o torque é contínuo, a velocidade do rotor continuaria aumentando sempre. Na prática, isso não ocorre, pois, numa dada rotação, o rotor estabiliza por causa da resistência viscosa (arraste) imposta a ele pelo ar, que se torna turbulento junto ao rotor.

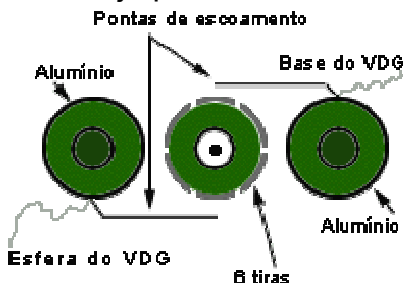
Nota: Esse motor eletrostático com dois estatores (fixos) e o rotor com três seções é uma cópia exata de um pequeno motor DC do tipo bobina-ímãs. Se você já abriu um desses motorzinhos, deve ter reparado que o rotor apresenta três seções (três enrolamentos) ligados a três comutadores, dois ímãs laterais e um par de escovas. A corrente elétrica polariza as seções do rotor com o mesmo tipo de pólo que os ímãs fixos, e um par de forças magnéticas tangenciais determinam a rotação do rotor, por repulsão.

No nosso motor, substituímos a corrente elétrica por cargas elétricas estacionárias, os campos magnéticos por campos elétricos, os ímãs por estatores eletrizados e as escovas por pontas de escoamento.

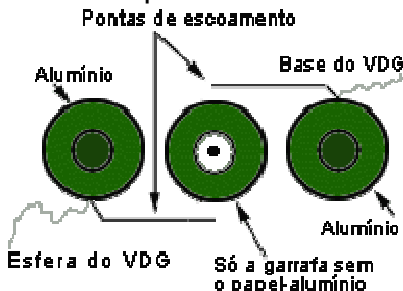
### Variações do experimento

Mexi novamente no motor eletrostático de três garrafas e, como a experimentação é um processo maravilhoso, aqui estão as novidades:

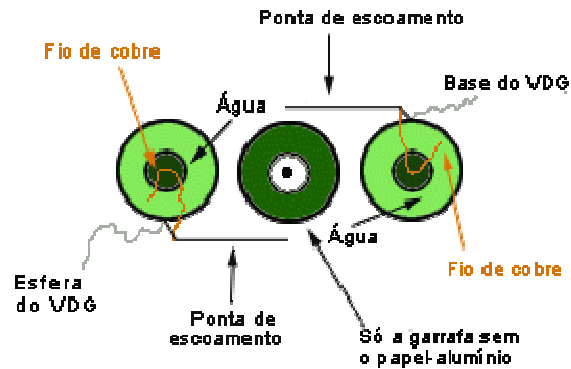
1. Primeiro experimento. Preparei um novo rotor com seis tiras de papel-alumínio (em lugar de três, conforme o protótipo), de 4 x 18 cm e afastamento entre elas de 1,3 cm. Coloquei o novo rotor entre os estatores já prontos e... a rotação aumentou 100%. Sucesso!



2. Segundo experimento. Preparei um novo rotor sem nenhuma tira de papel-alumínio, só a garrafa plástica. Coloquei a garrafa-rotor entre os estatores já prontos, liguei o VDG (que é um modelo pequeno, com esfera de 10 cm de diâmetro) e ela girou! Dessa vez, o próprio plástico da garrafa ficou eletrizado por influência e rodou.



3. Terceiro experimento. Agora ficou bastante claro para mim que as tiras de papel-alumínio das garrafas-estatores também podiam ser dispensadas. Enchi de água duas garrafas plásticas limpas (3 cm abaixo do gargalo) e enfiei um fio de cobre desencapado dentro de cada uma e liguei nas correspondentes pontas de escoamento. Liguei o VDG e... rodou para valer! Creio que a mesma rotação conseguida no primeiro experimento. A garrafa até canta ao atritar-se contra o eixo de madeira envernizada (que coloquei em substituição à agulha de tricô) no orifício do fundo da garrafa-rotor. Não há dúvida de que esse é o motor eletrostático mais simples possível: três garrafas de refrigerante, um eixo de madeira dotado de um alfinete na extremidade superior, um ilhós, dois pedaços de fio de cobre... e água!



3- [http://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic\\_motor](http://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic_motor), acessado em 27.04.06.

**Comentário:** Este anexo foi retirado de uma enciclopédia virtual. Aqui encontramos uma boa definição de motor eletrostático, comparações com o magnetostático e a definição de dualidade em eletrônica e eletromagnetismo.

Mais uma vez o texto está em inglês.

### Electrostatic motor From Wikipedia, the free encyclopedia

An **electrostatic motor** or **capacitor motor** is a type of electric motor based on the attraction and repulsion of electric charge. Usually, Electrostatic motors are the dual of conventional coil-based motors. They typically require a high voltage power supply (but not always). Conventional electric motors instead employ magnetic attraction and repulsion, and require high current at low voltages. In the 1750s, the first electrostatic motors were developed by Benjamin Franklin and Andrew Gordon.

An **electric motor** converts electrical energy into mechanical motion. The reverse task, that of converting mechanical motion into electrical energy, is accomplished by a generator or dynamo. In many cases the two devices differ only in their application and minor construction details, and some applications use a single device to fill both roles. For example, traction motors used on locomotives often perform both tasks if the locomotive is equipped with dynamic brakes.

Electrostatic motors could provide a source of mechanical free energy with atmospheric potential supplied by antennae.

As Dr. Jefimenko points out, "It is clear that electrostatic motor research still constitutes an essentially unexplored area of physics and engineering, and that electrostatic motor research must be considered a potentially highly rewarding area among the many energy-related research endeavors." The atmospheric potential of the planet is not less than 200,000 megawatts. He has succeeded in constructing demonstration motors that run continuously off atmospheric electricity. Jefimenko's largest output motor was an electret design that had a 0.1 Hp rating.

### Dual (electronics)



In electronics, the word **dual** refers to two devices or circuits that have mathematical descriptions that are identical except that voltages in one correspond to currents in the other, and vice versa. For example:

- a resistance is the dual of a conductance;
- two resistances in series are the dual of two conductances in parallel;
- a capacitor is the dual of an inductor;
- an electrostatic motor is the dual of a magnetic motor;
- Kirchhoff's current law is the dual of Kirchhoff's voltage law.

In physics, the **Electromagnetic dual** concept is based on the idea that, in the static case, Electromagnetism has two separate facets: electric fields and magnetic fields. Electric fields are the dual of magnetic fields, and vice versa. Also:

- Permittivity is the dual of permeability.
- Piezoelectricity is the dual of magnetostriction.
- Ferroelectrics (or electrets) are the dual of ferromagnets.
- Electrets are the dual of permanent magnets;
- The Faraday Effect is the dual of the Kerr effect.

#### 4-<http://f3wm.free.fr/sciences/jefimenko.html>, acessado em 27.04.06.

**Comentário:** Este anexo, apesar de não estar em português, é a melhor referência encontrada compilando de maneira breve e clara a toda a história dos motores eletrostáticos. Desde sua invenção até suas grandes melhorias no século passado. A única parte faltante desta história é a atual revolução destes motores com a nanotecnologia.

Também apresenta muitas vantagens e a importância destes motores.

#### **Electrostatic Motors Are Powered By Electric Field of the Earth**

*By C.L. Stong, October 1974*

ALTHOUGH no one can make a perpetual motion machine, anyone can tap the earth's electric field to run a homemade motor perpetually. The field exists in the atmosphere between the earth's surface and the ionosphere as an electric potential of about 360 000 volts. Estimates of the stored energy range from a million kilowatts to a billion kilowatts.

Energy in this form cannot be drawn on directly for driving ordinary electric motors. Such motors develop mechanical force through the interaction of magnetic fields that are generated with high electric current at low voltage, as Michael Faraday demonstrated in 1821. The earth's field provides relatively low direct current at high voltage, which is ideal for operating electrostatic motors similar in principle to the machine invented by Benjamin Franklin in 1748.

Motors of this type are based on the force of mutual attraction between unlike electric charges and the mutual repulsion of like charges. The energy of the field can be tapped with a simple antenna in the form of a vertical wire that carries one sharp point or more at its upper end. During fair weather the antenna will pick up potential at the rate of about 100 volts for each meter of height between the points and the earth's surface up to a few hundred feet. At higher altitudes the rate decreases. During local thunderstorms the pickup can amount to thousands of volts per foot. A meteorological hypothesis is that the field is maintained largely by thunderstorms, which pump electrons out of the air and inject them into the earth through bolts of lightning that continuously strike the surface at an average rate of 200 strokes per second.

Why not tap the field to supplement conventional energy resources ? Several limitations must first be overcome. For example, a single sharp point can draw electric current from the surrounding air at a rate of only about a millionth of an ampere. An antenna consisting of a single point at the top of a 60-foot wire could be expected to deliver about a microampere at 2 000 volts; the rate is equivalent to .002 watt. A point-studded balloon tethered by a wire at an altitude of 75 meters might be expected to deliver .075 watt. A serious limitation appears as the altitude of the antenna exceeds about 200 meters. The correspondingly higher voltages become difficult to confine.

At an altitude of 200 meters the antenna should pick up some 20 000 volts. Air conducts reasonably well at that potential. Although nature provides effective magnetic materials in substances such as iron, nickel and cobalt, which explains why the electric-power industry developed around Faraday's magnetic dynamo, no comparably effective insulating substances exist for isolating the high voltages that would be required for electrostatic machines of comparable power. Even so, electrostatic motors, which are far simpler to build than electromagnetic ones, may find applications in special environments such as those from which magnetism must be excluded or in providing low power to apparatus at remote, unmanned stations by tapping the earth's field.

Apart from possible applications electrostatic motors make fascinating playthings. They have been studied extensively in recent years by Oleg D. Jefimenko and his graduate students at West Virginia University. The group has reconstructed models of Franklin's motors and developed advanced electrostatic machines of other types.

Although Franklin left no drawing of his motor, his description of it in a letter to Peter Collinson, a Fellow of the Royal Society, enabled Jefimenko to reconstruct a working model [ see Fig 1 ]. Essentially the machine consists of a rimless wheel that turns in the horizontal plane on low-friction bearings. Each spoke of the "electric wheel," as Franklin called the machine, consists of a glass rod with a brass thimble at its tip. An electrostatic charge for driving the motor was stored in Leyden jars. A Leyden jar is a primitive form of the modern high-voltage capacitor. Franklin charged his jars with an electrostatic generator.

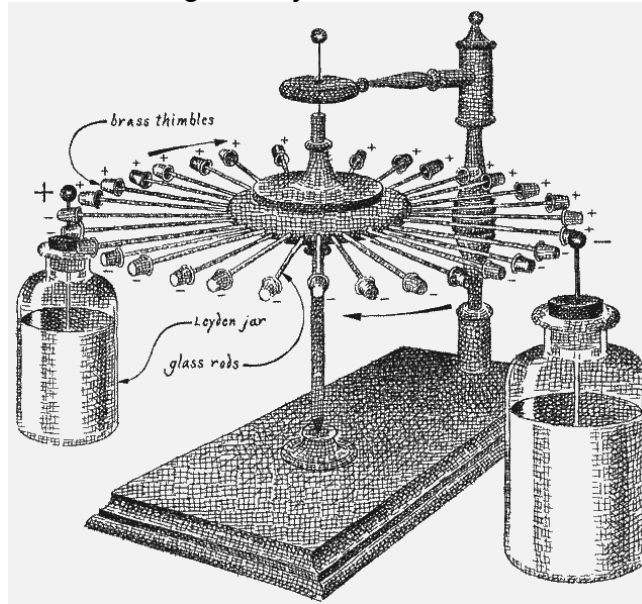


Fig 1 - Benjamin Franklin's electrostatic motor

The high-voltage terminals of two or more Leyden jars that carried charges of opposite polarity were positioned to graze the thimbles on opposite sides of the rotating wheel. The motor was started by hand. Thereafter a spark would jump from the high-voltage terminal to

each passing thimble and impart to it a charge of the same polarity as that of the terminal. The force of repulsion between the like charges imparted momentum to the wheel.

Conversely, the thimbles were attracted by the oppositely charged electrode of the Leyden jar Franklin placed on the opposite side of the wheel. As the thimbles grazed that jar, a spark would again transfer charge, which was of opposite polarity. Thus the thimbles were simultaneously pushed and pulled by the high-voltage terminals exactly as was needed to accelerate the wheel.

Franklin was not altogether happy with his motor. The reason was that running it required, in his words, "a foreign force, to wit, that of the bottles." He made a second version of the machine without Leyden jars.

In this design the rotor consisted principally of a 17-inch disk of glass mounted to rotate in the horizontal plane on low-friction bearings. Both surfaces of the disk were coated with a film of gold, except for a boundary around the edge. The rotor was thus constructed much like a modern flat-plate capacitor.

Twelve evenly spaced metal spheres, cemented to the edge of the disk, were connected alternately to the top and bottom gold films. Twelve stationary thimbles supported by insulating columns were spaced around the disk to graze the rotating metal spheres. When Franklin placed opposite charges on the top and bottom films and gave the rotor a push, the machine ran just as well as his first design, and for the same reason. According to Franklin, this machine would make up to 50 turns a minute and would run for 30 minutes on a single charge.

Jefimenko gives both motors an initial charge from a 20 000 volt generator. They consume current at the rate of about a millionth of an ampere when they are running at full speed. The rate is equivalent to .02 watt, which is the power required to lift a 20 gram weight 10 centimeters (or an ounce 2.9 inches) in one second.

Jefimenko wondered if Franklin's motor could be made more powerful. As Jefimenko explains, the force can be increased by adding both moving and fixed electrodes. This stratagem is limited by the available space. If the electrodes are spaced too close, sparks tend to jump from electrode to electrode around the rotor, thereby in effect short-circuiting the machine. Alternatively the rotor could be made cylindrical to carry electrodes in the form of long strips or plates. This scheme could perhaps increase the output power by a factor of 1 000.

Reviewing the history of electrostatic machines, Jefimenko came across a paper published in 1870 by Johann Christoff Poggendorff, a German physicist. It described an electrostatic motor fitted with a rotor that carried no electrodes. The machine consisted of an uncoated disk of glass that rotated in the vertical plane on low-friction bearings between opposing crosses of ebonite. Each insulating arm of the crosses supported a comblike row of sharp needle points that grazed the glass.

When opposing combs on opposite sides of the glass were charged in opposite polarity to potentials in excess of 2 000 volts, air in the vicinity of the points on both sides of the glass was ionized. A bluish glow surrounded the points, which emitted a faint hissing sound. The effect, which is variously known as St. Elmo's fire and corona discharge, deposited static charges on both sides of the rotor.

Almost the entire surface of the glass acquired a coating of either positive or negative fixed charges, depending on the polarity of the combs. The forces of repulsion and attraction between glass so charged and the combs were substantially larger than they were in Franklin's charged thimbles. The forces were also steadier, because in effect the distances between the combs and the charged areas remained constant. It should be noted that adjacent combs on the same side of the glass carried charges of opposite polarity, so that the

resulting forces of attraction and repulsion acted in unison to impart momentum to the disk, as they did in Franklin's motor.

By continued experimentation Poggendorff learned that he should slant the teeth of the combs to spray charge on the glass at an angle. The resulting asymmetrical force made the motor self-starting and unidirectional. When the teeth were perpendicular to the glass surface, the forces were symmetrical, as they were in Franklin's motor. When the machine was started by hand, it ran equally well in either direction.

Poggendorff was immensely pleased by the rate at which his machine converted charge into mechanical motion. He concluded his paper with a faintly odious reference to Franklin's device. "That such a quantity of electricity must produce a far greater force than that in the [Franklin] electric roasting spit," he wrote, "is perfectly obvious and nowadays would not be denied by Franklin himself. With one grain of gunpowder one cannot achieve so much as with one hundred pounds.

Electrostatic motors are now classified in general by the method by which charge is either stored in the machine or transferred to the rotor. Poggendorff's machine belongs to the corona type, which has attracted the most attention in recent years. Although its measured efficiency is better than 50 percent, Poggendorff regarded it merely as an apparatus for investigating electrical phenomena. He wrote that "it would be a sanguine hope if one wanted to believe that any useful mechanical effect could be achieved with it."

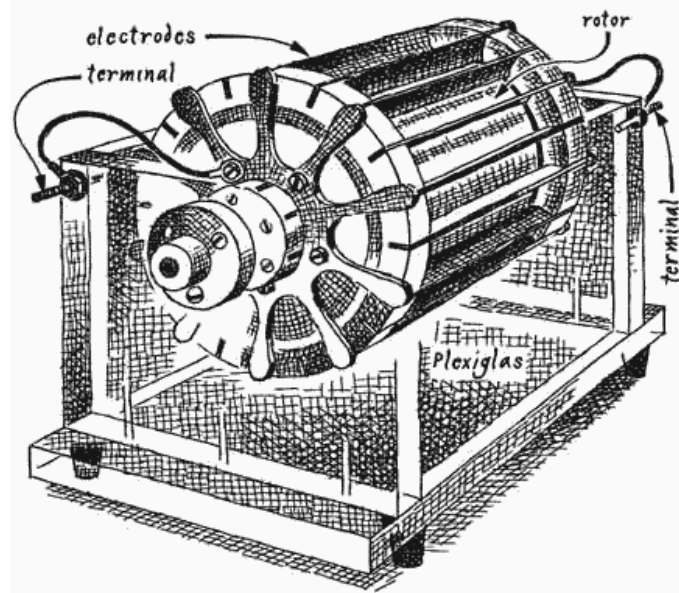


Fig 2 - Oleg D. Jefimenko's corona motor

Poggendorff's negative attitude toward the usefulness of his design may well have retarded its subsequent development. A modern version of the machine constructed in Jefimenko's laboratory has an output of approximately .1 horsepower. It operates at speeds of up to 12 000 revolutions per minute at an efficiency of substantially more than 50 percent. In one form the modern corona motor consists of a plastic cylinder that turns on an axial shaft inside a concentric set of knife-edge electrodes that spray charge on the surface of the cylinder [ see Fig 2 ]. Forces that act between the sprayed charges and the knife-edge electrodes impart momentum to the cylinder.

Machines of this kind can be made of almost any inexpensive dielectric materials, including plastics, wood and even cardboard. The only essential metal parts are the electrodes and their interconnecting leads. Even they can be contrived of metallic foil backed

by any stiff dielectric. The shaft can be made of plastic that turns in air bearings. By resorting to such stratagems experimenters can devise motors that are extremely light in proportion to their power output. Corona motors require no brushes or commutators. A potential of at least 2 000 volts, however, is essential for initiating corona discharge at the knife-edges.

A smaller and simpler version of the machine was demonstrated in 1961 by J. D. N. Van Wyck and G. J. Kühn in South Africa. This motor consisted of a plastic disk about three millimeters thick and 40 millimeters in diameter supported in the horizontal plane by a slender shaft that turned in jeweled bearings. Six radially directed needle points grazed the rim of the disk at equal intervals. When the machine operated from a source of from 8000 to 13000 volts, rotational speeds of up to 12000 revolutions per minute were measured.

I made a corona motor with Plexiglas tubing two inches in diameter and one and a half inches long. It employed stiffbacked single-edge razor blades as electrodes. The bore of the tube was lined with a strip of aluminum foil, a stratagem devised in Jefimenko's laboratory to increase the voltage gradient in the vicinity of the electrodes and thus to increase the amount of charge that can be deposited on the surface of the cylinder. I coated all surfaces of the razor blades except the cutting edges and all interconnecting wiring with "anticorona dope", a cementlike liquid that dries to form a dielectric substance that reduces the loss of energy through corona discharges in nonproductive portions of the circuit.

The axial shaft that supports the cylinder on pivot bearings was cut out of a steel knitting needle. The ends of the shaft were ground and polished to 30 degree points. To form the points I chucked the shaft in an electric hand drill, ground the metal against an oilstone and polished the resulting pivots against a wood lap coated with tripoli.

The bearings that supported the pivots were salvaged from the escapement mechanism of a discarded alarm clock. A pair of indented setscrews could be substituted for the clock bearings. The supporting frame was made of quarter-inch Lucite. The motor can be made self-starting and unidirectional by slanting the knife-edges. Those who build the machine may discover, as I did, that the most difficult part of the project, balancing the rotor, is encountered after assembly. The rotor must be balanced both statically and dynamically.

Static balance was achieved by experimentally adding small bits of adhesive tape to the inner surface of the aluminum foil that lines the cylinder until the rotor remained stationary at all positions to which it was set by hand. When the rotor was balanced and power was applied, the motor immediately came up to speed, but it shook violently. I had corrected the imbalance caused by a lump of cement at one end of the rotor by adding a counterweight on the opposite side at the opposite end of the cylinder. Centrifugal forces at the ends were 180 degrees out of phase, thus constituting a couple.

The dynamic balancing, which is achieved largely by cut-and-try methods, took about as much time as the remainder of the construction. To check for dynamic balance suspend the motor freely with a string, run it at low speed and judge by the wiggle where a counterweight must be added. Adhesive tape makes a convenient counterweight material because it can be both applied and shifted easily.

I made the motor as light and frictionless as possible with the objective of operating it with energy from the earth's field. The field was tapped with an antenna consisting of 300 feet of No. 28 gauge stranded wire insulated with plastic. It is the kind of wire normally employed for interconnecting electronic components and is available from dealers in radio supplies.

The upper end of the wire was connected to a 20-foot length of metallic tinsel of the kind that serves for decorating a Christmas tree. The tinsel functioned as multiple needle points. Strips cut from window screening would doubtless work equally well.

The upper end of the tinsel was hoisted aloft by a cluster of three weather balloons. Such balloons, each three feet in diameter, and the helium to inflate them are available from

the Edmund Scientific Co. (300 Edscorp Building, Barrington, N.J. 08007). The weight in pounds that a helium-filled balloon of spherical shape can lift is roughly equal to a quarter of the cube of its radius in feet. To my delight the motor began to run slowly when the tinsel reached an altitude of about 100 feet. At 300 feet the rotor made between 500 and 700 revolutions per minute.

A note of warning is appropriate at this point. Although a 300-foot vertical antenna can be handled safely in fair weather, it can pick up a lethal charge during thunderstorms. Franklin was incredibly lucky to have survived his celebrated kite experiment. A European investigator who tried to duplicate Franklin's observations was killed by a bolt of lightning. The 300-foot antenna wire can hold enough charge to give a substantial jolt, even during fair weather. Always ground the lower end of the wire when it is not supplying a load, such as the motor.

To run the motor connect the antenna to one set of electrodes and ground the other set. Do not connect the antenna to an insulated object of substantial size, such as an automobile. A hazardous charge can accumulate. Never fly the balloon in a city or in any other location where the antenna can drift into contact with a high-voltage power line. Never fly it below clouds or leave it aloft unattended.

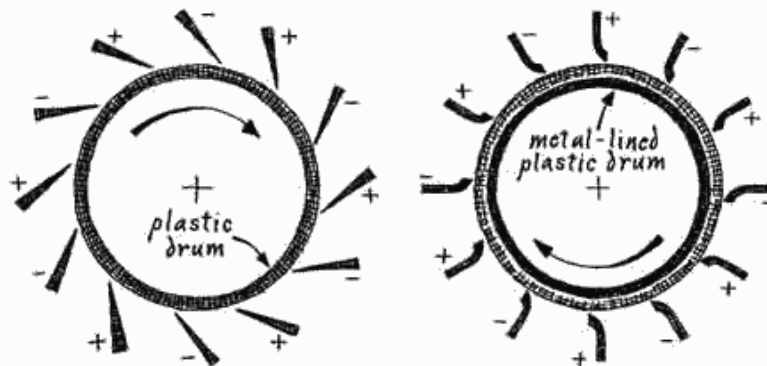


Fig 3 - Conventional electrodes (left) and improved electrodes (right)

A variety of corona motors have been constructed in Jefimenko's laboratory. He has learned that their performance can be vastly improved by properly shaping the corona-producing electrodes [ see Fig 3 ]. The working surface of the rotors should be made of a fairly thin plastic, such as Plexiglas or Mylar. Moreover, as I have mentioned, the inner surface of the cylinder should be backed by conducting foil to enhance the corona. Effective cylinders can be formed inexpensively out of plastic sewer pipe. Corona rotors can of course also be made in the form of disks.

One model consists of a series of disks mounted on a common shaft. Double-edged electrodes placed radially between adjacent disks function much like Poggendorff's combs. This design needs no foil lining or backing because a potential gradient exists between electrodes on opposite sides of the disks. It is even possible to build a linear corona motor, a design that serves to achieve translational motion. A strip of plastic is placed between sets of knife-edge electrodes slanted to initiate motion in the desired direction.

Notwithstanding the problem of handling potentials on the order of a million volts without effective insulation materials, Jefimenko foresees the possibility of at least limited application of corona power machines. In *The Physics Teacher* (March, 1971) he and David K. Walker wrote: "These motors could be very useful for direct operation from high-voltage d.c. transmission lines as, for example, the 800 kV Pacific Northwest-Southwest Intertie, which is now being constructed between the Columbia River basin and California. It is conceivable that such motors could replace the complex installations now needed for

converting the high-voltage d.c. to low-voltage a.c. All that would be required if corona motors were used for this purpose would be to operate local low-voltage a.c. generators from corona motors powered directly from the high-voltage d.c. line."

As Jefimenko points out, a limiting factor of the corona motor is its required minimum potential of 2 000 volts. This limitation is circumvented by a novel electrostatic motor invented in 1961 by a Russian physicist, A. N. Gubkin. The motor is based on an electret made in 1922 by Mototaro Eguchi, professor of physics at the Higher Naval College in Tokyo.

An electret is a sheet or slab of waxy dielectric material that supports an electric field, much as a permanent magnet carries a magnetic field. Strongly charged carnauba-wax electrets are available commercially, along with other electrostatic devices, from the Electret Scientific Company (P.O. Box4132, Star City, W.Va. 26505). A recipe for an effective electret material is 45 percent carnauba wax, 45 percent water-white rosin and 10 percent white beeswax. Some experimenters substitute Halowax for the rosin.

The ingredients are melted and left to cool to the solid phase in a direct-current electric field of several thousand volts. The wax continues to support the field even though the external source of potential is turned off [ see "The Amateur Scientist" column, SCIENTIFIC AMERICAN, November 1960, and July 1968 ]. The electret reacts to neighboring charges exactly as though it were a charged electrode, that is, it is physically attracted or repelled depending on the polarity of the neighboring electrode.

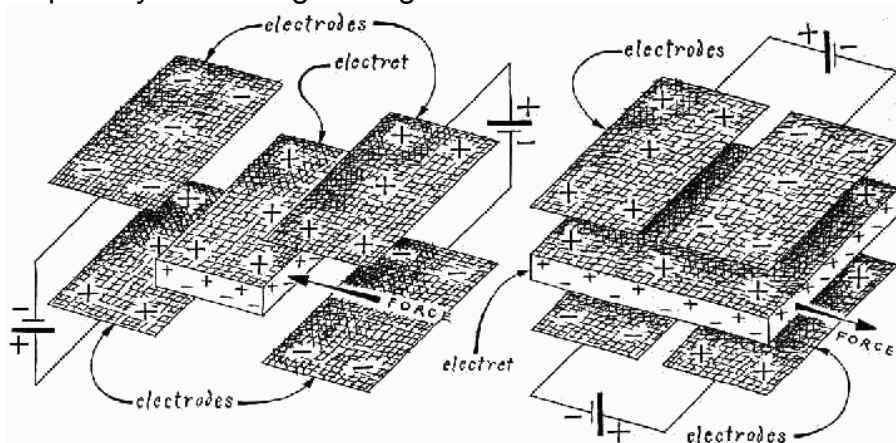


Fig 4 - Scheme of A.N. Gubkin's electret (left) and slot-effect motor (right)

Gubkin harnessed this effect to make a motor. The rotor consisted of a pair of electrets in the shape of sectors supported at opposite ends of a shaft. The center of the shaft was supported transversely by an axle. When the rotor turned, the electrets were swept between adjacent pairs of charged metallic plates, which were also in the form of sectors.

The plates were electrified by an external source of power through the polarity-reversing switch known as a commutator. The commutator applied to the electrodes a charge of polarity opposite to the charge of the attracted electret. As the electret moved between the attracting plates, however, the commutator switched the plates to matching polarity. The alternate push and pull imparted momentum to the rotor in exact analogy to Franklin's motor.

Gubkin's motor was deficient in two major respects. The distances between the electrodes and the electrets were needlessly large, so that the forces of attraction and repulsion were needlessly weak. Moreover, during the electret's transit between electrodes its surfaces were unshielded. Unshielded electrets attract neutralizing ions from the air and lose their charge within hours or days.

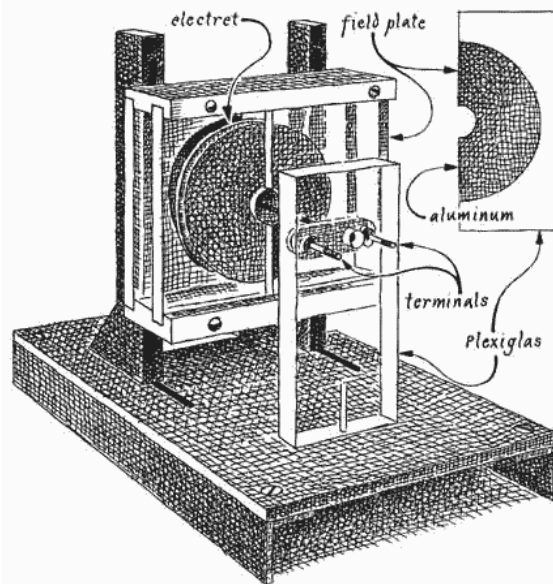


Fig 5 - Jefimenko's slot-effect electret motor

Both inherent deficiencies of Gubkin's motor have been corrected in Jefimenko's laboratory by taking advantage of what is termed the slot effect. Instead of sandwiching the electret alternately between pairs of metal plates, Jefimenko employs opposing pairs of adjacent plates [ see Fig 5 ]. The adjacent plates are separated by a narrow slot. When adjacent plates carry charges of opposite polarity, the electret experiences a force at right angles to the slot and in the plane of the electret. The strength of the force is at a maximum because the electret is close to the electrodes. Simultaneously the electrodes function as shields to prevent the neutralization of the electret by free ions.

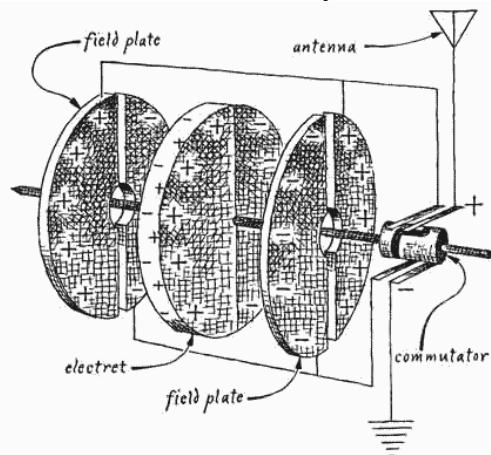


Fig 6 - Circuit arrangement for the slot-effect electret motor

Motors based on the slot effect can be designed in a number of forms. One design consists of an electret in the shape of a wafer-thin sheet of Mylar supported by a flat disk of balsa wood 100 millimeters in diameter and three millimeters thick. (A long-lasting charge is imparted to the Mylar by immersing it in a field of a few thousand volts from an electrostatic generator after the motor is assembled.) This rotor is sandwiched between four semicircular sectors that are cross-connected [ see Fig 6 ].

The electret is mounted on a four-millimeter shaft of plastic that turns in jeweled bearings. The conducting surfaces of the commutator consist of dried India ink. The brushes



are one-millimeter strips of kitchen aluminum foil. The motor operates on a few microwatts of power.

Jefimenko has demonstrated a similar motor that was designed to turn at a rate of about 60 revolutions per minute and develop a millionth of a horsepower on a 24-foot antenna having a small polonium probe at its upper end. (By emitting positive charges probes of this type tap the earth's field somewhat more efficiently than needle points do.) The performance of the motor easily met the design specifications. The charm of these motors lies in the fact that, although they do not accomplish very much, they can run forever.

## Bibliography

- 1) ATMOSPHERIC ELECTRICITY. J. Alan Chalmers. Pergamon Press, 1968.
- 2) ELECTROSTATIC MOTORS: THEIR HISTORY, TYPES AND PRINCIPLES OF OPERATION. Oleg D. Jefimenko. Electret Scientific Company, 1973.
- 3) ELECTROSTATICS AND ITS APPLICATIONS. Edited by A. D. Moore. John Wiley & Sons, 1973.

5-[http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2003/07/23\\_motor.shtml](http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2003/07/23_motor.shtml)

Acessado em 27.04.06

Reportagem de 23 de julho de 2003

**Comentário:** Este é uma reportagem que ilustra bem a atual fase dos motores eletrostáticos. Na era da nanotecnologia, estes motores se tornam indispensáveis, pois são eles que podem ser facilmente (com a atual tecnologia) construídos em escalas nanométricas.

### **Physicists build world's smallest motor using nanotubes and etched silicon** **By Robert Sanders, Media Relations**

**BERKELEY** – Only 15 years after University of California, Berkeley, engineers built the first micro-scale motor, a UC Berkeley physicist has created the first nano-scale motor - a gold rotor on a nanotube shaft that could ride on the back of a virus.

"It's the smallest synthetic motor that's ever been made," said Alex Zettl, professor of physics at UC Berkeley and faculty scientist at Lawrence Berkeley National Laboratory. "Nature is still a little bit ahead of us - there are biological motors that are equal or slightly smaller in size - but we are catching up."

Zettl and his UC Berkeley graduate students and post-docs report their feat in the July 24 issue of *Nature*.

The electrostatic motors represent a milestone in nanotechnology, and prove that nanotubes and other nanostructures several hundred times smaller than the diameter of a human hair can be manipulated and assembled into true devices.

Zettl and other scientists had previously made transistors from nanotubes, but this device is different, he said.

"It's the first device where you can put external wires on it and have something rotating, something you can control," he said. "We are pushing a lot of different technologies to the edge."

Such motors could have numerous uses, Zettl said. Because the rotor can be positioned at any angle, the motor could be used in optical circuits to redirect light, a process

called optical switching. The rotor could be rapidly flipped back and forth to create a microwave oscillator, or the spinning rotor could be used to mix liquids in microfluidic devices. The motor is about 500 nanometers across, 300 times smaller than the diameter of a human hair. While the part that rotates, the rotor, is between 100 and 300 nanometers long, the carbon nanotube shaft to which it is attached is only a few atoms across, perhaps 5-10 nanometers thick.

In 1988, UC Berkeley electrical engineering professor Richard Muller and colleagues in the Berkeley Sensor & Actuator Center (BSAC) fabricated from silicon the world's first operating micromotor. Their electrostatic motor was 100 microns across, or about the width of a human hair.

While the microelectromechanical system (MEMS) motor still awaits appreciable industrial application, Muller said, other actuated MEMS devices have become commonplace. MEMS accelerometers, in part based on micromachining technology developed in BSAC, are now used in almost all automobile airbag deployment systems and in many heart pacemakers. MEMS micromirror arrays are vying with liquid-crystal arrays in state-of-the-art display projectors.

"Even at the time of its invention, the micromotor was more a demonstration that designers had the sophistication to produce actuated mechanisms of micrometer size," said Muller, now a Professor in the Graduate School at UC Berkeley. "Similarly, Professor Zettl's achievement demonstrates controlled nanometer actuation, which opens a new realm for controlled manipulations. Right now, some applications appear to be significant for interactions with similarly sized biological specimens, and that's very exciting."

"Rich Muller has been a true inspiration for us. He did a fantastic thing," Zettl said. "When I look at his original motor, it's a work of art, it's very beautiful. But it looks huge to me now."

"We are trying to use some of the pioneering ideas that he and his collaborators had back then, but clearly this is a new phenomenon."

One unexpected difficulty, for example, is that the techniques for measuring the motor's speed are as yet too crude. The team's scanning electron microscope (SEM) can take pictures every 33 milliseconds and no faster, so they can't tell whether the rotor spins or flips faster than 30 times per second.

"We assume you could go much, much faster than that, probably to microwave frequencies," Zettl said. "There's no way we can detect that right now, but in principle the motor should be able to run that fast."

Microwave frequencies, common in communication networks, are above a billion cycles per second, in the gigahertz frequency range.

The motor's shaft is a multiwalled nanotube, which consists of nested nanotubes much like the layers of a leek. Welded both to the rotor and fixed anchors, the rigid nanotube allows the rotor to move only about 20 degrees. However, the team was able to break the outer wall of the nested nanotubes to allow the outer tube and attached rotor to freely spin around the inner tubes as a nearly frictionless bearing.

To build the motor, Zettl and his team made a slew of multiwalled nanotubes in an electric arc and deposited them on the flat silicon oxide surface of a silicon wafer. They then identified the best from the pile with an atomic force microscope, a device capable of picking up single atoms.

A gold rotor, nanotube anchors and opposing stators were then simultaneously patterned around the chosen nanotubes using electron beam lithography. They then selectively etched the silicon to create a trough beneath the rotor with sufficient clearance for the rotor to rotate. A third stator was already buried under the silicon oxide surface.

When the stators were charged with up to 50 volts of direct current, the gold rotor deflected up to 20 degrees, which was visible in the SEM. With alternating voltage, the rotor rocked back and forth, acting as a torsional oscillator. Such an oscillator, probably capable of microwave frequency oscillations from hundreds of megahertz to gigahertz, could be useful in many types of devices - in particular, communications devices such as cell phones or computers.

With a strong electrical jolt to the stators, the team was able to jerk the rotor and break the outer wall of the nested nanotubes, allowing the rotor to spin freely on the nested nanotube bearings. Zettl had made similar bearings several years ago, but this was the first time he had put them to use.

"The real breakthrough came a couple of years ago, when we discovered a method for peeling shells off multiwalled nanotubes and grabbing the core with a homemade nano-manipulator operating inside a transmission electron microscope (TEM)," Zettl said. "We showed that you could pull out the cores and they really did slide, they really did behave as a bearing. That technological leap allowed us to go full bore on the motor and really have confidence we could make it in the laboratory."

Interestingly, the rotor does not continue spinning for long once the electricity is turned off. It is so small that it has little inertia, so any tiny electric charges remaining on the device after it's turned off tend to stop the rotor immediately.

"The nanoworld is weird - different things dominate," Zettl said. "Gravity plays no role whatsoever and inertial effects are basically nonexistent because things are just so small, so that little things like residual electric fields can play a dominant role. It's counter intuitive."

Zettl expects to be able to reduce the size even further, perhaps by a factor of five. For the moment, though, he and his team are trying to make basic quantum measurements, such as the conductance through the nanotubes and the amount of friction in the bearings.

"There are many very fundamental questions we are trying to answer," he said. "The flip side is, we've got this incredibly neat little motor that's smaller than any other electric motor - let's try to integrate it into some larger architecture where people are making microelectromechanical devices or nanoelectromechanical devices. People will build on this."

Zettl's collaborators on the paper are graduate students A. M. Fennimore, T. D. Yuzvinsky and John Cumings and post-docs Wei-Qiang Han and M. S. Fuhrer. Fuhrer now is with the Department of Physics at the University of Maryland, College Park. Cumings is now with the Department of Physics at Stanford University.

The work is supported by the National Science Foundation and the Office of Energy Research of the U.S. Department of Energy.

6-[http://www.feiradeciencias.com.br/sala11/11\\_04.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala11/11_04.asp), acessado em 30.05.06.

**Comentário:** Este anexo também é obra do Prof. Luiz Ferraz Netto (assim como o primeiro anexo do relatório). Na página encontramos explicações de como construir fontes de energia eletrostática, inclusive informações de como construir o gerador com tubo de PVC e a garrafa de Leyden com tubo de filme fotográfico.

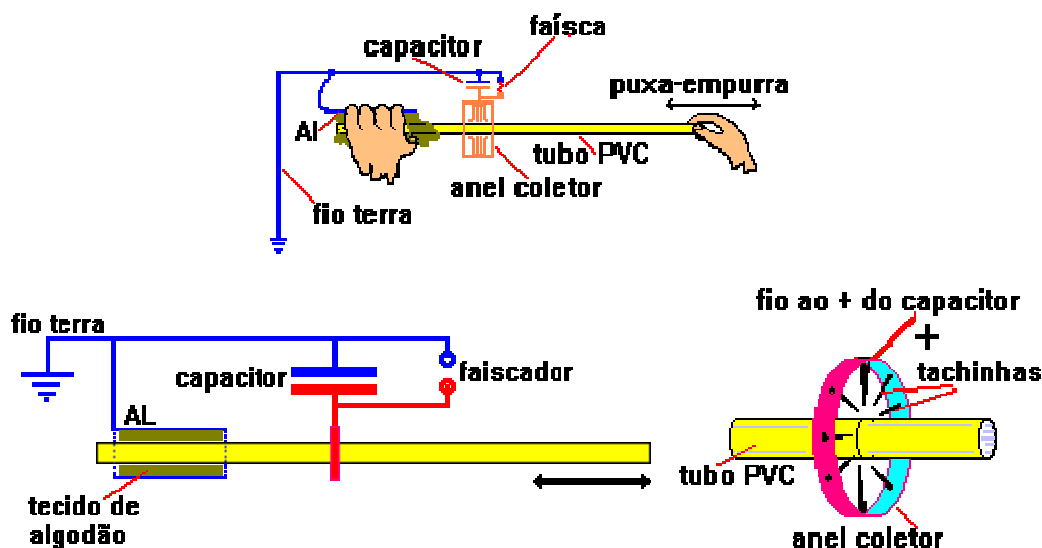
## **Máquina elétrica com tubo de PVC**

### **Material**

Cerca de 80 cm de tubo de PVC de 3/4 de polegada (medida comercial); um pedaço de tecido de algodão; um pedaço de papel alumínio; fio de cobre flexível comum; embalagem plástica de filme 35 mm, anel metálico; tesoura; faca; cola.

### Montagem

Usemos das figuras a seguir para comentar a montagem básica dessa máquina elétrica:



A máquina, no seu todo, consiste em um tubo de PVC que, durante seu movimento de vai-vem, é atritado com o tecido de algodão e passa próximo a umas tantas pontas metálicas coletoras de carga elétrica.

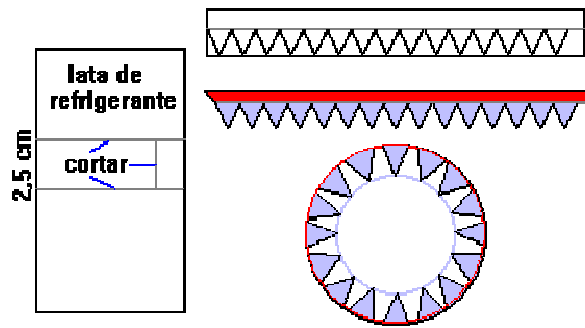
A pessoa que vai operá-lo, simplesmente segura o tecido com a mão esquerda embrulhando-o ao redor do tubo. Esse tubo passa por dentro do anel coletor. Com a mão direita o tubo é empurrado e puxado com golpes sucessivos.

Os detalhes construtivos são os seguintes:

Anel coletor: consta de um anel metálico de chapa fina (material cortado de uma lata de refrigerante) tendo em sua periferia cabeças de tachinhas (ou pequenos pregos) que foram espetadas em direção radial e sentido para o centro do anel. Uma gota de cola branca pode ser esparramada sobre as cabeças dessas tachinhas para mantê-las no lugar. Se o aparelho for operado totalmente solto esse coletor pode ser substituído por um simples anel metálico, uma vez que sempre encostará ao tubo durante as operações empurrar-puxar.

Uma opção menos trabalhosa para essa coleira, com pontas para dentro, pode ser a seguinte:

1. Corte de uma lata de refrigerante uma tira de 2,5 cm de largura;
2. Faça nessa tira uma série de dentes de 1,5 cm de comprimento em toda sua extensão (comprimento da circunferência da lata);
3. Dobre esses dentes em ângulo de 90° em relação ao plano da tira;
4. Dobre a tira fazendo um anel.
5. Ajuste o diâmetro desse anel de modo que as pontas dos dentes fique cerca de 1 ou 2 mm distantes do tubo de PVC.



Essa coleira coletora de cargas elétricas deve ser ligada a uma das armaduras de um capacitor para alta tensão (uma garrafa de Leyden, por exemplo). Um modo para montar um modelo simples de "garrafa de Leyden", a partir de uma embalagem plástica para filmes de 35 mm, pedaços de papel alumínio e fio de cobre comum é:

1. Cole na face interna da embalagem plástica uma tira de papel alumínio (deixe livre uma extensão de 1 cm da borda da embalagem) a qual será a armadura interna do capacitor;
2. Cole na face externa dessa embalagem, outra tira de papel alumínio, envolvendo-a lateralmente, a qual será a armadura externa do capacitor (deixe livre uma extensão de 1 cm da borda da embalagem);
3. Amarre um fio de cobre (descascado e lixado) ao redor da embalagem, mantendo bom contato com a tira externa de alumínio. Após torcer o fio, deixe 10 cm de pontas livres (uma das pontas fará parte do faiscador e a outra será ligada ao ponto de aterramento).

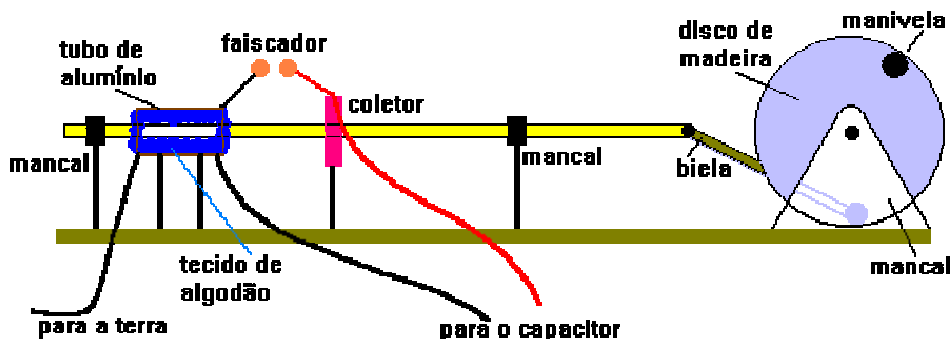


4. Faça um furo no centro da tampa da embalagem e passe por ele um pequeno parafuso de cabeça redonda. Deixe uma porca por cima da tampa e outra por baixo. Essas porcas permitem fixar dois pedaços de fio de cobre desencapados e lixados; um externo que será ligado ao anel coletor de cargas e um interno que ficará encostado na tira de alumínio interna (armadura interna).
5. Aproxime um dos fios ligados à armadura externa da cabeça desse parafuso (deixe um espaço de cerca de 5 mm). A cabeça do parafuso e a orelha na extremidade livre desse fio externo constituem nosso faiscador.

Outro detalhe construtivo importante, para manter o corpo do operador ao potencial elétrico zero, é envolver o tecido de algodão com um pedaço de papel alumínio e este, por sua vez, mediante um fio de cobre, deve ser ligado a um ponto de potencial elétrico zero (potencial elétrico convencionalizado para a Terra). Esse aterramento pode ser feito ligando-se tal fio a uma torneira (em local com tubulação metálica para a água), a uma esquadria

metálica de janela ou ao terminal de terra do cordão de força do computador (terminal com três pinos).

Opcionalmente, com um pouco de engenhosidade e capricho, toda a montagem pode ser feita sobre uma base de madeira e ser acionada por um sistema de biela e manivela, em lugar de manter tudo suspenso com a mão esquerda. Eis uma sugestão:



Nessa montagem, o tecido de algodão (que pode ser substituído por papel toalha) fica dentro de um tubo metálico de diâmetro maior que aquele do tubo (um pedaço de 15 cm de tubo de alumínio ou de ferro de 3 polegadas, serve perfeitamente). Mesmo sem o disco de madeira, apenas usando a mão em lugar da biela, essa montagem é a recomendada.

#### Procedimento

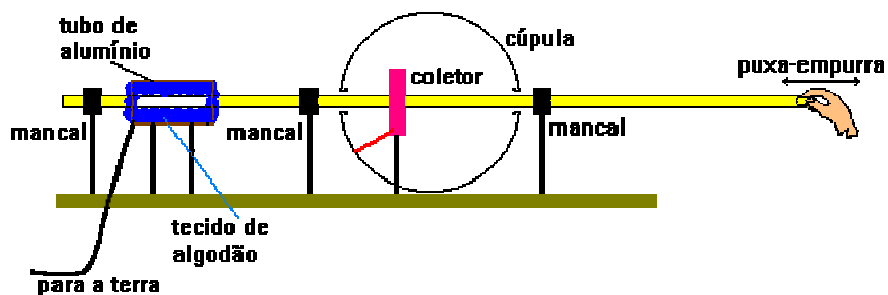
Como já sugerido, basta mover o tubo de PVC empurrando-o e puxando-o em golpes sucessivos. Com bom atrito e com o faiscador com a abertura indicada consegue-se ver (e também ouvir) uma faísca a cada golpe.

Retirando-se o capacitor do circuito, a faísca só será vista em quarto escuro e faiscador com abertura de 2 mm. Em compensação, se dois desses capacitores forem ligados em paralelo o efeito será notoriamente acentuado. Com o faiscador com abertura de 2cm ou mais, só se obtém fortes faíscas após vários golpes do tubo de PVC. A carga armazenada nesse capacitor (mantendo o faiscador fora de ação) pode ser utilizada para fazer funcionar o motor eletrostático de garrafas.

### Funcionamento

Essa máquina segue passo a passo o funcionamento de um gerador de Van De Graaff, só falta a cúpula (ou domo coletor)! E, na falta dessa, acrescentamos o capacitor de Leyden. Percebeu que o tubo de PVC nessa máquina desempenha o mesmo papel que a correia no gerador de Van De Graaff?

Será que você percebeu as demais semelhanças? Veja essa ilustração onde eliminamos o faiscador e substituímos o capacitor por uma cúpula com furos diametralmente oposto:



7-<http://www.coe.ufrj.br/~acmq/leydenpt.html>, acessado em 30.05.06.

**Comentário:** Página conta um pouco sobre a garrafa de Leyden.

## A Garrafa de Leyden



A "garrafa de Leyden" é um tipo de capacitor de alta tensão de uso comum em eletrostática. Na forma usual atualmente (últimos 200 anos...), Consiste em um pote cilíndrico de material altamente isolante, com uma folha metálica fixada por fora e outra fixada por dentro. Um terminal atravessando a tampa do pote faz contato com a folha interior, e um anel metálico faz contato com a folha exterior, constituindo assim os dois terminais do capacitor.

O dispositivo foi inventado independentemente, em 1745, por Von Musschenbroek, em Leiden (ou Leyden), Holanda, a partir de uma experiência de seu amigo Cunaeus, e por Von Kleist na Pomerânia. Na forma original era apenas uma garrafa com água dentro e um fio servindo de terminal interior, com a mão do experimentador servindo de terminal exterior. Logo foi aperfeiçoada até a forma que ainda é usada. Foi a primeira forma prática encontrada para o acúmulo de significantes quantidades de carga elétrica. Antes eram usados grandes condutores metálicos, que armazenavam carga em suas "capacitâncias de corpo", mas sempre em pequena quantidade. Com a garrafa de Leyden, quantidades suficientes para produzir fortes faíscas elétricas podiam ser armazenadas, o que logo levou ao melhor entendimento das propriedades da eletricidade. Serviam também para impressionantes demonstrações, como dar choques elétricos em cadeias de centenas de voluntários (?) de mãos dadas. A forma, em que o terminal de alta tensão é bem isolado no interior, ainda é conveniente para um capacitor de alta tensão.

Para construir uma garrafa de Leyden, pode-se usar um pote, garrafa ou copo alto de plástico ou vidro, com tampa. Plásticos isolam bem melhor que vidro. O material deve ter espessura adequada, e não deve ter rachaduras ou juntas, que podem romper com a tensão. Vidro, se usado, deve ser envernizado ou encerado, para melhorar a isolação superficial. Particularmente adequados para este uso são caixas de comprimidos efervescentes (vitamina C). A tampa com sílica gel contribui para deixar o interior seco, e assim altamente isolante. As folhas que formam as placas do capacitor podem ser de folha de alumínio, não muito fina para maior solidez de construção e bem alisada. A placa externa deve ser colada ao pote, ou ao menos fixada com fita adesiva. A placa interna pode ser deixada solta, já que tenderá a assumir a forma correta. O terminal central deve ser de arame grosso (alumínio ou latão, mais fáceis de dobrar e com boa aparência), terminado em um gancho e uma bola. O ideal é uma bola metálica, mas uma bola de outro material qualquer também serve, já que o propósito principal é o de evitar escape de eletricidade por "efeito corona" na ponta do terminal. Fazer um anel na ponta do fio do terminal também é efetivo. O terminal central deve tocar a placa interna. Isto pode ser facilmente conseguido enrolando um arame mais fino no fio do terminal, dentro da caixa, e dobrando-o de forma que ele faça pressão contra a placa externa em dois pontos opostos. O terminal externo pode ser feito com um fio de latão enrolado como na figura. Faz-se um anel em uma das pontas, e passa-se o fio em volta da garrafa e por dentro do anel (como em um cinto). Ao dobrar a ponta para fora o anel fica firmemente preso à garrafa. Um outro anel dá o acabamento.

Com caixas de comprimidos se consegue capacitâncias de uns 50 pF, mais ou menos dependendo da altura das placas metálicas, com isolação suficiente para uns 60 kV. Com potes maiores, capacitâncias de centenas de pF podem ser conseguidas, e isolações suficientes para poucas centenas de kV. Para capacitâncias maiores, várias garrafas podem ser ligadas em paralelo, formando uma bateria de capacitores. Para maiores tensões, várias garrafas podem ser ligadas em série. Deve-se notar que capacitores de valor elevado em alta tensão são perigosos, devido à alta energia dos choques que podem causar. Para o uso com máquinas eletrostáticas, 50 a 100 pF é mais que o suficiente para a produção de brilhantes faíscas, sem maiores riscos. Note que a forma usual de conectar garrafas de Leyden a máquinas eletrostáticas bipolares é usar duas garrafas, uma com o terminal interno ligado a cada terminal da máquina, com os terminais externos interligados por um fio. A capacitância efetiva é a metade da capacitância de uma garrafa, mas a isolação é dobrada.