

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA**  
**MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL NO ENSINO DE FÍSICA – MNPEF**  
**POLO – 47**

**PRODUTO EDUCACIONAL**

**GUIA EXPERIMENTAL PARA O ESTUDO DA ELETROSTÁTICA**

- ELETROSCÓPIO**
- ELETRÓFORO**
- CAPACITOR CILÍNDRICO**
- GARRADA DE LEYDEN**
- GERADOR DE VAN DE GRAAFF**

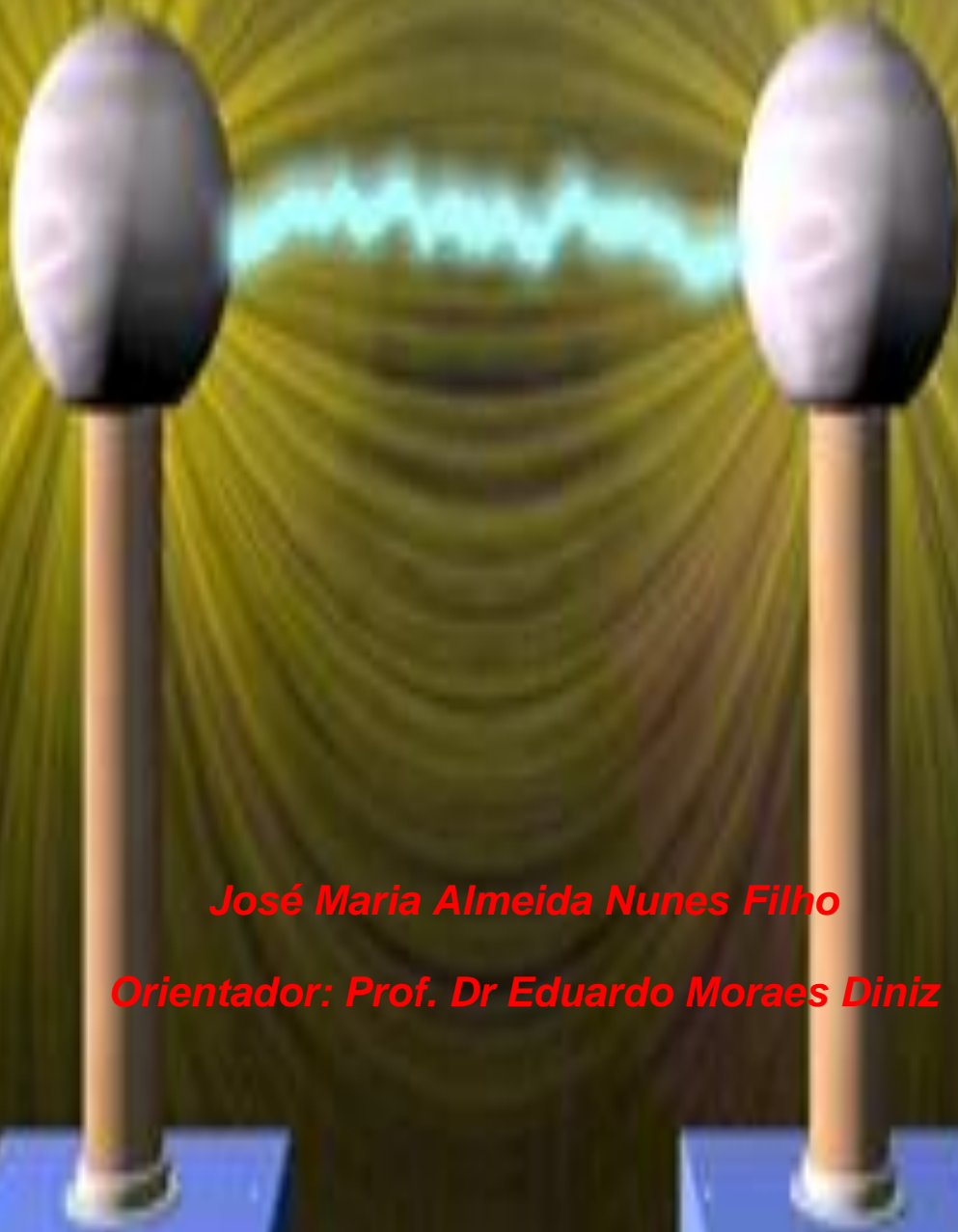
**Autor: José Maria Almeida Nunes Filho**

**Orientador: Prof. Dr Eduardo Moraes Diniz**

**SÃO LUÍS - MA**

**2020**

**PRODUTO EDUCACIONAL**  
**GUIA EXPERIMENTAL PARA O ESTUDO DA**  
**ELETROSTÁTICA**



*José Maria Almeida Nunes Filho*

*Orientador: Prof. Dr Eduardo Moraes Diniz*

**@ José Maria Almeida Nunes Filho – 2020.**

Este documento possui o livre acesso à leitura e produção desde que citada a sua fonte de produção. As imagens apresentadas são de propriedade do autor e utilizadas para fins didáticos. Este documento é veiculado gratuitamente, sem nenhum tipo de retorno comercial, e visa somente a divulgação do conhecimento científico.

## APRESENTAÇÃO

Caro professor (a)

Na tentativa de contornar a problemática da falta de laboratórios de ciências nas escolas públicas e buscando um maior envolvimento dos alunos no processo de ensino-aprendizagem, a proposta desse produto educacional, é a produção de um conjunto de experimentos potencialmente significativos de eletrostática com materiais de baixo custo. Nesse produto educacional são apresentados 5 tipos de instrumentos para realização das atividades: eletroscópio, eletróforo, capacitor cilíndrico, garrada de Leyden e o gerador de Van de Graaff.

Trata-se de um guia de experimental de eletrostática, com todas as orientações necessárias para a confecção dos instrumentos, além da abordagem dos conceitos físicos que envolvem o funcionamento de cada um desses instrumentos, e claro, uma série de propostas de atividades experimentais, onde são abordados conceitos da eletrostática como: carga elétrica, processos de eletrização, condutores e isolantes, potencial elétrico, campo elétrico, configuração de linhas de força, poder das pontas, ruptura dielétrica, condutor em equilíbrio eletrostático, dentre outros. Essas atividades experimentais são do tipo de verificação, baseadas no modelo de classificação de Araújo e Adib (2003). A atividade experimental de verificação é utilizada para verificar a existência de uma lei ou determinado fenômeno. Nessa metodologia, o aluno participa ativamente do processo de confecção e manipulação dos experimentos.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>ELETROSCÓPIOS .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1</b>	<b>Construção de um eletroscópio retângular .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2</b>	<b>Experiências com o uso do eletroscópio retângular .....</b>	<b>9</b>
2.2.1	Carregando o eletroscópio por contato.....	9
2.2.2	Comportamento condutor ou isolante em materiais sólidos.....	10
2.2.3	Comportamento condutor ou isolante em líquidos.....	11
2.2.4	Ruptura dielétrica do ar .....	12
<b>2.3</b>	<b>Construção de um eletroscópio de casca cilíndrica .....</b>	<b>13</b>
<b>2.4</b>	<b>Experiências com o uso do eletroscópio de casca cilíndrica .....</b>	<b>14</b>
2.4.1	Eletrizando o eletroscópio de casca cilíndrica .....	14
2.4.2	Eletrizando a casca cilíndrica por indução. ....	15
<b>2.5</b>	<b>Construção de um eletroscópio retângular de 2 bases .....</b>	<b>17</b>
<b>2.6</b>	<b>Experiências com o uso do eletroscópio de 2 bases.....</b>	<b>18</b>
2.6.1	Eletrizando o eletroscópio de 2 bases .....	18
2.6.2	Dobrando um retângulo de papel eletrizado .....	18
<b>2.7</b>	<b>Construção de um eletroscópio de ponta.....</b>	<b>20</b>
<b>2.8</b>	<b>Atração entre um corpo carregado e filetes de líquidos diferentes.....</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>ELETRÓFORO.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1</b>	<b>Experimentos com o uso do eletróforo .....</b>	<b>24</b>
3.1.1	Eletrizando o coletor de cargas.....	24
<b>4</b>	<b>CONDENSADORES OU CAPACITORES .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>Construindo um capacitor cilíndrico.....</b>	<b>25</b>
<b>4.2</b>	<b>Experimentos com o capacitor cilíndrico .....</b>	<b>26</b>
4.2.1	Carregando o capacitor cilíndrico .....	26
4.2.2	Descarregando o capacitor .....	27
<b>5</b>	<b>CONSTRUINDO UMA GARRADA DE LEYDEN .....</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>O GERADOR DE VAN DE GRAAFF.....</b>	<b>29</b>
<b>6.1</b>	<b>A estrutura do GVDG.....</b>	<b>30</b>
<b>6.2</b>	<b>Montagem do gerador de Van de Graaff .....</b>	<b>40</b>
<b>6.3</b>	<b>Síntese do funcionamento do GVDG .....</b>	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>TEORIAS QUE ENVOLVEM O FUNCIONAMENTO DO GVDG .....</b>	<b>51</b>
<b>7.1</b>	<b>Poder das pontas.....</b>	<b>51</b>

7.2	Ruptura dielétrica .....	54
7.3	Processos de eletrização .....	55
7.4	Condutor em equilíbrio eletrostático – Lei de Gauss.....	58
7.5	O balde de gelo de Faraday e a cúpula de descarga do GVDG .....	61
8	PROPOSTAS DE ATIVIDADES EXPERIMENTAIS COM O USO DO GVDG.....	64
8.1	Calculo do potencial na superfície externa da cúpula do GVDG .....	64
8.2	Cálculo da quantidade de carga acumulada na cúpula de descarga do GVDG 65	
8.4	Testando a extensão da faísca produzida pelo do GVDG .....	68
8.5	Linhas de força em um dipolo elétrico.....	69
8.6	Linhas de força entre dois eletrodos com cargas de mesmo sinal .....	72
8.7	Linhas de força entre dois eletrodos planos e paralelos entre si .....	75
8.8	Blindagem eletrostática .....	78
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	80
10	REFERÊNCIAS .....	82

## 1 INTRODUÇÃO

A proposta didática que norteia esse produto educacional, é baseado no modelo da aprendizagem significativa de Ausubel. Na teoria de Ausubel, o conhecimento prévio do aluno, chamado de subsunçor, é o elemento principal (MOREIRA e MASINI, 2006). A partir desse conhecimento prévio é que o aluno irá adquirir novos conhecimentos. Os conhecimentos prévios (subsunçores) seriam os suportes em que o novo conhecimento se apoiaria (MOREIRA e MASSINI, 2006). Além dos subsunçores, Ausubel preconiza outras duas condições para que a aprendizagem significativa ocorra: a não-arbitrariedade do material e a disponibilidade do indivíduo. A não-arbitrariedade do material indica que o material a ser apresentado ao indivíduo, deve ter relação com os conhecimentos prévios existentes na sua estrutura cognitiva (MOREIRA e MASSINI, 2006). Quando existe essa relação lógica e explícita entre o material apresentado e os conhecimentos prévios do aprendiz, o material é considerado potencialmente significativo. Nesse contexto, as atividades experimentais propostas nesse produto educacional, vão de encontro às ideias de Ausubel.

Fazendo uma relação com a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, em uma situação de ausência de subsunçores, por exemplo, a atividade experimental pode ser implementada a fim de alcançar um organizador prévio, que futuramente pode ser ancorado na estrutura cognitiva do aluno. Após o processo de ancoragem ter acontecido, esse organizador prévio passa a fazer parte dos subsunçores (MOREIRA e MASSINI, 2006). Nesse caso, a atividade experimental é realizada antes da introdução do conceito a ser aprendido. Se as atividades experimentais forem realizadas após a abordagem inicial dos conteúdos, os alunos já teriam os subsunçores necessários para a aquisição de novos conhecimentos. Dessa forma, as atividades experimentais constituem um material potencialmente significativo.

Em relação à disponibilidade do indivíduo em aprender, outro pilar da teoria de Ausubel (MOREIRA e MASSINI, 2006), a experimentação possibilita ao professor alternativas para facilitação do processo de ensino-aprendizagem relacionadas aos conteúdos de eletrostática, despertando o interesse do aluno com o tema. As atividades experimentais representam uma metodologia mais dinâmica e investigativa, que estimula competências e habilidades cognitivas e motoras dos

estudantes. A partir do manuseio dos equipamentos e instrumentos, sempre com orientação e supervisão do professor, os alunos colocam em prática as informações vistas na sala de aula, o que facilita e estimula o aprendizado. Além disso, as atividades experimentais ampliam a integração entre os alunos, e entre eles e o professor. O resultado é a fácil compreensão e assimilação dos conteúdos da disciplina. Nos capítulos e sessões seguintes, são apresentados todos os instrumentos a serem confeccionados, as atividades experimentais propostas, assim como as teorias que envolvem essas atividades.

## **2 ELETROSCÓPIOS**

O eletroscópio, sem dúvidas, é um dos instrumentos mais importantes da eletrostática. O eletroscópio nos permite, entre outras coisas, verificar se um material é condutor ou isolante. Sobre esse conceito, é importante observar que alguns materiais, que no senso comum da maioria das pessoas são materiais isolantes, em experimentos de eletrostática eles se comportam como condutores. Podemos citar como exemplos desses materiais, alguns tipos de borracha, assim como a madeira crua. O eletroscópio também nos permite verificar se um corpo está ou não eletrizado. Usaremos o eletroscópio para discussão de outros conceitos, como poder das pontas e distribuição de cargas em um condutor. Como em toda a extensão desse trabalho, partimos de um ponto crucial: o uso de materiais de baixo custo e de fácil acesso.

### **2.1 Construção de um eletroscópio retangular**

#### **Materiais necessários:**

- 1 pedaço de cartolina de 10 cm x 7 cm;
- 1 copinho de café de plástico;
- Gesso mole;
- Fita adesiva ou cola para fixação dos elementos do eletroscópio;
- 1 canudo de plástico;
- 1 tira de papel de seda de 2mm de largura e 7 cm de comprimento.

#### **Montagem:**



O eletroscópio que construímos, é um modelo bastante simples. Optamos por esse modelo por conta da facilidade de acesso aos materiais necessários. Para esse modelo utilizamos o pedaço de cartolina com 10 cm de altura e 7 cm de comprimento. Para a base, foi utilizado um copinho plástico de café, que foi preenchido com gesso mole. Para a base também poderá ser utilizado uma base de plástico ou de madeira. Introduzimos o canudo plástico no gesso ainda mole, pois ele irá endurecer. Esse canudo irá sustentar a cartolina. Para fixar a cartolina no canudo plástico, utilizamos os dois pedaços de fita adesiva, mas poderá ser usado cola para a fixação. Por fim, utilizamos a tira fina de papel de seda de 2mm de largura e aproximadamente 7 cm de comprimento, que foi colada na parte da frente do eletroscópio. A figura 1 mostra a ilustração do eletroscópio montado.

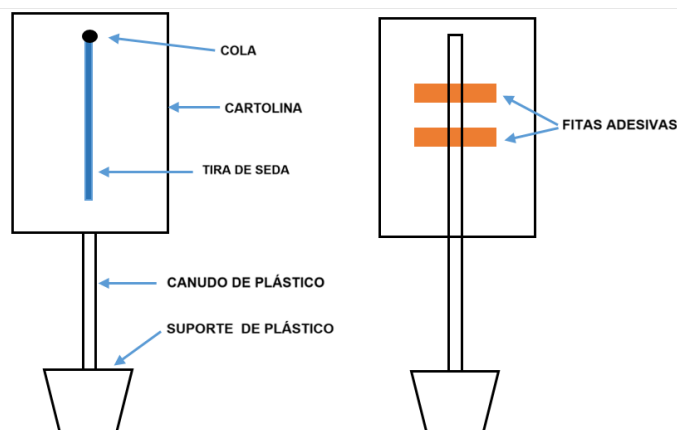


Figura 1: À esquerda a parte da frente do eletroscópio, e à direita a parte de trás.

Nesse eletroscópio, o papel de seda e a cartolina funcionam como condutores. Já o canudo de plástico e a base feita com copo plástico são isolantes, evitando a fuga das cargas elétricas do eletroscópio para a terra.

## 2.2 Experiências com o uso do eletroscópio retangular

### 2.2.1 Carregando o eletroscópio por contato

**- Subsunçores necessários para a realização dessa atividade: eletrização por atrito, eletrização por contato.**

Para eletrizar o eletroscópio por contato, utilizamos uma régua de acrílico, que ao ser atritada com o cabelo de uma pessoa ou com um guardanapo de papel se eletriza por atrito. Podemos também utilizar um canudo de plástico. O importante é que esse material seja um bom isolante. Em seguida, raspamos a régua na parte de cima do eletroscópio. Dessa forma o eletroscópio ficará eletrizado com carga de mesmo sinal da régua ou canudo. Dizemos que o eletroscópio foi eletrizado por contato. A figura 2 ilustra esse experimento.

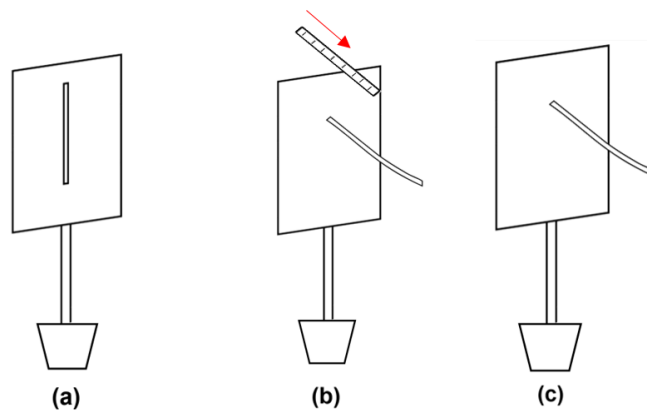


Figura 2: Eletrização do eletroscópio.(a) o eletroscópio está neutro;(b) eletroscópio sendo eletrizado por contato com a régua eletrizada; (c) o eletroscópio continua eletrizado após a régua ser afastada.

### 2.2.2 Comportamento condutor ou isolante em materiais sólidos

**-Subsunção necessário para a realização dessa atividade: definição de material condutor e isolante.**

Nessa experiência o objetivo é observar se um material é condutor ou isolante. Para isso tocamos na superfície do eletroscópio com materiais diferentes. Se o material for um bom isolante e estiver neutro, o eletroscópio não será descarregado, já no caso de tocarmos o eletroscópio com um material condutor, ele será descarregado. Inicialmente tocamos o eletroscópio com o dedo, depois com uma régua de acrílico neutra, e por último com um arame de metal. Observando a figura 3, vemos que tanto ao tocar o eletroscópio com o dedo(a) e com o pedaço de arame(b), a fita de papel desce, indicando que o eletroscópio foi descarregado. Já ao tocar o eletroscópio com a régua de acrílico neutra(c), a fita se mantém levantada, o que indica que o eletroscópio continua eletrizado. Concluímos então que tanto o corpo humano quando o arame de metal são bons condutores, enquanto a régua de acrílico

neutra se mostra um material isolante. Por questões práticas, utilizaremos o símbolo de aterramento para representar o toque com o dedo no eletroscópio, já que ao tocá-lo estamos de fato, ligando o eletroscópio à terra.

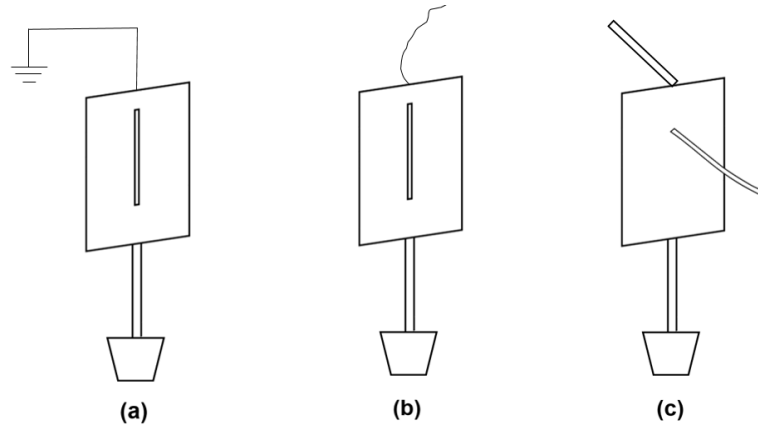


Figura 3: Tocando o eletroscópio carregado com diferentes tipos de materiais.

### 2.2.3 Comportamento condutor ou isolante em líquidos

**-Subsunçor necessário para a realização dessa atividade: definição de material condutor e isolante.**

Nesta proposta de experimento usaremos dois tipos de líquido na tentativa de descarregar o eletroscópio. Inicialmente vamos utilizar a água. O procedimento é simples: Mergulhe um dos cantos do eletroscópio eletrizado em um recipiente com água. Observa-se que a tirinha abaixa, e ao retirar o eletroscópio da água, a tira de papel continua abaixada, demonstrando que ao entrar em contato com a água o eletroscópio é descarregado. Logo, conclui-se que a água se comporta como um material condutor. A figura 4 ilustra esse experimento.

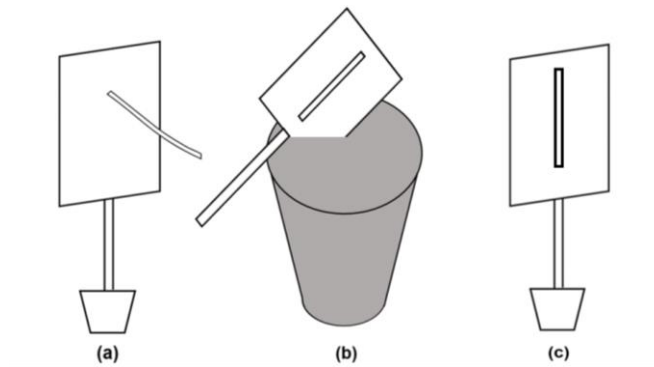


Figura 4: (a) Eletroscópio inicialmente carregado, ao entrar em contato com a água, descarrega-se (b). Ao ser retirado da água o eletroscópio se mantém descarregado (c).

Repetimos o experimento, mas dessa vez mergulhamos o eletroscópio carregado em um recipiente com óleo de cozinha. Verificamos que ao entrar em contato com o óleo a tirinha do eletroscópio permanece levantada, demonstrando assim que o eletroscópio não foi descarregado. Conclui-se então que o óleo de cozinha se comporta como material isolante. A figura 5 ilustra esse experimento.

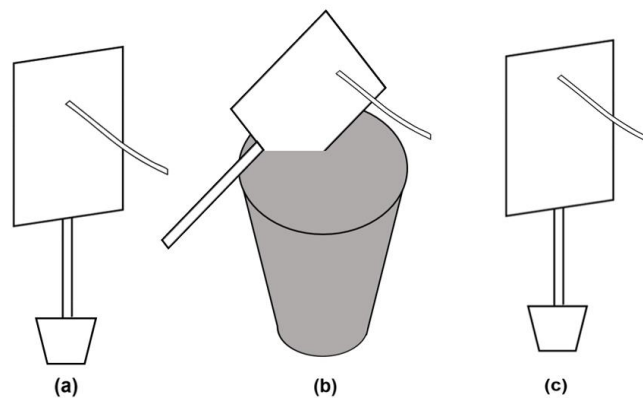


Figura 5: (a) Eletroscópio inicialmente carregado, ao entrar em contato com o recipiente com óleo vegetal, continua carregado (b). Ao retirar o eletroscópio do recipiente com óleo vegetal, ele se mantém carregado.

#### 2.2.4 Ruptura dielétrica do ar

**-Subsunçor necessário para a realização dessa atividade: rigidez dielétrica do ar.**

Nessa experiência, uma agulha deve ser colocada na parte de trás do eletroscópio, utilizando duas fitas adesivas para fixá-la. Após fixar a agulha, aproximamos um canudo eletrizado por atrito. O canudo deve ser aproximado a uma distância de aproximadamente 1 cm da ponta da agulha. Observa-se que a tirinha de

seda levanta-se com a aproximação do canudo, mas volta para a posição de origem quando o canudo é afastado. Na sequência aproximamos o canudo a uma distância menor, de aproximadamente 2mm. É recomendável aproximar o canudo fazendo movimentos de ida e volta na direção horizontal, tomando cuidado para não tocar a ponta da agulha. Após repetir esse movimento algumas vezes e afastando o canudo eletrizado na sequência, percebemos que a tirinha do eletroscópio se mantém levantada. Podemos observar a ilustração dessa sequência na figura 6.

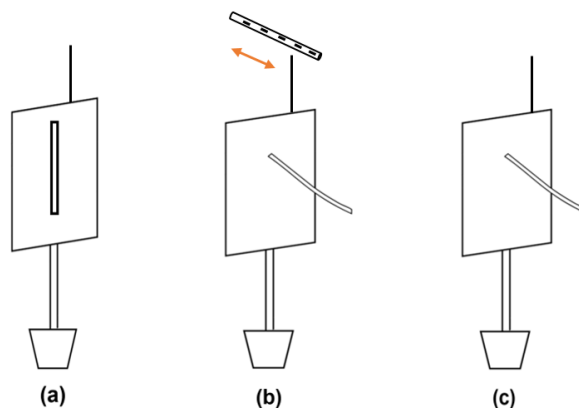


Figura 6: Em (a) o eletroscópio descarregado; Em (b) o canudo eletrizado próximo à agulha sendo movimentado horizontalmente; Em (c) o eletroscópio eletrizado após o afastamento do canudo.

Temos nessa experiência uma situação diferente, já que o eletroscópio não foi eletrizado por nenhum dos meios de eletrização que vimos até aqui: atrito, contato ou indução. Como não houve contato entre o canudo eletrizado e a ponta da agulha do eletroscópio, essa transferência de cargas ocorreu pelo ar. Nessa experiência, as moléculas de ar ao redor da agulha foram ionizadas, fazendo com que esse ar próximo à agulha passasse a se tornar condutor. Esse fenômeno é chamado de *ruptura dielétrica*. O ar sofre ruptura dielétrica quando a diferença de potenciais entre dois de seus pontos ultrapassa um certo valor, conhecido como *rigidez dielétrica*. Para o ar esse valor crítico é de  $3000 \text{ V/mm}$ . Em outras palavras, considerando a distância entre o canudo eletrizado e a ponta da agulha em 2 mm, concluímos que a diferença de potencial entre a ponta da agulha e o canudo eletrizado é da ordem de 6000 V.

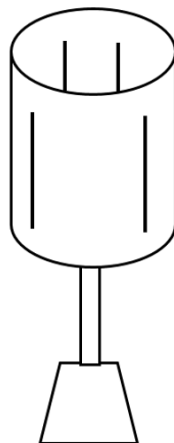
### 2.3 Construção de um eletroscópio de casca cilíndrica

#### Materiais necessários:

- 1 pedaço de cartolina de 10 cm x 25 cm
- 1 canudo de plástico
- Fita adesiva ou cola para fixação dos elementos do eletroscópio
- 4 tiras de papel de seda de 2 mm x 7 cm
- Base utilizada no eletroscópio retangular descrito na seção 2.1

### **Montagem:**

Utilizamos o pedaço de cartolina de 10 cm x 25 cm para formar o cilindro. Fecha-se esse retângulo de cartolina de maneira a formar um cilindro, e utilizamos cola ou fita adesiva para prender as duas extremidades. Utilizamos a mesma base do eletroscópio construído no experimento 2. Colamos o canudo plástico da base por dentro da casca cilíndrica, deixando uma parte do canudo para fora do cilindro. Em seguida, colamos na parte interna do eletroscópio duas tirinhas de papel de seda de aproximadamente 2mm de largura e 7cm de comprimento, deixando um espaço de cerca de 4cm entre elas. Colamos também duas tirinhas da mesma medida do lado externo do eletroscópio, deixando o mesmo espaço entre elas. Na figura 7 temos uma ilustração do modelo desse eletroscópio.



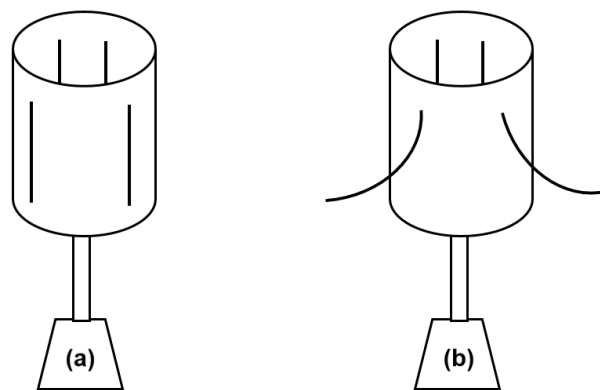
*Figura 7: Eletroscópio de casca cilíndrica*

## **2.4 Experiências com o uso do eletroscópio de casca cilíndrica**

### **2.4.1 Eletrizando o eletroscópio de casca cilíndrica**

**-Subsunçor necessário para a realização dessa atividade: condutor em equilíbrio eletrostático.**

Eletrizamos uma régua de acrílica por atrito, e raspamos na parte de cima da casca cilíndrica. As tirinhas que estão do lado de fora irão se levantar, enquanto as tirinhas que estão do lado de dentro do eletroscópio permaneceram abaixadas. Essa experiência nos mostra o comportamento de um condutor em equilíbrio eletrostático ao ser eletrizado: todas as cargas em excesso se distribuem na sua superfície externa. A figura 8 ilustra essa experiência.



*Figura 8: Em (a) o eletroscópio está neutro. Ao ser eletrizado apenas as tirinhas que estão do lado externo da casca cilíndrica se levantam.*

#### 2.4.2 Eletrizando a casca cilíndrica por indução.

**-Subsunçor necessário para a realização dessa atividade: eletrização por indução.**

Primeiramente, iremos eletrizar uma régua de acrílico ao atritá-la com um guardanapo de papel. Neste caso, a régua irá adquirir carga elétrica resultante negativa. Em seguida, a régua é introduzida no interior da casca cilíndrica, mas sem tocá-la. Observa-se que as tirinhas se levantam. Ao retirar a régua do interior do cilindro, as tirinhas se abaixam. Podemos ver a ilustração desse experimento na figura 9.

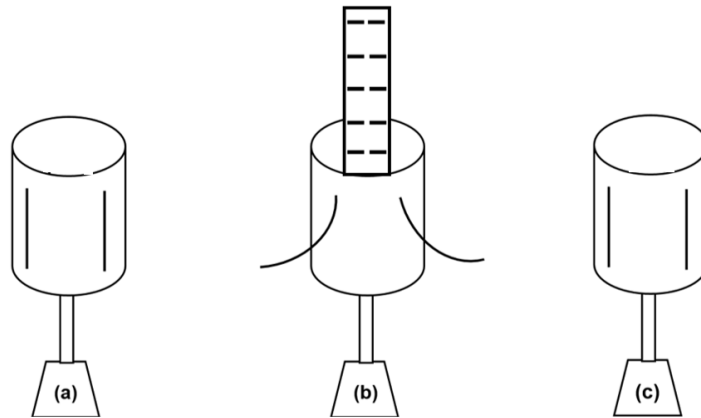


Figura 9: Em (a), a casca cilíndrica encontra-se neutra. Ao introduzir a régua eletrizada no interior da casca, as tirinhas se levantam. Em (c), ao retirar a régua do interior do cilindro, as tirinhas se abaixam.

A presença da régua no interior do cilindro, faz com que as cargas positivas da casca sejam atraídas para o lado interno dela, enquanto as cargas negativas são repelidas. Esse fenômeno é chamado de polarização elétrica. Veja na figura 10.

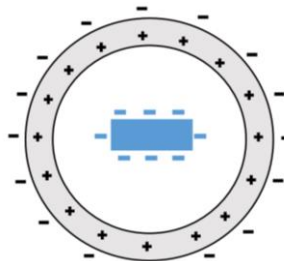


Figura 10: Vista de cima da casca cilíndrica. No centro, em azul, a régua eletrizada negativamente. Ao redor, em preto, a casca cilíndrica com suas cargas elétricas polarizadas.

Nota-se que a simples presença da régua eletrizada no interior da casca cilíndrica, não faz com que a casca se eletrize. Para eletriza-la de fato, devemos anular as cargas que estão de um dos lados do cilindro. Por comodidade, faremos isso com as cargas que estão do lado de fora da casca cilíndrica. Para isso, basta tocar com o dedo do lado de fora da casca com a presença da régua no seu interior, pois dessa forma estaremos aterrando-a, anulando assim as cargas elétricas positivas da casca. Com o toque, percebemos que as tirinhas se abaixam. Em seguida, desfaz-se o contato do dedo com o cilindro, nota-se que as tirinhas continuam abaixadas. Retira-se então a régua do interior do cilindro. As tirinhas se levantam, atestando que



de fato a casca cilíndrica está eletrizada. Esse processo é chamado de eletrização por indução. A ilustração dessa sequência encontra-se na figura 11.

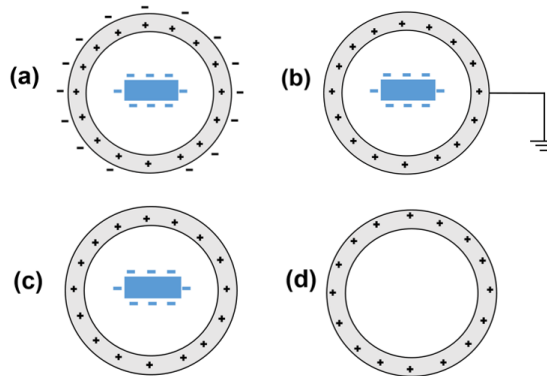


Figura 11: Vista de cima do cilindro. (a) A casca encontra-se com as cargas polarizadas devido à presença da régua eletrizada; (b) A casca é aterrada; (c) Desfaz-se o aterramento na presença da régua eletrizada; (d) Retira-se a régua.

## 2.5 Construção de um eletroscópio retangular de 2 bases

### Materiais necessários:

- 1 pedaço de cartolina de 8 cm x 25 cm
- 2 canudos de plástico
- Fita adesiva ou cola para fixação dos elementos do eletroscópio
- 2 bases (a mesma utilizada nos eletroscópios descritos anteriormente)
- 2 tirinhas de papel de seda de 2 mm x 6 cm

### Montagem:

A montagem desse eletroscópio é semelhante aos eletroscópios descritos anteriormente. A diferença é que utilizaremos um retângulo de comprimento bem maior que a altura. Utilizaremos 2 bases para o apoio, colocando um de cada lado do retângulo de cartolina, deixando um recuo de aproximadamente 1cm em relação às extremidades do retângulo, utilizando cola ou fita adesiva para fixá-las. Em seguida, utilizamos cola para ficar as 2 tirinhas de papel de seda, uma em cada lado do retângulo. Observe a montagem na figura 12.

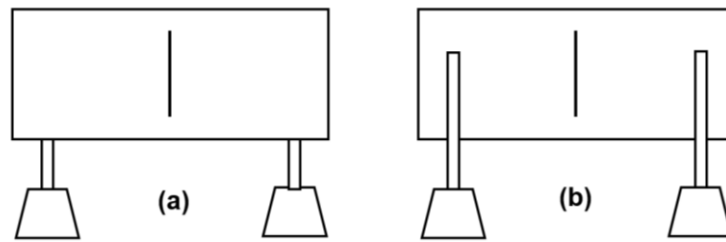


Figura 12: Em (a) temos a vista da parte da frente do; em (b) temos a vista da parte de trás do eletroscópio.

## 2.6 Experiências com o uso do eletroscópio de 2 bases

### 2.6.1 Eletrizando o eletroscópio de 2 bases

**-Subsunçor necessário para a realização dessa atividade: eletrização por contato.**

Eletrizamos o eletroscópio raspando um canudo de plástico eletrizado inicialmente por atrito na parte superior do retângulo de cartolina. O resultado é que as duas tiras se levantam, demonstrando que as duas superfícies (frente e costas) do eletroscópio foram eletrizadas, o que difere da experiência anterior quando utilizamos a casca cilíndrica. Observe o descrito na figura 13.

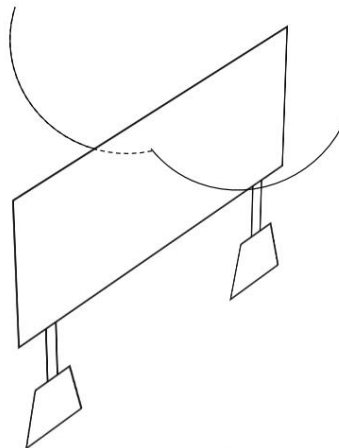
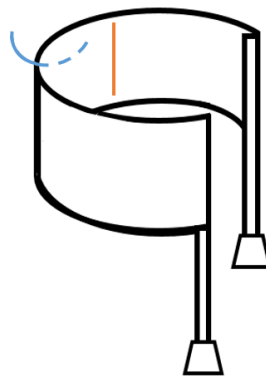


Figura 13: Ao ser eletrizado, as duas tiras do eletroscópio se levantam.

### 2.6.2 Dobrando um retângulo de papel eletrizado

**-Subsunçor necessário para a realização dessa atividade: condutor em equilíbrio eletrostático.**

Para essa experiência, utilizaremos o retângulo de papel eletrizado da experiência anterior (seção 2.3.1.1.) Deve-se tomar cuidado para não descarregá-lo, e para isso devemos manuseá-lo segurando a parte do canudo que não está em contato com a cartolina, pois qualquer toque na superfície da cartolina, fará com que o retângulo se descarregue, já que o corpo humano se comporta como um bom condutor em experimentos de eletrostática. Segurando os dois canudos na região que ele não está em contato com a cartolina, o procedimento é curva-lo devagar, fazendo com que ele vá aos poucos se transformando em uma casca cilíndrica. Observa-se que à medida que se fecha o retângulo, a tirinha de fora levanta-se cada vez mais, enquanto que a tirinha de baixo abaixa-se cada vez mais. Ao fecharmos totalmente o círculo, formando a casca cilíndrica, observamos que a tirinha que ficou do lado de dentro da casca fica totalmente abaixada, enquanto a tirinha que está do lado de fora, fica mais levantada do que estava inicialmente. Observe a ilustração dessa situação na figura 14.



*Figura 14: A linha vermelha representa a tirinha que está do lado de dentro da casca e encontra-se abaixada; a linha azul, representa a tirinha que está na parte externa da casca.*

Esse experimento, nos mostra que em condutores ocos, as cargas elétricas em excesso, sempre se distribuem em sua superfície externa. Essa é uma característica dos condutores em equilíbrio eletrostático. Esse conceito será abordado de forma mais profunda no funcionamento do gerador de Van de Graaff. No experimento 2.3.1.1., as cargas em excesso adquiridas pelo eletroscópio retangular, também se distribuem por toda a sua extensão. O retângulo de cartolina também se encontra em

equilíbrio eletrostático. No experimento em questão, ao curvar a cartolina, as cargas se deslocam de um lado para outro, fazendo com que toda a carga se distribua apenas na superfície externa da casca cilíndrica.

## **2.7 Construção de um eletroscópio de ponta**

### **Materiais necessários:**

- 1 pedaço de cartolina de 7 cm x 17 cm
- 1 canudo de plástico
- 1 base para fixação como as utilizadas nos eletroscópios anteriores
- Fita adesiva ou cola para fixação dos elementos do eletroscópio
- 2 tiras de papel de seda de 2 mm x 7 cm

**-Subsunçor necessário para a realização dessa atividade: poder das pontas.**

### **Montagem:**

Cortaremos o pedaço de cartolina de maneira que ele tenha a forma de uma “tábua de carne”, como mostra a figura ?. Corte a cartolina de forma que o retângulo maior tenha 7 cm de largura e 10 cm de comprimento. A parte mais estreita deve ter 2 cm de largura e 7 cm de comprimento. Cola-se em cada retângulo uma tirinha de papel de seda. Elas devem ter as mesmas dimensões, mesma massa e serem feitas do mesmo material. Usa-se uma régua eletrizada por atrito como nas experiências anteriores para carregar o eletroscópio. Raspa-se a régua no eletroscópio algumas vezes, até que ele se eletrize. Percebe-se que a tirinha que se encontra na região mais pontiaguda levanta-se mais. Isso se deve ao fato de que as cargas em excesso estão mais concentradas nas regiões pontiagudas dos condutores. É o chamado “Poder das pontas”. Na figura 15 vemos o eletroscópio de pontas antes e depois de ser eletrizado.

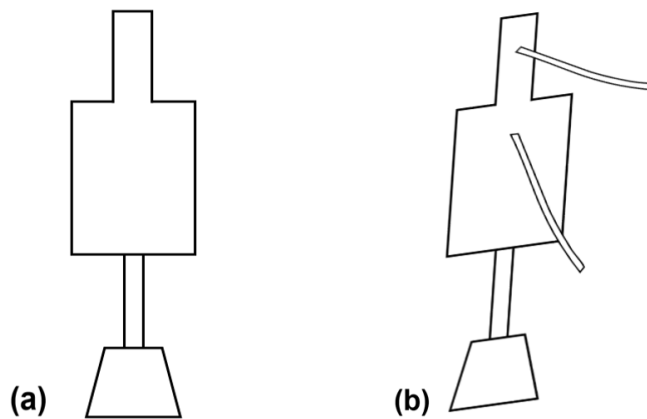


Figura 15: (a) Esquema do eletroscópio; (b) Após ser eletrizado, verifica-se que a tirinha que está na região da ponta se levanta mais, evidenciando que a concentração de cargas nessa região é maior.

## 2.8 Atração entre um corpo carregado e filetes de líquidos diferentes

### Materiais necessários:

- 1 régua de plástico eletrizada
- Garrafa com óleo vegetal

**-Subsunçor necessário para a realização dessa atividade: conceito de material condutor ou isolante.**

### Procedimento:

Faremos essa experiência utilizando água e óleo vegetal como na experiência 4. Inicialmente vamos usar um filete de água, e para isso abrimos uma torneira de forma que a água desça formando um fino fio de água (filete). Aproximamos então uma régua inicialmente eletrizada por atrito com um guardanapo de papel. De preferência aproxime a régua na região do filete mais próximo da torneira, pois nessa região a velocidade de queda da água é menor, assim será mais fácil atrair o filete de água. Faremos a mesma coisa na sequência com o óleo vegetal, e para isso viramos uma garrafa que contenha o óleo de forma a formar também um filete. As figuras 16 e 17 mostram o resultado dos experimentos.

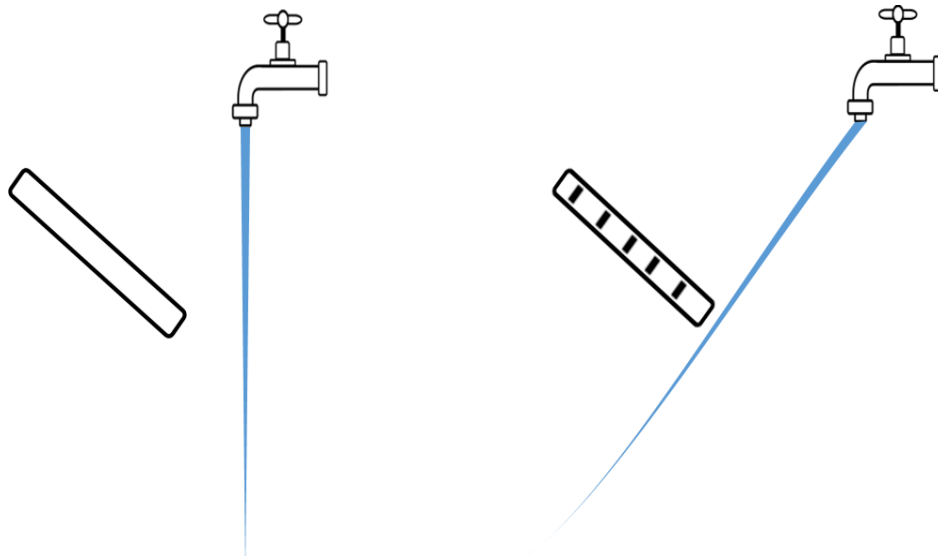


Figura 16: Nada acontece ao aproximar um canudo de plástico neutro do filete de água. Ao aproximar um canudo de plástico eletrizado, o filete de água neutro é atraído.

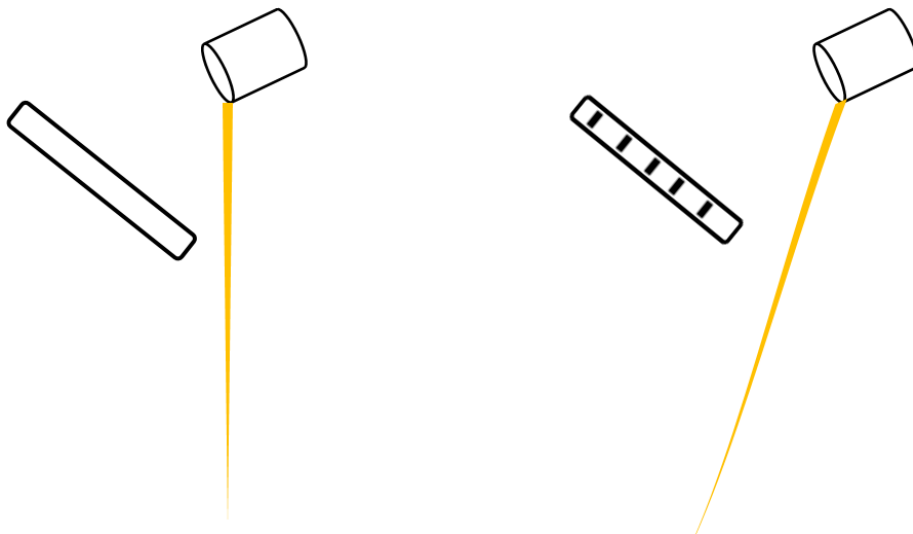


Figura 17: Nada acontece ao aproximar um canudo de plástico neutro do filete de óleo vegetal. Ao aproximar um canudo de plástico eletrizado, o filete de óleo é atraído.

Analisando as figuras 16 e 17, podemos observar que atração sofrida pelo filete de água é maior que a atração sofrida pelo filete de óleo vegetal. Esse é um comportamento que se repete se repetirmos essa experiência com condutores e isolantes. Em geral a atração sofrida pelos condutores é maior que a atração sofrida pelos isolantes.

### 3 ELETRÓFORO

#### Materiais necessários:

- 1 placa de PVC quadrada de 40 cm de lado
- 1 forma de alumínio de 30 cm de diâmetro
- 1 pedaço de cano de PVC de 15 cm de comprimento e 25 mm de diâmetro
- Super cola ou cola quente para fixação do suporte na base

#### Montagem:

O eletróforo é um conjunto formado por duas partes: uma base isolante eletrizada inicialmente, e um coletor de cargas. O material escolhido para a base isolante é uma placa de PVC, dessas utilizadas para forros de residência. Ela deve ser quadrada, de preferência com 40 cm de lado. Para eletrizá-la usaremos um guardanapo de papel através do atrito. O ideal é fazer movimentos em um mesmo sentido para eletrizá-la. Quanto mais você esfregar o guardanapo na placa de PVC, mais eletrizada ela ficará. Pela série triboelétrica, a base de PVC ficará negativamente eletrizada ao ser atritada com o guardanapo de papel. Utilizamos para o coletor de cargas, uma forma de alumínio para pizza de 30 cm de diâmetro. O suporte para a forma pode ser feito com um pedaço de cano de PVC de 25mm de diâmetro. Ele deverá ser fixado no centro da forma, pelo lado de dentro. Para isso pode ser utilizado supercola ou cola quente. Na figura 18 temos um esquema das duas partes do eletróforo.

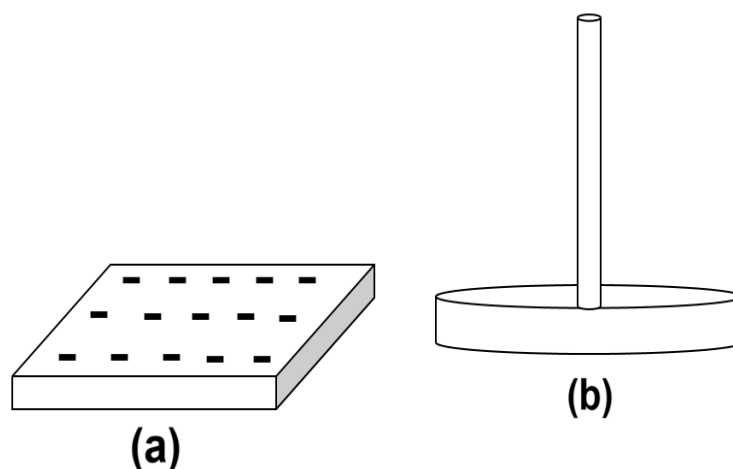


Figura 18: Em (a), a base isolante do eletróforo eletrizada; em (b), o coletor de cargas constituído pelo disco em alumínio com um pedaço de cano de PVC no seu centro.

### 3.1 Experimentos com o uso do eletróforo

#### 3.1.1 Eletrizando o coletor de cargas

**-Subsunçor necessário para a realização dessa atividade: eletrização por indução e eletrização por atrito.**

Para essa experiência, utilizaremos a base isolante de PVC eletrizada por atrito com o guardanapo de papel. Observemos a figura abaixo. A base de PVC está eletrizada negativamente (a). Inicialmente prendemos uma fina tira de papel de seda na parte de dentro do disco de alumínio, utilizando uma fita adesiva. Recomendase que essa tira tenha 10 cm de comprimento e 2 mm de largura. Colocamos então o disco de alumínio do coletor de cargas sobre a base isolante eletrizada (b). Na sequência, tocamos com o dedo na parte de dentro do disco de alumínio(c), retirando-o em seguida(d). Por fim, retiramos o coletor de cargas tomando cuidado em segurá-lo apenas pelo cabo de PVC, sem tocar no disco de alumínio. Observa-se que a tirinha de seda se levanta, atestando que o coletor está eletrizado, como mostra a figura 19.

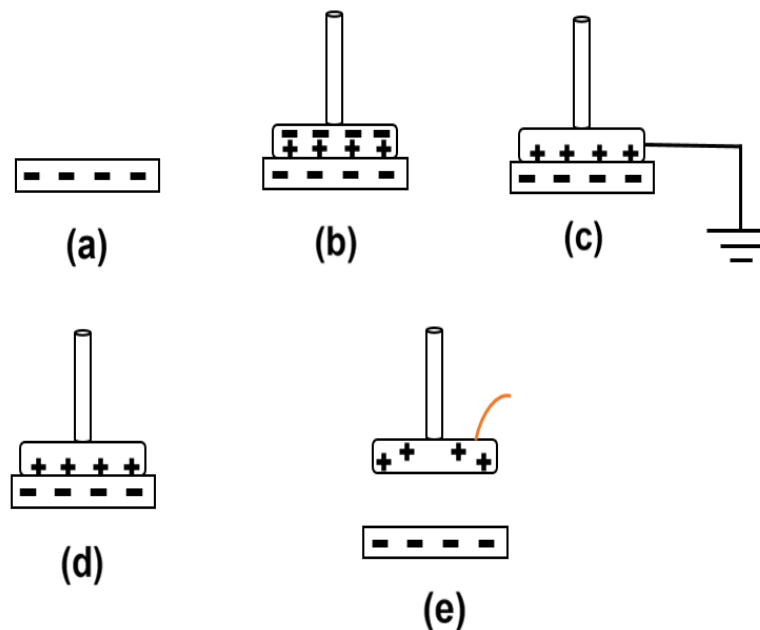


Figura 19: Processo de eletrização do coletor de cargas do eletróforo.



Observa-se também que o eletróforo se eletriza com carga de sinal oposto ao da base isolante eletrizada. É um típico processo de eletrização por indução. É importante ressaltar o grande potencial de eletrização que o eletróforo possui. Você poderá utilizar a base isolante eletrizada diversas vezes, sem que ela se descarregue por completo. O eletróforo pode ser utilizado em qualquer experiência em que se busque eletrizar um corpo por contato ou através da ruptura dielétrica do ar. Utilizaremos posteriormente o eletróforo para carregar uma garrafa de Leyden.

## 4 CONDENSADORES OU CAPACITORES

Condensadores ou capacitores, são instrumentos que tem como principal função armazenar energia elétrica. Os capacitores podem ser planos, esféricos, cilíndricos, ou podem ter ainda a forma de uma garrafa. Descreveremos a construção de dois tipos de capacitores, o plano e o cilíndrico. O primeiro modelo de capacitor criado, é conhecido por *garrafa de Leyden*, e também será descrito aqui a sua construção. Independente do formato, todo capacitor possui uma estrutura básica: dois condutores separados entre si por um isolante (também chamado de dielétrico). É importante então a escolha do material isolante, pois como já dito nas experiências anteriores, alguns materiais que parecem ser isolantes, em experiências de eletrostática demonstram características de condutores.

### 4.1 Construindo um capacitor cilíndrico

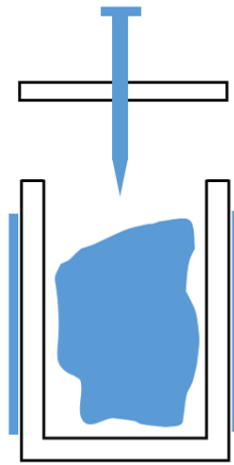
#### **Materiais necessários:**

- 1 pote de plástico de vitamina C ou semelhante
- Palha de aço
- Papel alumínio
- Fita adesiva
- 1 prego de metal

#### **Montagem:**

Para esse capacitor, precisaremos de um corpo cilíndrico de plástico que será usado como dielétrico. Nessa experiência, vamos utilizar um pote de plástico de

vitamina C. Ele tem 10 cm de comprimento, e aproximadamente 3 cm de diâmetro. Dentro do pote, colocaremos uma quantidade de palha de aço até que atinja uma altura de aproximadamente 7cm. Do lado de fora do pote, usaremos uma fita de papel alumínio de 7cm de altura e comprimento suficiente para cobrir a lateral do pote. Para fixar as extremidades da tira de papel alumínio, usaremos um pedaço de fita adesiva. Por fim, introduzimos um prego de metal na tampa do pote de plástico, fazendo com que ele entre em contato com a palha de aço que está dentro do pote. A figura 20 mostra o esquema da montagem.



*Figura 20: Esquema de montagem do capacitor cilíndrico. Em destaque, os materiais condutores na cor azul (palha de aço dentro do pote, prego e papel alumínio no lado externo do pote de plástico (dielétrico)).*

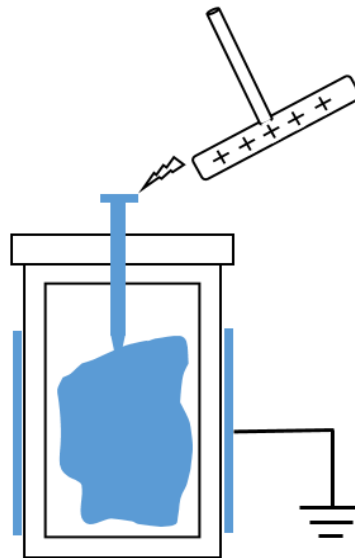
## 4.2 Experimentos com o capacitor cilíndrico

### 4.2.1 Carregando o capacitor cilíndrico

**-Subsunção necessário para a realização dessa atividade: capacitância eletrostática.**

Para carregar o capacitor, utilizaremos o eletróforo construído no capítulo anterior. Primeiramente eletrizamos o disco coletor do eletróforo, através do contato com a base isolante inicialmente eletrizada (seção 3.1.1.). Aterramos o capacitor. Para isso, seguramos o capacitor pela região da fita de papel alumínio (condutor externo). Após isso, aproximamos a borda do disco coletor da cabeça do prego do capacitor. Mesmo sem o contato, o prego será eletrizado pela descarga proveniente da ruptura

dielétrica do ar existente entre o coletor e a cabeça do prego. De qualquer forma, o contato poderá ser feito entre os dois. Repita esse procedimento 10 vezes, assim o capacitor será carregado de forma substancial. A figura 21 ilustra o esquema do capacitor.



*Figura 21: Capacitor sendo carregado pelo coletor de cargas do eletróforo. Mesmo sem o contato, as cargas são transferidas através do ar ionizado. Fonte:*

#### 4.2.2 Descarregando o capacitor

**-Subsunçor necessário para a realização dessa atividade: ruptura dielétrica do ar.**

Para descarregar o capacitor, basta fazer o contato entre os dois condutores (papel alumínio e prego). Para isso utilizamos um pedaço de fio “cabinho” desencapado nas pontas. Pressione uma das pontas desencapadas na tira de papel alumínio (condutor externo), e aproxime a outra ponta desencapada da cabeça do prego. A descarga acontecerá, e o capacitor estará descarregado.

## 5 CONSTRUINDO UMA GARRADA DE LEYDEN

**Materiais necessários:**

- 1 garrada de plástico de 300 ml

- água de torneira
- Peça de arame ou fio de cobre rígido
- Papel alumínio
- Fita adesiva

**Procedimento:**

Como o próprio nome sugere, utilizaremos para uma garrafa como dielétrico para sua construção. Aconselha-se a não usar garrafas de vidro, pois alguns tipos de vidro têm comportamento condutor em experiências de eletrostática. Usaremos então uma garrafa pet de plástico de 300 ml como meio dielétrico. Para o condutor interno enchemos a garrafa com água de torneira. Faremos um furo na tampa da garrafa por onde passará um pedaço de arame ou fio de cobre rígido. Na ponta do fio ou arame, prendemos uma bola feita de papel alumínio. Para o condutor externo, usaremos uma fita de papel alumínio, essa fita deve ter largura um pouco menor que a altura da garrafa, evitando assim seu contato com a terra. Cobrimos então a lateral da garrafa com a fita de papel alumínio, e fixamos com fita adesiva. A figura 22 mostra o esquema da garrafa de Leyden.

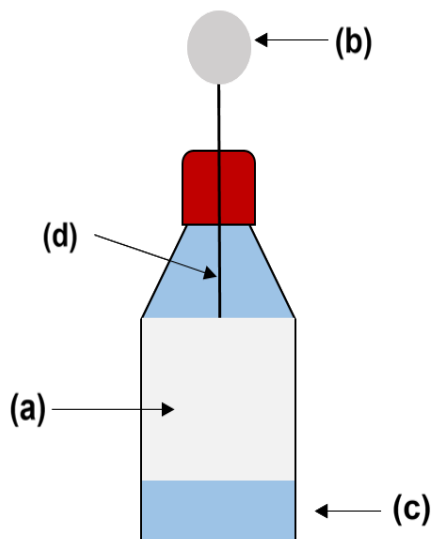


Figura 22: Esquema da garrafa de Leyden. (a) Fita de alumínio; (b) bola de papel alumínio; (c) água; (d) arame.

O procedimento para carga e descarga da garrada de Leyden, são os mesmos usados para carga e descarga do capacitor cilíndrico mostrados nas experiências anteriores. Sobre o funcionamento do capacitor, cujo esquema é mostrado na figura 23, é importante destacar a função do dielétrico entre os condutores, que é exatamente evitar a troca de cargas elétricas entre os condutores. Consideremos que o coletor de cargas do eletróforo esteja eletrizado com carga positiva. Ao aproximá-lo da cabeça do prego, a rigidez dielétrica do ar é rompida, fazendo com que o ar se torne condutor. Nesse caso, cargas elétricas negativas se deslocam em direção ao coletor, fazendo com que o condutor interno do capacitor fique eletrizado com carga também positiva. Como o condutor externo (faixa de alumínio) está aterrado, elétrons são atraídos para sua superfície, fazendo com que ele fique eletrizado com carga negativa. Pelo princípio da atração e repulsão, as cargas elétricas positivas do condutor interno e as cargas positivas do condutor externo se aproximam. Ao ligarmos os condutores através de um fio metálico, há uma neutralização das cargas e o capacitor dessa forma é descarregado.

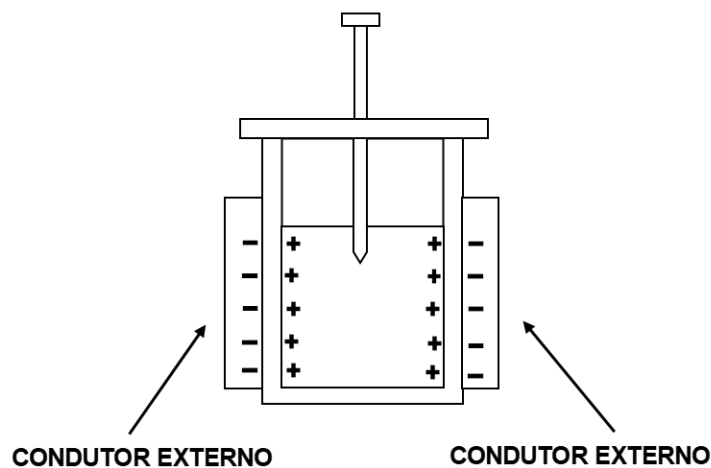


Figura 23: Capacitor carregado. As regiões laterais representam a fita de alumínio (condutor externo).

## 6 O GERADOR DE VAN DE GRAAFF

O gerador de Van De Graaff foi idealizado e construído em 1931, pelo engenheiro americano, Robert Jemison Van de Graaff (1901- 1967). O gerador de Van de Graaff era usado para acelerar partículas, em estudos que buscavam entender

a estrutura do átomo. O projeto de Van de Graaff possuía bolas de alumínio de 4,5 metros de diâmetro, que conseguia produzir tensões de cerca de 2 milhões de volts. Durante décadas, o gerador de Van de Graaff foi usado no Instituto de Física da USP, para sustentar a pesquisa nuclear, sendo aposentado em 1972, foi substituído pelo hoje conhecido “aceleradores Pelletron”.

O gerador de Van De Graaff, trabalha segundo princípios do efeito triboelétrico. É um dispositivo que armazena cargas elétricas em sua cúpula, podendo gerar tensões que superam os 100 mil volts. O modelo didático apresentado aqui, permite realizar demonstrações que contextualizam uma série de fenômenos eletrostáticos, permitindo ao professor dinamizar suas aulas. Por questões práticas, a sigla GVDV (gerador de Van de Graaff), será usada para se referir ao gerador. No presente material, teremos além da toda a descrição para a montagem do GVDG, a teoria física que o envolve e uma sequência de atividades como forma de sugestão para o trabalho em sala de aula.

## **6.1 A estrutura do GVDG**

O layout básico de um GVDV é composto por:

- Uma cúpula ou domo de descarga;
- Uma correia transportadora de cargas elétricas;
- Dois roletes (superior e inferior);
- Duas escovas metálicas (superior e inferior);
- Uma coluna de sustentação;
- Um motor elétrico para o movimento do rolete inferior e correia;
- Um base para fixação do motor, coluna de apoio e escova inferior;

Uma visão geral da estrutura do GVDG é apresentada na figura 24.

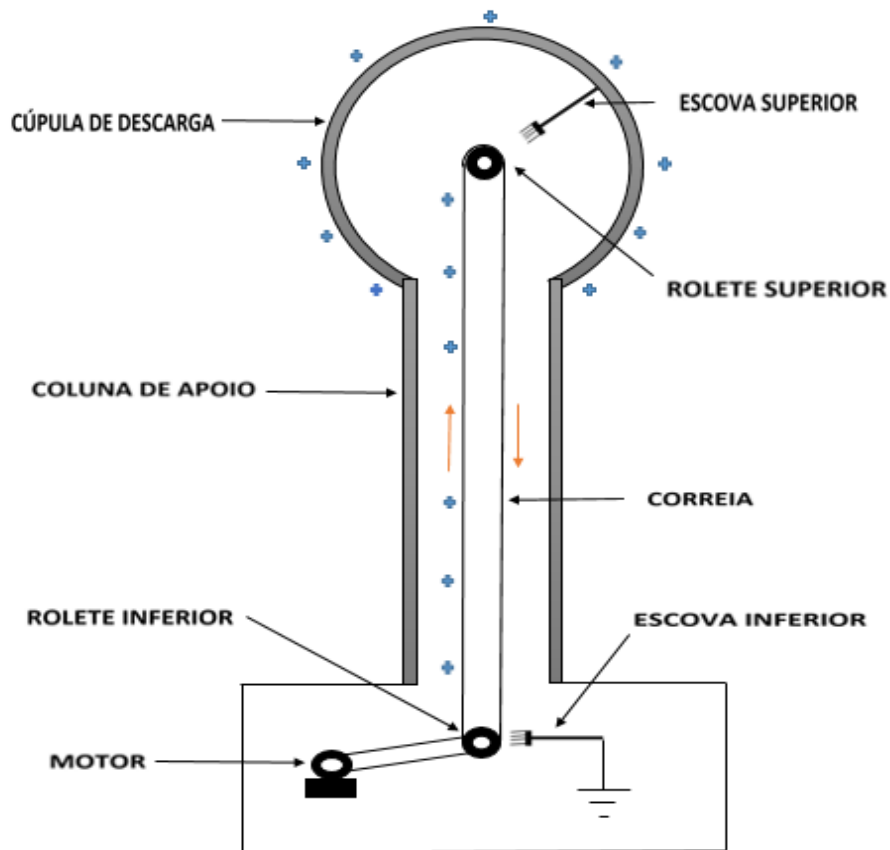


Figura 24. Esquema do GVDG

A seguir, falaremos um pouco sobre cada componente do GVDG, dando sugestões dos materiais que podem ser usados, mas deixando claro que a escolha dos materiais é critério de quem irá construir o GVDG. O mais importante, como veremos a seguir, é a escolha dos materiais dos roletes e da correia, já que o GVDG funciona segundo os efeitos triboelétricos.

### 1- MOTOR

Motores pequenos de uma forma geral funcionam bem no GVDG. Motores de ventiladores ou máquinas de lavar, por exemplo, podem ser utilizados. É relevante lembrar, que a rotação do motor é importante, pois como veremos mais adiante, durante o funcionamento do GVDG cargas elétricas são transportadas pela correia até a cúpula de descarga de forma contínua, a cada ciclo da correia. Assim, motores com maiores velocidades de rotação, dão um poder maior de eletrização ao GVDG.

No modelo construído pelo autor, foi utilizado com muito sucesso um motor de máquina de costura, que possui velocidade de rotação de 7000 rpm. Esse motor é acompanhado por um reostato, que pode ser utilizado para controlar a rotação do motor. Em outros tipos de motores é recomendável (mas opcional) o uso de um Dimmer com triac, para fazer o trabalho de controle de rotação. Uma observação importante, é que os motores que possuem escovas de carvão devem ser evitados, pois o pó formado pelo funcionamento desses motores, podem sujar os componentes do GVDG, ocasionando perdas expressivas em seu funcionamento.

## 2- ROLETES

A escolha dos materiais dos roletes e da correia é, sem dúvida, a parte mais importante na montagem do GVDG, já que é nesse momento em que deve ser observada a série triboelétrica. Alguns materiais por questões de distribuição de elétrons em sua camada de valência, possuem maior tendência em perder elétrons ao serem atritados com outros materiais, ficando dessa forma, eletrizados positivamente. Da mesma forma, outros materiais tem tendência maior a receberem esses elétrons, ficando assim eletrizados negativamente. O sinal da carga armazenada na cúpula do gerador, pode ser determinada de acordo com a escolha dos materiais dos cilindros e da correia. Se escolhermos, por exemplo, para o material do cilindro inferior o PVC, o alumínio para o rolete superior, e a borracha para a correia, a cúpula ficará eletrizada com carga de sinal positivo. Eventualmente, escolhendo materiais diferentes, a cúpula poderá adquirir carga de sinal negativo.

Os cilindros deverão ser de preferência em forma de “barriletes”, ou seja, com o centro mais alto que as extremidades, como mostra a figura 25. Dessa forma, a correia ficaria mais “presa” aos roletes, pois tenderia ao centro dos mesmos, por estar mais elevado em relação às extremidades. Diâmetros próximos de 3 cm para os roletes são recomendados. Os cilindros deverão conter um furo central por onde passarão os eixos. O rolete inferior será comandado pelo motor, ou seja, girará solidário ao seu eixo, para isso o eixo deverá ser colocado sobre pressão. Já o rolete superior, deverá girar livremente sobre seu eixo.



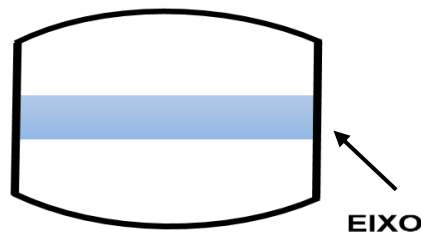


Figura 25: Cilindro em forma de barrilete

É preciso considerar que a proposta em questão para a montagem do GVDG, busca o uso de materiais alternativos e de baixo custo. Para se conseguir roletes em forma de barriletes e com o eixo no seu centro, é necessário o trabalho de um torneiro mecânico, o que sem dúvidas, elevaria em muito os custos, fugindo assim da proposta do trabalho. Uma boa solução para evitar os gastos com tornearia, é a utilização de canos plásticos de PVC, usados em instalações hidráulicas domésticas. Nesse caso, para evitar a fuga da correia, podem ser usados discos nas extremidades dos roletes, como mostrado na figura 26.

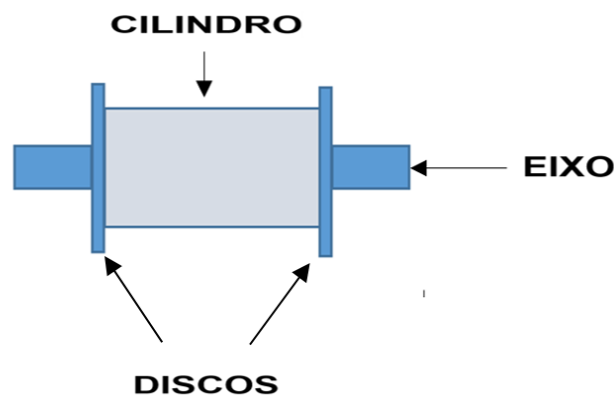
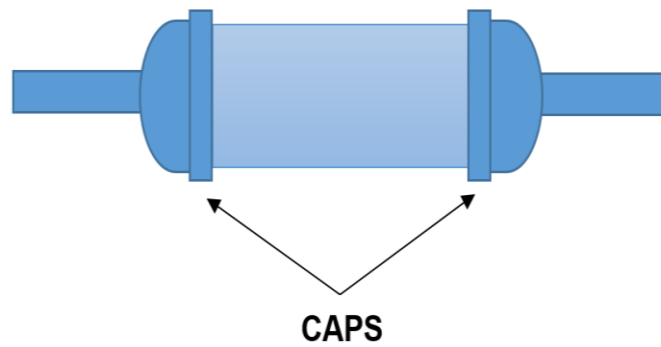


Figura 26: Modelo de rolete com discos nas extremidades.

Uma outra alternativa, é uso de caps nas extremidades do cilindro. Isso criará uma protuberância nas extremidades, evitando a fuga da correia. Nos centros dos caps, deverá ser feito um furo por onde passarão os eixos, como mostra a figura 27. Para travar esse tipo de rolete, é utilizado um sistema de contraporcas que será descrito de forma detalhada posteriormente.



*Figura 27: Modelo de rolete utilizado pelo autor*

### 3- SÉRIE TRIBOELÉTRICA

A tabela a seguir apresenta a série triboelétrica, que servirá de referência para a escolha dos materiais dos roletes e da correia. É imprescindível que os materiais do rolete inferior e da correia sejam isolantes. Idealmente o material da correia é de borracha, assim é recomendável no rolete inferior, o uso de materiais que estão no extremo negativo da série triboelétrica. Dessa forma, após o atrito, a correia irá adquirir carga elétrica positiva, enquanto o rolete inferior, terá carga elétrica negativa. Por consequência, deverá ser escolhido um material do extremo positivo para o rolete superior

Tabela 1: Série triboelétrica. (Fonte: <https://www.infoescola.com/eletrostatica/serie-triboeletrica>)

Pele humana seca	
	Couro
	Pele de coelho
	Vidro
	Cabelo humano
	Nylon
	Lã
	Chumbo
	Pele de gato
	Seda
	Alumínio
	Papel
+	Algodão
	Aço
	Madeira
	Âmbar
	Borracha dura
	Níquel e cobre
	Prata e Latão
	Ouro e Platina
	Poliéster
	Poliuretano
	Polietileno
	Polipropileno
	PVC
	Silicone
	Teflon

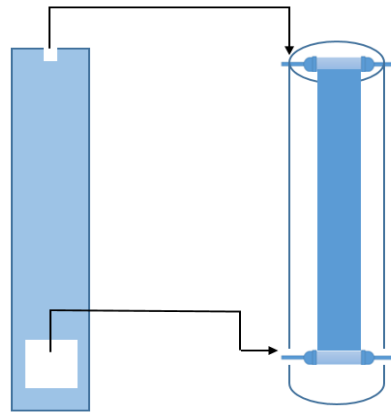
#### 4- CORREIA

Na escolha da correia, dê preferência às borrachas que tem na sua composição materiais com maior resistência ao ozônio, já que o ozônio gerado pelas descargas do GVDG pode causar corrosão na correia. Uma boa alternativa é usar faixas elásticas utilizadas em exercícios de fisioterapia, as faixas “thera bands”. Essas faixas tem em sua composição o Neoprene, material que oferece uma resistência alta ao ozônio. Priorize as cores mais claras, pois borrachas escuras indicam presença de carbono, que também poderá prejudicar o funcionamento do gerador. A correia deve ser perfeitamente retangular, e de preferência use correias que possuem constante de elasticidade menor, pois correias muito “duras” ao serem esticadas, tem uma tendência maior a escapar para as laterais dos roletes.

Em relação ao comprimento da correia, ela deve ter entre  $2/3$  e  $3/4$  da distância que separa o centro dos roletes. Para correias com menor constante de elasticidade, use  $2/3$  como referência, já para correias com maior constante elástica, use a medida de  $3/4$ . Por exemplo, se a distância entre os centros dos roletes for de 50 cm, então a correia deverá ter  $50 \times 2/3 = 33,3$  cm. Já para correias mais difíceis de esticar, a correia deverá ter  $50 \times 0,75 = 37,5$  cm.

#### 5- COLUNA DE APOIO.

É recomendável o uso de tubos de PVC, que por serem fechados, diminuem a incidência de sujeira nos roletes e na correia do GVDG. Foi utilizado pelo autor, um tubo de 100mm de diâmetro. No tubo de PVC deverá ser feito duas aberturas paralelas na parte de baixo, em forma de retângulo, por onde passará o rolete inferior que será acoplado ao eixo do motor. Na parte de cima da coluna, deverão ser feitos dois pequenos rasgos, também paralelos, onde o eixo do rolete superior irá repousar, como mostra a figura 28.



*Figura 28: abertura feita na parte inferior e rasgo feito na parte superior da coluna de apoio, para passagem do rolete inferior e repouso do rolete superior, respectivamente.*

## 6- CÚPULA DE DESCARGA

Toda a carga separada pelo atrito entre o rolete inferior e a correia, será transportada pela correia para a cúpula de descarga através da escova metálica superior. A cúpula de descarga deverá preferencialmente ter a forma esférica. Poderá ser confeccionada inteira ou em duas semiesferas, mas isso demandaria mão-de-obra de um torneiro mecânico, o que foge ao objetivo da proposta original, que é a produção do GVDG com os menores custos possíveis. Uma excelente alternativa é o uso de duas bacias metálicas de salada, que juntas, formarão algo próxima de uma esfera. Na junção das duas bacias, é essencial que se coloque fita isolante, evitando a queda da parte superior do domo de descarga e ao mesmo tempo evitando a fuga de cargas da cúpula do gerador. Na bacia inferior, deverá ser feito um corte circular do fundo, na medida do diâmetro da coluna de apoio, onde a coluna será encaixada. Um esquema da montagem é mostrado na figura 29. Na figura 30 vemos a cúpula de descarga do GVDG já encaixada na coluna de apoio.

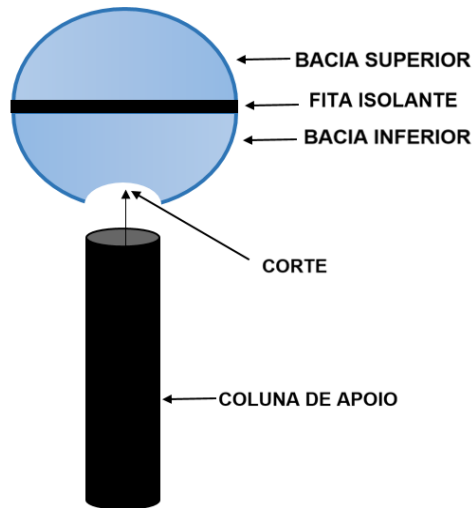


Figura 29: Esquema da cúpula de descarga.



Figura 30: Cúpula de descarga já posicionada na coluna de apoio do GVDG. Autoria própria.

## 7- ESCOVAS METÁLICAS

O GVDG possui duas escovas metálicas que tem a função de transferência de cargas. A escova inferior transfere cargas da terra para a correia, logo deve ser ligada à terra. A escova superior tem a função de transferir cargas elétricas da correia para a cúpula de descarga, logo deve ser ligada à cúpula. É importante que as escovas metálicas estejam muito próximas à correia, mas nunca em contato com ela. A escova inferior, que está ligada à terra, deve ter suas pontas o mais próximo possível da correia, na região em que a correia está em contato com o rolete inferior, enquanto a

escova superior deve estar o mais próximo possível da correia, na região em que está em contato com o rolete superior.

As escovas metálicas devem ter a mesma largura da correia. O melhor material para produzir as escovas, são as telas metálicas usadas para cobrir janelas. É necessário fazer cortes triangulares na tela para criar pontas, já que o “poder das pontas”, como veremos posteriormente, é o fenômeno responsável por provocar a ruptura dielétrica do ar, tornando-o condutor, permitindo assim a transferência de cargas entre a escova inferior e a correia, e a transferência de cargas entre a correia e a escova superior, que por sua vez transfere essas cargas até a cúpula de descarga do GVDG. As escovas podem ser feitas também com metal proveniente de latinhas de refrigerante, ou até mesmo por fios de cobre. No caso dos fios de cobre, é necessário espalhar os finíssimos fios que formam esses cabos utilizados em instalações elétricas residenciais. Veja na figura 31, o esquema das escovas de acordo com o material utilizado.

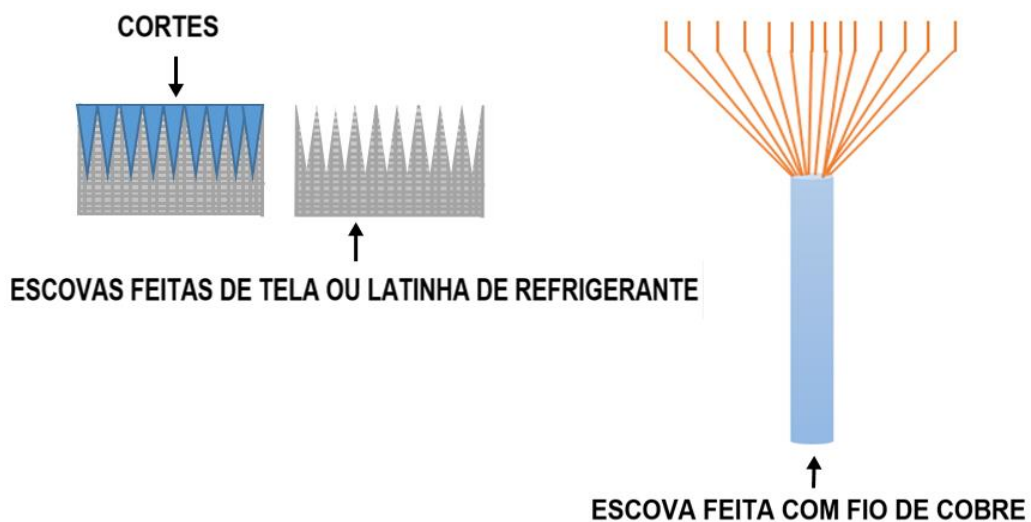


Figura 31: Modelos de escovas metálicas.

## 6.2 Montagem do gerador de Van de Graaff

Com todos os itens descritos e recomendações dadas, é hora da montagem do GVDG. É claro que a montagem dependerá do tipo de materiais que você escolher para construir seu gerador. O mais importante é seguir o layout básico, composto pelos roletes, correia e escovas, e claro, escolhendo materiais dos extremos da série triboelétrica para os roletes. Para fazer o sistema girar, você poderá, inclusive, montar um sistema de engrenagens e acionar o movimento dos roletes e da correia através de uma manivela, dispensando assim o uso do motor. Alguns modelos didáticos comercializados em sites especializados em equipamentos de laboratório, usam o sistema de manivela ao invés do motor. Mas fique à vontade para escolher qual o sistema que mais lhe agrada, já que os custos relativos à essa escolha, serão praticamente os mesmos. O uso do motor para girar o rolete inferior do GVDG, torna a montagem mais prática, e ao mesmo tempo, por conta da alta rotação, mais cargas elétricas são depositadas na cúpula de descarga, fazendo assim com que o GVDG atinja tensões elétricas bem maiores.

### 1- COLUNA DE APOIO

Para a coluna de apoio o ideal é utilizar um cano de PVC. A altura e largura desse cano, dependerá da correia utilizada, pois os roletes que acomodarão a correia serão colocados dentro desse cano. O autor utilizou um cano de 100 mm, tomando como base uma correia de 55 mm de largura. Para correias mais largas é necessário um cano de maior diâmetro, pois é preciso considerar além da correia, os comprimentos dos roletes e dos eixos. Esse cano é encaixado em um cap que deve ser fixado em uma base de madeira com o uso de parafusos, permitindo assim a sua retirada sempre que necessário. Nesse cap, a escova inferior é fixada sobre um pedaço de madeira através de 2 parafusos. Esse pedaço de madeira é fixado com supercola no cap. Veja na figura 32, o cap inferior fixado na base de madeira. Observe também a presença da escova inferior, já fixada no cap.





Figura 32: Cap inferior para encaixe da colina de apoio, já com a escova metálica instalada.

Na parte superior da coluna de apoio, um outro cap é acoplado. Nesse cap, será colocado o eixo do rolete superior. É necessário um corte retangular nesse cap, onde será encaixado o rolete superior. Para o encaixe do eixo do rolete, é necessário também um pequeno corte retangular em cada lado do cap, com tamanho suficiente para que o eixo entre sobre pressão para impedir que o eixo gire. É importante que apenas o rolete gire sobre o eixo, por esse motivo o eixo é colocado sobre pressão. Na figura 33, é possível ver o eixo do rolete encaixado no cap superior, além da escova superior já instalada.

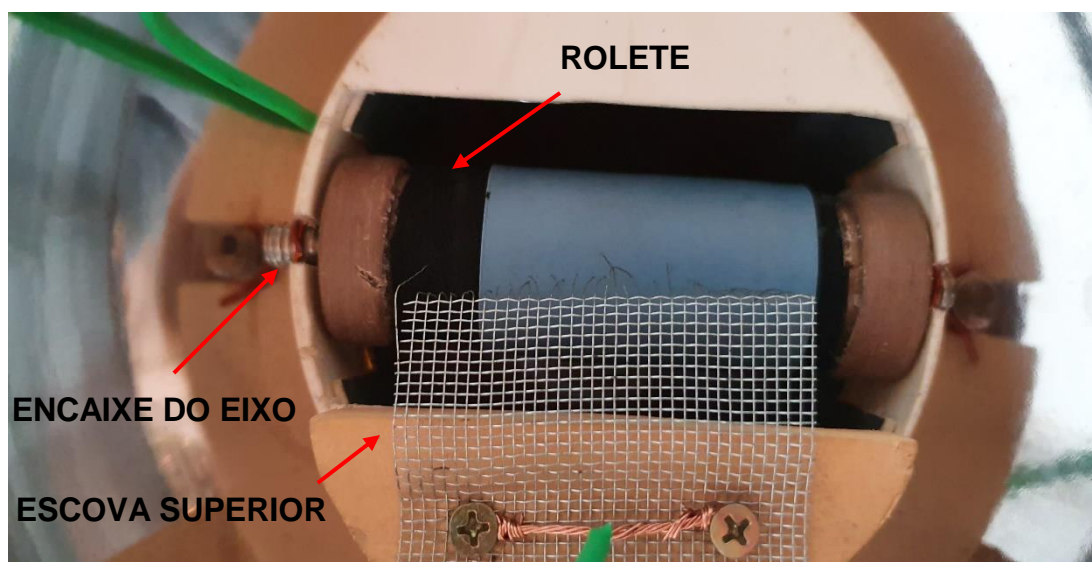


Figura 33: Rolete superior encaixado no cap superior.

## 2- MONTAGEM DO ROLETE SUPERIOR.

No modelo construído pelo autor, foram utilizados os roletes de PVC com caps colados nas suas extremidades. O rolete superior foi revestido por uma faixa de couro, colado com supercola, dessa forma, com a passagem da correia, ele irá adquirir carga positiva. Antes da colagem do couro no rolete superior, foram coladas algumas tiras de EVA, começando com uma tira com largura igual ao do rolete, e na sequência tiras com larguras menores, criando assim uma espécie de “barrilete”. Isso é feito para evitar a fuga da correia para as extremidades do rolete. Veja a ilustração na figura 34.

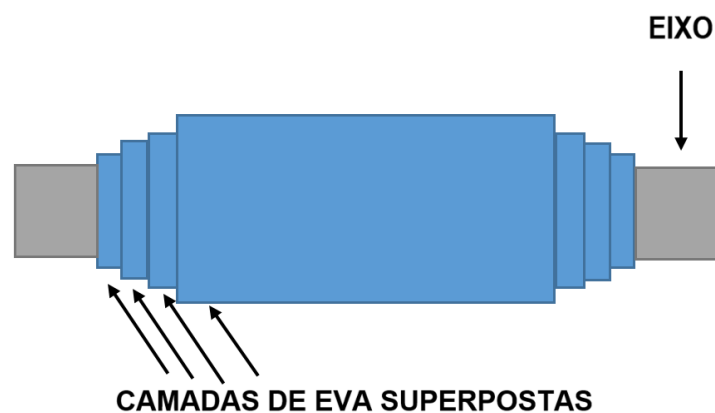
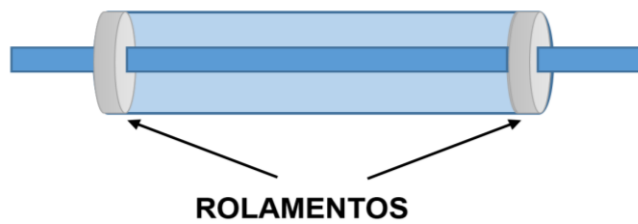


Figura 34: Camadas de EVA superpostas para criar uma espécie de “barrilete”.

Para o eixo, foi utilizado uma barra rosqueada, de aproximadamente 25 cm de comprimento. O uso da barra rosqueada como eixo, se deu por questões práticas, já que ela será usada obrigatoriamente no eixo do rolete inferior. Mas você poderá fazer opção por um eixo liso, desde que tenha o mesmo diâmetro do centro dos rolamentos de skate, que é por onde o eixo irá passar. Esses rolamentos de skate são introduzidos no interior do rolete, nas suas extremidades. O eixo então passará por dentro deles, como mostra a figura 35.



*Figura 35: Modelo do rolete construído pelo autor.*

É necessário que os rolamentos sejam envoltos por uma camada de fita isolante para que entrem sobre pressão no interior do rolete. Esse rolete repousará sobre os rasgos paralelos feitos na extremidade superior da coluna de apoio e no cap superior. Dessa forma o rolete superior irá girar em relação à barra rosqueada. Na figura 36, é possível observar o rolamento encaixado em uma das laterais do cano de PVC utilizado pelo autor para os roletes.

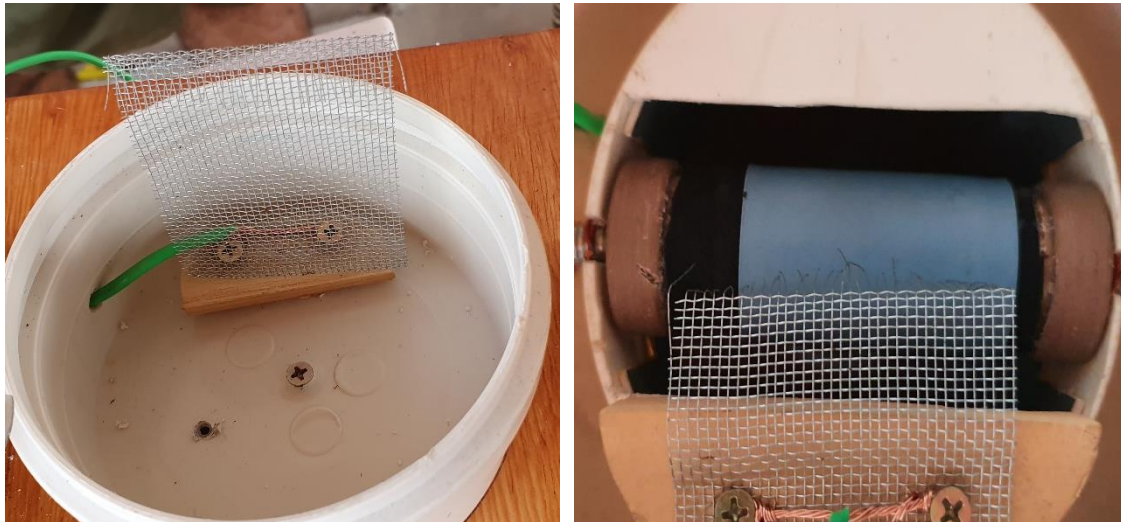


*Figura 36: Rolamento de skate encaixado no cano de PVC usado no rolete superior.*

### 3- ESCOVAS METÁLICAS

A escova superior foi produzida com tela metálica e fixada em um pedaço de madeira através de 2 parafusos. Nesses parafusos, é preso um fio de cobre que manterá contato com a cúpula de descarga. É através desse fio que as cargas elétricas são transferidas para a cúpula. A base de madeira da escova superior é

fixada no cap superior com supercola. É importante manter as pontas da escova superior bem próximas, mas nunca em contato com a correia. A escova inferior é exatamente igual à escova superior, fixada da mesma forma no cap inferior. A ponta do fio de cobre ligada à escova inferior deverá ser ligada à terra. A figura 37, mostra as escovas metálicas inferior e superior.



*Figura 37: À esquerda a escova metálica inferior, e à direita a escova superior.*

#### 4- MONTAGEM DO ROLETE INFERIOR

Essa, sem dúvidas, é a parte mais trabalhosa da montagem. Para o rolete inferior, foi utilizado um pedaço de cano de PVC, mas sem revestimento, pois o PVC, de acordo com a série triboelétrica, irá adquirir carga elétrica negativa após o atrito com a correia. Nas extremidades do rolete inferior, foram colados 2 caps. No centro de cada cap, foi feito um furo de 8mm de diâmetro, por onde passará o eixo do rolete. Esse eixo é feito da mesma barra rosqueada utilizada no rolete superior, com um tamanho de aproximadamente 35 cm, e será colocada sob pressão no rolete inferior, evitando que o eixo gire em relação ao rolete. Essa barra obrigatoriamente deverá ser rosqueada, já que serão utilizadas algumas porcas no corpo do eixo para construir o sistema de travamento do rolete, dos rolamentos e das polias. Um pedaço de 50cm dessa barra é necessário para a montagem do eixo. As sobras deverão ser cortadas com uma serra apropriada ou com uma lixadeira.

Passado o eixo por dentro do rolete é hora de criar o primeiro sistema de contraporcas. Esse sistema é feito da seguinte forma: fixe uma porca ao lado do rolete. Segure essa porca com uma chave para travá-la. Coloque outra porca ao lado desta, e aperte-a com outra chave. Faça o mesmo procedimento do outro lado do rolete. Dessa forma, as porcas ficarão travadas uma em relação à outra, e não irão se deslocar sobre a barra rosqueada, além de evitar que o rolete gire em relação à barra rosqueada. É importante que, ao passar o eixo por dentro do rolete, um dos lados do eixo tenha comprimento maior, pois é desse lado que será encaixado a polia que será conectada posteriormente à polia do motor através de uma correia. Veja o esquema na figura 38.

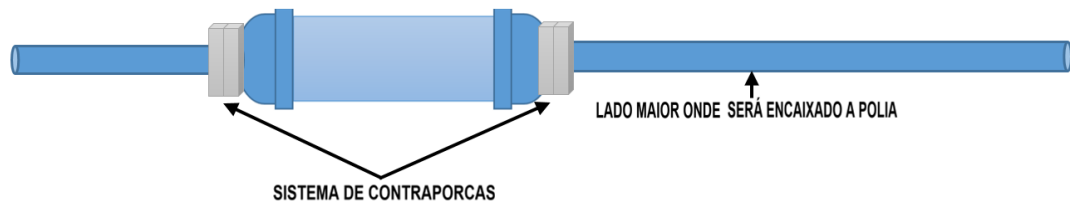


Figura 38: Esquema do sistema de contraporcas.

Feito isso, é hora do segundo sistema de contraporcas, dessa vez para travar os rolamentos. Os rolamentos utilizados no eixo inferior, são os mesmos utilizados no rolete superior. São necessários nessa etapa 4 desses rolamentos. Do lado das porcas utilizadas para travar o rolete, deixe um espaço de 0,5 cm aproximadamente. Coloque duas porcas, realize em seguida o procedimento de travamento. Ao lado dessas duas porcas, coloque dois rolamentos, e logo em seguida execute o outro sistema de contraporcas para travá-los, como mostra a figura 39.

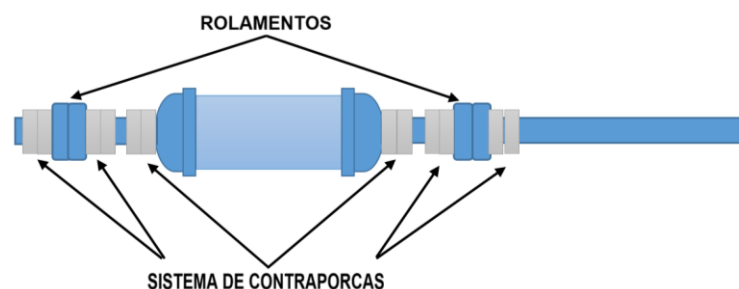
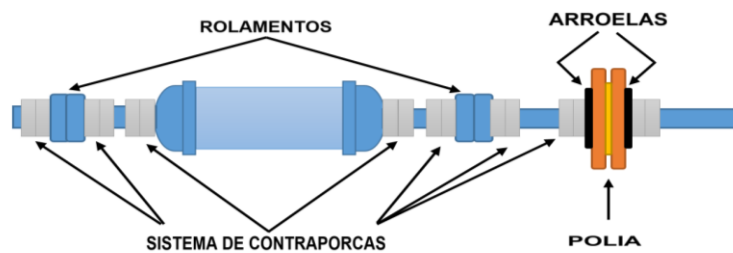


Figura 39: Eixo com os rolamentos colocados.



Em seguida, a polia que será ligada a polia do eixo do motor deverá ser colocada no eixo. Para isso, novamente será usado novamente o sistema de contraporcas. Nessa parte em especial, recomendamos a colocação de aruelas entre a polia e as correias, como ilustra a figura 40.



*Figura 40: Eixo com polia acoplada.*

Abaixo, a figura 41 mostra o sistema do rolete inferior construído pelo autor. O rolete inferior é confeccionado da mesma forma do superior, colando camadas superpostas para dar o efeito “barrilete” ao rolete. Como o rolete superior foi revestido em couro (extremo positivo da série triboelétrica), o rolete inferior será revestido de teflon, que está no extremo negativo da série triboelétrica. Para isso utiliza-se fita veda-rosca.



*Figura 41: Rolete inferior já com o sistema de contraporcas e polia.*

Os rolamentos serão apoiados em dois pilares. Esses pilares serão presos à base de madeira por parafusos inseridos pela parte de baixo da base de madeira, como mostra a figura 42.

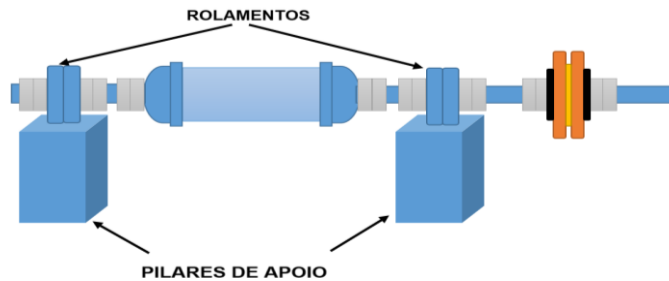


Figura 42: Eixo inferior apoiado sobre os pilares.

A altura dos pilares deve considerar a posição das aberturas laterais feitas na coluna de apoio, por onde passará o eixo do rolete inferior. A figura 43 ilustra isso. Na figura 44 vemos o eixo do GVDG construído pelo autor já posicionado sobre os pilares.

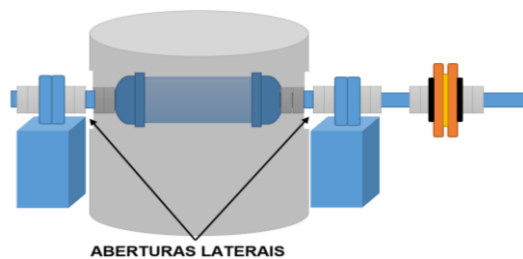


Figura 43. Eixo colocado por dentro das aberturas laterais da coluna de apoio.



Figura 44: Eixo inferior alinhado com a abertura lateral da coluna de apoio (GVDG construído pelo autor)

Abaixo, na figura 45, vemos o esquema do gerador montado, já com a correia conectando o motor ao eixo inferior do gerador. Na figura 46 temos uma visão geral do GVDG construído pelo autor.

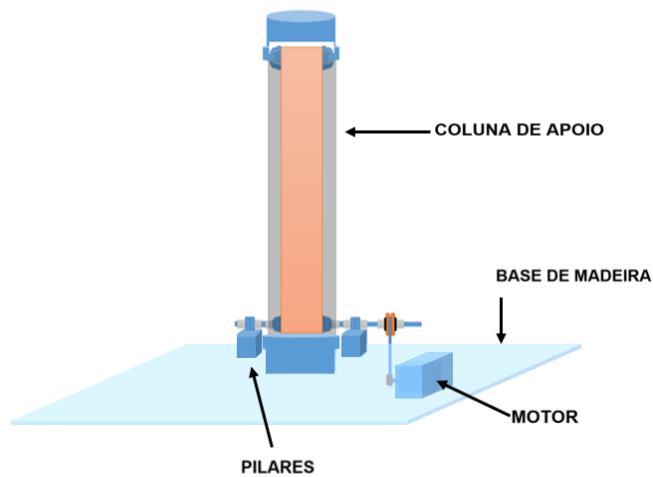


Figura 45: Esquema do GVDG montado.



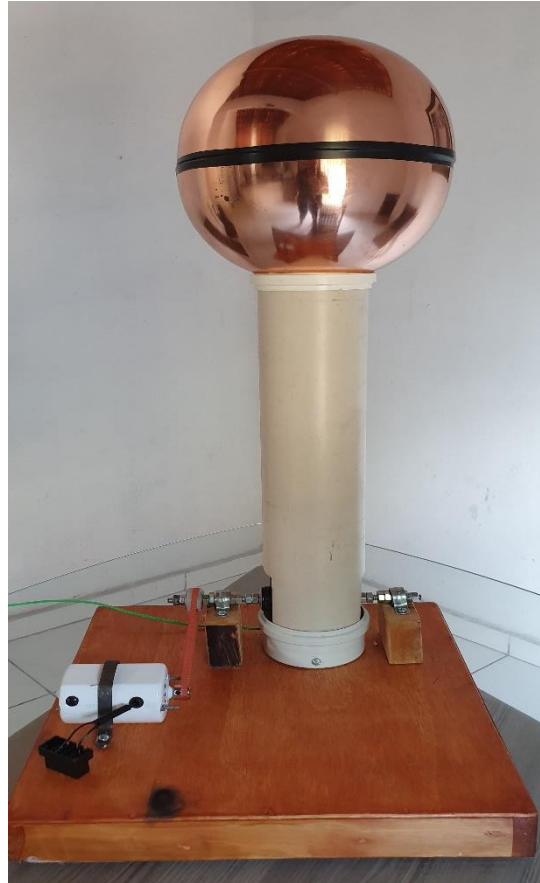


Figura 46: GVVG construído pelo autor.

Caro professor, com o gerador montado observe se ele está funcionando corretamente. Verifique se a correia está girando perfeitamente, sem interrupções, ou se está colidindo com as laterais da coluna de apoio. Retire a cúpula e verifique se a eletricidade estática está sendo produzida. Para isso aproxime um pedaço de linha, ou de papel alumínio, ele deverá ser atraído. Alguns cuidados e recomendações gerais devem ser considerados:

1. Quando se trabalha com eletricidade estática, é preciso considerar que regiões com pontas tendem a fazer as cargas elétricas “sangrarem”, diminuindo assim o acúmulo de cargas na cúpula do gerador. É preciso então, um cuidado especial com o furo feito na metade inferior da cúpula de descarga para a passagem da coluna de apoio. Esse furo criará rebarbas (pontas) que deverão ser retiradas através de uma lixadeira, ou se possível uma argola metálica deverá ser fixada para eliminar essas pontas;
2. Todo tipo de sujeira acumulada, especialmente nos roletes e na correia, pode contribuir para um mal funcionamento do GVVG, pois até mesmo pequenas partículas

de sujeira, invisíveis aos nossos olhos, podem formar um bom filme condutor de eletricidade. Dessa forma é aconselhável a limpeza constante do gerador;

3. Materiais usados na estrutura do GVDG, que parecem ser bons isolantes, podem vir a se tornar condutores, devido às altas tensões produzidas pelo GVDG;

4. Motores que utilizam escovas de carvão na sua estrutura, não devem ser utilizados, pois durante o seu funcionamento, o pó formado por essas escovas pode servir como um meio condutor, transferindo assim cargas elétricas da cúpula para a base do GVDG.

5. A umidade relativa do ar é um dos fatores que mais atrapalham experimentos de eletrostático. Umidade com valores acima de 80% podem inviabilizar o funcionamento do GVDG, por isso procura usá-lo em dias secos.

Com os devidos cuidados tomados, coloque a cúpula sobre a coluna de apoio, e aproveite as inúmeras possibilidades que o GVDG pode lhe oferecer. Na sequência serão abordadas as teorias que envolvem o funcionamento do GVDG, e posteriormente uma sequência de atividades experimentais que podem ser realizadas. A ideia proposta nesse trabalho é que o professor aborde as teorias apresentadas adiante com o uso do GVDG. É uma forma de abordagem diferenciada, pois mostra ao aluno de forma prática como de fato essas teorias funcionam. Na sequência teremos uma série de atividades experimentais, que oferece ao professor a possibilidade de demonstração de alguns conceitos abordados anteriormente de forma teórica, além de possibilitar a contextualização desses conceitos em situações reais do cotidiano dos alunos.

### **6.3 Síntese do funcionamento do GVDG**

O funcionamento geral do GVDG pode ser resumido pela seguinte sequência:

- 1- O rolete inferior é eletrizado pelo atrito com a correia;
- 2- Rolete e correia ficam eletrizados com cargas de sinais contrários;
- 3- Como o cilindro possui área menor que a da correia, a densidade superficial de cargas no cilindro é maior que na correia;

- 4- Cargas elétricas de sinal contrário à do cilindro são atraídas para as pontas da escova;
- 5- O campo elétrico estabelecido entre a escova e o rolete inferior torna-se intenso, ionizando o ar e criando um plasma condutor (efeito corona);
- 6- O ar então passa a ser condutor, e cargas elétricas pulam da escova para a superfície do rolete inferior;
- 7- A correia intercepta essas cargas, que aderem a ela;
- 8- O cilindro, ao girar, faz com que essas cargas sejam transportadas para a parte de cima do GVDG através da correia;
- 9- O ar existente entre a correia e a escova superior também é ionizado, fazendo com que as cargas elétricas da correia sejam transportadas para a escova superior através do plasma condutor, e essas cargas então são drenadas para a cúpula de descarga através do fio conectado à escova;
- 10- O atrito da correia com o rolete superior, faz com que ela adquira carga elétrica negativa. Ao descer, intensifica o campo elétrico entre o rolete inferior e a escova metálica;
- 11- O processo se repete de forma contínua, eletrizando cada vez mais a cúpula de descarga.

## **7 TEORIAS QUE ENVOLVEM O FUNCIONAMENTO DO GVDG**

### **7.1 Poder das pontas**

Considere a situação abaixo em que uma esfera metálica de raio  $R_1$ , é ligada por um fio à cúpula do gerador. O potencial elétrico  $V$ , do gerador, é mantido constante. Dessa forma, ele irá transferir cargas para a esfera, até que ela atinja o mesmo potencial elétrico  $V$ . Veja a ilustração na figura 47.

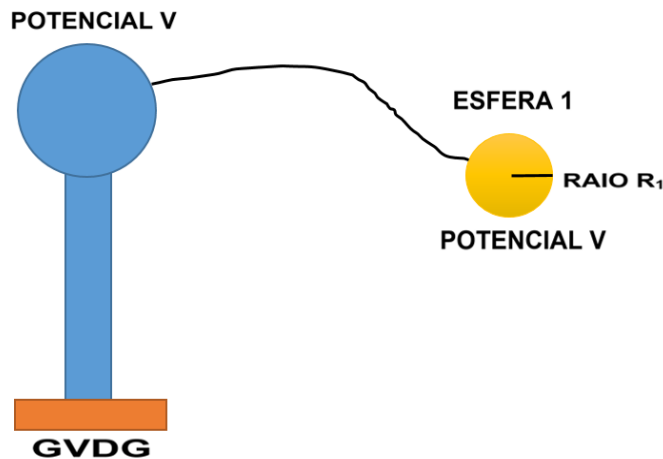


Figura 47: GVDG transferindo cargas para a esfera de raio  $R_1$ , até que a esfera atinja o mesmo potencial elétrico  $V$ .

A quantidade de cargas recebidas pela esfera depende do valor da sua capacitância elétrica  $C_1$ . Essas grandezas se relacionam de acordo com a seguinte equação:

$$Q = C_1 \cdot V$$

A quantidade de cargas por unidade de área acumulada na superfície da esfera é dada pela equação:

$$\sigma = \frac{Q}{S}$$

Onde  $S$ , representa a área da superfície esférica, que é dada por:

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

Dessa forma temos:

$$\sigma = \frac{C_1 \cdot V}{4\pi R^2}$$

A capacitância da esfera pode ser representada pela seguinte equação:

$$C = \frac{R}{K}$$

Onde  $K$  representa a constante eletrostática do meio. Essa equação nos mostra que a capacitância da esfera depende exclusivamente do seu raio e do meio em que ela está inserida. Podemos então relacionar a capacitância e a densidade superficial de cargas da seguinte forma:

$$\sigma = \frac{R \cdot V}{K \cdot 4\pi \cdot R^2}$$

$$\sigma = \frac{V}{K \cdot 4\pi \cdot R}$$

Como  $V$ ,  $K$  e  $\pi$ , são constantes, podemos concluir que a densidade superficial de cargas é inversamente proporcional ao raio da esfera, ou seja, quanto menor o raio da esfera, maior a concentração de cargas em sua superfície. Essa concentração de cargas é um ótimo indicador da intensidade do campo elétrico ao redor de um corpo eletrizado. No caso de uma esfera eletrizada, o campo elétrico representado através de linhas de força tem o aspecto mostrado na figura 48

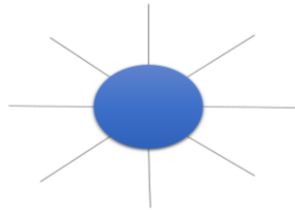


Figura 48: Representação do campo elétrico de uma esfera eletrizada através das linhas de força.

Podemos interligar várias esferas simétricas com a primeira, de forma que cada esfera seja menor que a anterior, como mostra a figura 49.

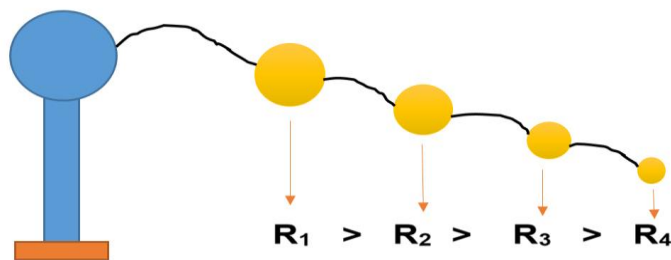


Figura 49: Esferas interligadas.

Não é necessário que as esferas sejam interligadas por fios, podemos interligá-las apenas encostando uma esfera na outra da seguinte forma, como ilustrado na figura 50.



*Figura 50: Esferas simétricas interligadas formando uma "ponta".*

A figura acima nos dá uma boa definição do que é considerado uma ponta. Com esferas cada vez menores, o campo elétrico na região mais pontiaguda torna-se cada vez maior, ionizando o ar ao seu redor, e assim tornando-o condutor. Esse é o plasma, ou quarto estado da matéria. Dessa forma, as cargas acumuladas na região das pontas, fluem através do plasma, gerando a faísca. Esse fenômeno é conhecido como ruptura dielétrica.

## 7.2 Ruptura dielétrica

Na natureza, podemos dividir os materiais em dois grandes grupos: os condutores e os isolantes. Materiais condutores, possuem em sua estrutura atômica, elétrons mais afastados do núcleo que estão fracamente ligados a ele, são os chamados elétrons livres. São esses elétrons os responsáveis por conduzir o fluxo de cargas através da superfície do condutor. Já nos materiais isolantes, essa mobilidade praticamente não existe, pois os elétrons estão fortemente ligados ao núcleo.

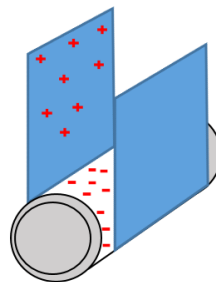
Ocorre que, quando submetidos a diferenças de potenciais muito elevadas, materiais isolantes podem ser ionizados, tornando-se assim, materiais condutores. Isso é muito comum ocorrer, por exemplo, no ar atmosférico. Relâmpagos são exemplos clássicos desse fenômeno chamado de **ruptura dielétrica**. Para o ar, essa ruptura ocorre para campos elétricos da ordem de  $3 \times 10^6$  V/m.

**CURIOSIDADE:** No acelerador Pelletron, utilizado no Instituto de Física da USP, é produzida uma tensão de aproximadamente 8MV. Essa tensão é utilizada para

acelerar partículas em direção a um alvo. Logo, seria impossível atingir tal valor de tensão elétrica no ar. Por esse motivo, usa-se um gás, o hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ), cuja rigidez dielétrica é muito maior que a do ar, permitindo assim que a tensão desejada seja atingida, sem que haja a ruptura dielétrica do meio.

### 7.3 Processos de eletrização

Como a correia e o rolete são feitos de materiais diferentes, o contato constante (denominado atrito) entre os dois materiais, que são diferentes, faz com que a correia e o rolete se eletrizem com cargas de sinais contrários. Como a correia é de borracha e a o rolete é de PVC, pela série triboelétrica, podemos concluir que a correia se eletriza com carga positiva e o rolete com carga negativa. A figura 51 ilustra isso.



*Figura 51: Rolete e correia eletrizados após serem atritados.*

O que acontece de fato, é que cargas elétricas das camadas mais afastadas dos núcleos dos materiais do rolete e da correia são transferidas de um material para outro em quantidades diferentes. O desequilíbrio nessa quantidade de cargas transferidas é que ocasiona a eletrização dos dois materiais. Como os dois materiais são isolantes, quantidades iguais de cargas elétricas são isoladas e armazenadas na superfície interna da correia e na superfície externa do cilindro. Esse processo é conhecido como eletrização por atrito. De certa forma, o atrito nada mais que o contato feito de forma mais contundente entre os materiais através de uma área maior, por isso, é mais adequado se referir a esse processo, como eletrização por contato, já que nenhum atrito é requerido de fato. A figura 52 ilustra essa situação.

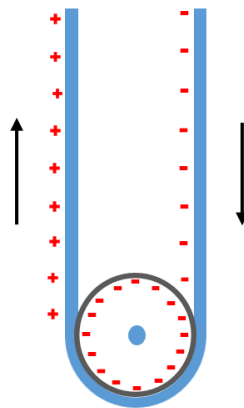


Figura 52: Cilindro e correia eletrizados.

Como a escova metálica inferior está ligada à terra, a proximidade com o cilindro eletrizado negativamente faz com que os elétrons do metal sejam repelidos e direcionados para a terra, e ao mesmo tempo cargas positivas são atraídas para as pontas da escova. O que ocorre nesse caso é a separação das cargas da escova metálica, provocando nela uma polarização elétrica. Esse processo é denominado indução eletrostática. Veja na figura 53 a ilustração dessa situação.

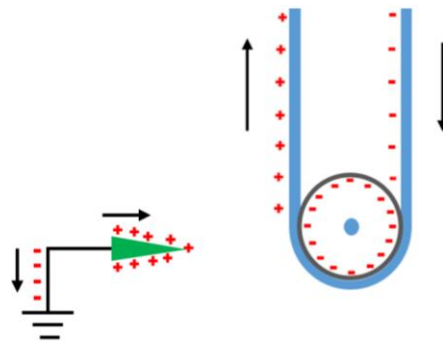


Figura 53: Polarização de cargas na escova metálica inferior.

Nas pontas da escova, devido à alta densidade superficial de cargas, forma-se um campo elétrico bastante intenso entre suas pontas e a superfície do cilindro. As moléculas de ar presentes nessa região, sofrem ionização devido à forte interação elétrica, e dessa forma as pontas da escova arrancam elétrons das moléculas do ar (efeito corona). O plasma formado, possui então elétrons livres, que funcionam como um excelente condutor elétrico. Assim, elétrons são atraídos pela ponta positiva da escova metálica, e íons positivos vão em direção ao rolete negativo. Esses íons positivos são interceptados pela correia e aderem a ela. A figura 54 ilustra isso.



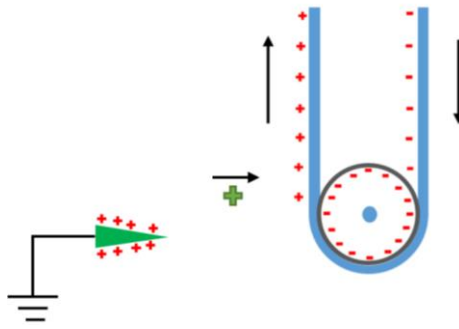


Figura 54: Íons positivos indo em direção à correia por meio do plasma condutor.

Essa interceptação de cargas feita pela correia, evita que a carga elétrica do cilindro seja totalmente cancelada, pois apenas uma pequena parte da carga que se desloca pelo plasma em direção à correia, chega até o cilindro, anulando uma quantidade de carga muito pequena da sua superfície.

Ao subir, a correia leva cargas elétricas para o topo do gerador. Dessa vez o rolete superior irá se comportar de forma oposta ao rolete inferior. As cargas elétricas positivas da correia atraem os elétrons livres da escova metálica para a região das suas pontas. A alta concentração de cargas negativas nas pontas da escova metálica cria um campo elétrico bastante intenso, ionizando o ar da região entre as pontas da escova metálica e o rolete superior, criando assim um plasma condutor. Cargas positivas então, são captadas pela escova metálica superior, e posteriormente são transferidas para a superfície externa da cúpula de descarga através de um fio conectado a ela. Veja na figura 55 a ilustração dessa situação.

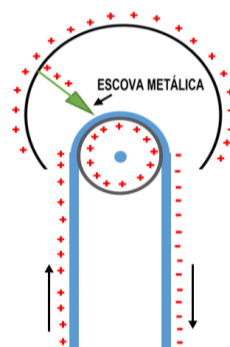


Figura 55: Escova metálica superior drenando cargas para a cúpula de descarga do GVDG.

Ao mesmo tempo, elétrons livres do ar ionizado vão em direção à correia, neutralizando momentaneamente sua carga positiva, mas devido o atrito com o rolete superior que é revestido em couro, a correia se eletriza com carga negativa. A correia então desce eletrizada. Dessa forma, a concentração de cargas negativas na região próxima à escova inferior, se torna maior, pois teremos as cargas negativas do rolete inferior somadas às cargas negativas da correia, potencializando assim, a transferência de íons positivos da escova inferior para a correia.

É importante observar, que invertendo a posição dos roletes, teríamos a cúpula eletrizada com carga negativa. Outra possibilidade, é usar o rolete superior em material metálico, dessa forma ele não seria eletrizado por atrito com a correia, e a correia desceria neutra. Teríamos então apenas uma corrente elétrica global no sentido ascendente.

#### 7.4 Condutor em equilíbrio eletrostático – Lei de Gauss

A lei de Gauss tem muito a nos esclarecer sobre o condutor em equilíbrio eletrostático e conseqüentemente sobre o GVDG. De fato, como veremos mais adiante, o campo elétrico nulo no interior de um condutor em equilíbrio eletrostático é uma consequência da lei de Gauss. A lei de Gauss nos mostra que o fluxo elétrico total através de uma superfície fechada é dado por:

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$$

Onde  $Q_{int}$  representa a carga interna total dentro da superfície, e  $\vec{E}$  o campo elétrico em qualquer ponto da superfície, como podemos observar na figura 56. Para determinar o campo elétrico de uma carga pontual  $q$  através da lei de Gauss, vamos utilizar uma superfície gaussiana esférica de raio  $r$ , centrada em  $q$ .

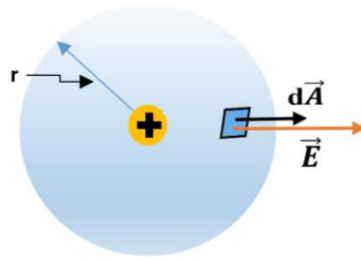


Figura 56: Superfície gaussiana esférica em torno da carga  $q$ .

Por simetria,  $\vec{E}$  é paralelo a  $d\vec{A}$ , então temos que:

$$\begin{aligned}\Phi_E &= \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} \cos 0 \\ &= E \oint dA = EA \\ &= \left( \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \right) (4\pi r^2) = \frac{q}{\epsilon_0}\end{aligned}$$

Vamos agora considerar um condutor em equilíbrio eletrostático. Pela definição, não há movimento de cargas elétricas em seu interior, logo o campo elétrico no interior de um condutor em equilíbrio eletrostático deve ser nulo, ou seja  $\vec{E}_{int} = 0$ . Se não fosse, a presença do campo elétrico faria com que as cargas fossem aceleradas, contrariando assim o conceito de condutor em equilíbrio eletrostático.

Tomemos uma superfície gaussiana no interior de um condutor em equilíbrio eletrostático. Podemos aproximar a superfície gaussiana o mais próximo possível da superfície do condutor se quisermos, como mostra a figura 57.

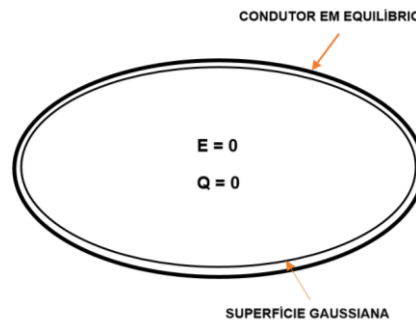


Figura 57: Superfície gaussiana próxima à superfície do condutor em equilíbrio eletrostático.

Como o campo elétrico é nulo no interior do condutor em equilíbrio eletrostático, o fluxo através da superfície gaussiana é nulo. Logo, se  $\Phi_E = 0$ , a lei de Gauss nos assegura que  $Q_{int} = 0$ . Dessa forma, não há carga líquida no interior da superfície. Por consequência, toda carga em excesso de um condutor, deverá estar localizada em sua superfície. Assim, ao transferir carga para um condutor, através de uma ponta metálica conectada a um corpo carregado, por exemplo, a carga total transferida se dirige imediatamente para a superfície do condutor, até que ele entre em equilíbrio eletrostático, como ilustra a figura 58. É isso que acontece com a cúpula de descarga do GVDG que recebe as cargas da escova metálica superior.

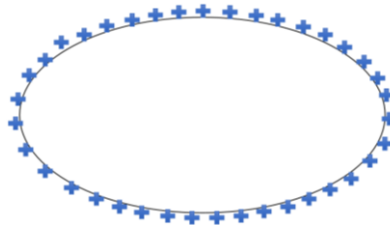


Figura 58: Cargas elétricas distribuídas na superfície de um condutor em equilíbrio eletrostático.

A carga distribuída na superfície do condutor, gera uma densidade superficial de carga  $\sigma \neq 0$ . Como existe carga na superfície, deve haver então um campo elétrico  $\vec{E}$  não nulo no lado de fora da superfície. Para não contrariar o conceito de equilíbrio eletrostático, não poderá existir componente tangencial à superfície do condutor, pois se tivesse, haveria um movimento de cargas na superfície. Logo, o campo elétrico deverá ser perpendicular à superfície do condutor em equilíbrio eletrostático, como podemos ver na figura 59.

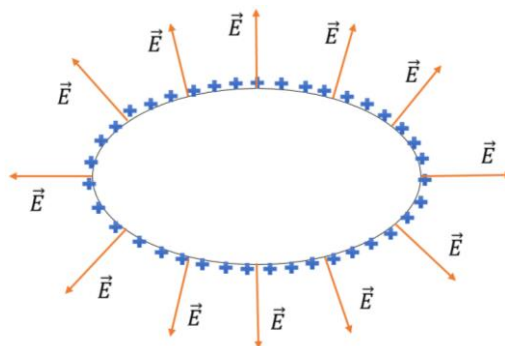


Figura 59: O campo elétrico é perpendicular à superfície do condutor em equilíbrio eletrostático.

Pelo o que foi descrito acima, a lei de Gauss nos traz um conceito importante para o entendimento do funcionamento do GVDG. A cúpula de descarga do GVDG, ao receber as cargas elétricas trazidas pelo fio conectado à escova metálica superior, faz com que essas cargas elétricas se espalhem pela sua superfície, atingindo assim o equilíbrio eletrostático. Da mesma forma, podemos concluir que o campo elétrico na superfície da cúpula do gerador é perpendicular a ela. Na sessão de experimentos, que se encontra no final deste produto educacional, constataremos essa teoria.

### 7.5 O balde de gelo de Faraday e a cúpula de descarga do GVDG

Faraday realizou um experimento em que buscava eletrizar um balde metálico utilizando uma pequena esfera eletrizada. Ao tocar a pequena esfera eletrizada no lado de fora do balde, Faraday observou que a esfera eletrizada transferia parte de sua carga para o balde metálico. Repetindo o procedimento, só que colocando a esfera eletrizada em contato com a parte interna do balde metálico, Faraday observou que a esfera voltava neutra, ou seja, toda a carga da esfera era transferida para o balde metálico.

Na figura 60, é possível observar que ao introduzir a esfera eletrizada no interior do balde metálico, mas sem tocá-lo, ocorre um processo de indução eletrostática: cargas de mesmo sinal da esfera eletrizada são atraídas para a superfície interna do balde metálico, e cargas de sinal contrário ao da esfera eletrizada são repelidas para a superfície externa do balde metálico.

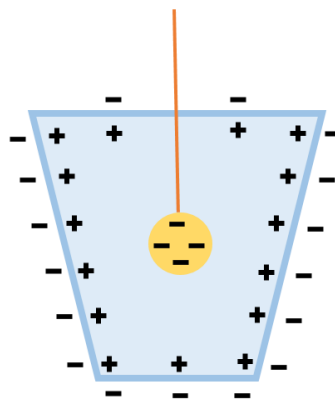


Figura 60: Separação das cargas elétricas do balde provocada pela presença da esfera eletrizada.

Já ao tocar a superfície interna do balde metálico, toda a carga da esfera é transferida para o balde. A explicação para isso é simples: ao colocar a esfera eletrizada em contato com a superfície interna do balde, a lei de Gauss determina que a carga interna de um condutor em equilíbrio eletrostático seja nula, logo toda a carga da esfera é transferida para o balde, e posteriormente essa carga se espelha pela superfície externa do balde metálico. Balde metálico e esfera eletrizada formam assim um único condutor em equilíbrio eletrostático.

Podemos interpretar o que ocorre com a experiência do balde de gelo de Faraday de outra forma. Observe a figura 61: a casca esférica de raio  $R$  e carga elétrica assumida  $Q$ , representa a cúpula de descarga do GVDG, e a esfera menor de raio  $r$  e carga  $q$ , que se encontra dentro da casca esférica, representa a porção da correia eletrizada que ainda não transferiu cargas para a cúpula de descargas do GVDG.

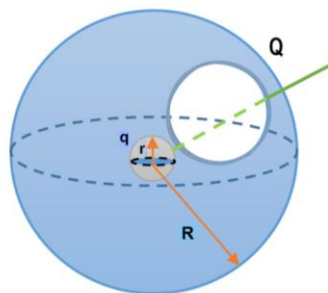


Figura 61: Esfera eletrizada  $q$  dentro da casca esférica que representa a cúpula de descarga do GVDG. A esfera eletrizada por sua vez, representa a porção eletrizada da correia transportadora de cargas.

Em relação aos potenciais elétricos, temos que para a cúpula o potencial  $V_c$  se deve à própria carga da casca esférica como também à carga da esfera eletrizada que se encontra no seu interior. O mesmo raciocínio vale para o potencial elétrico  $V_e$  da esfera, que também se deve à sua própria carga como também à carga da casca esférica. Assim temos para o potencial da casca esférica:

$$V_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{Q}{R} + \frac{q}{R} \right)$$

E para o potencial da esfera:

$$V_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{Q}{R} + \frac{q}{r} \right)$$

Calculando a diferença de potencial entre a casca e a esfera:

$$V_e - V_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{Q}{R} + \frac{q}{r} \right) - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{Q}{R} + \frac{q}{R} \right)$$

$$V_e - V_c = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right)$$

Ao colocar a esfera em contato com a casca esférica temos que  $V_e - V_c = 0$ , pois eles formam um único condutor em equilíbrio eletrostático, e isso só é possível para  $q = 0$ . Logo temos que a carga externa aumenta gradativamente para um valor  $Q + q$ . A mesma situação ocorre com a cúpula de descarga do GVDG, mas ao invés de utilizar uma bolinha metálica para eletrizar a cúpula, essas cargas são trazidas pela correia do GVDG e transferidas para a cúpula através do fio metálico conectado à escova metálica superior.

O GVDG usa esse princípio para obter tensões elétricas elevadas. Mesmo que a cada ciclo da correia, a carga elétrica fornecida por ela seja em quantidades pequenas, esse ciclo se repete continuamente, e a cúpula de descarga se eletriza cada vez mais. É importante observar que essa eletrização não é infinita. Diversos fatores, como irregularidades na superfície da cúpula de descarga, sujeiras acumuladas na correia e na superfície da cúpula que acabam formando um filme condutor de eletricidade, objetos próximos que acabam por “sugar” parte da carga armazenada na cúpula, além da ruptura dielétrica do ar, acabam determinando um potencial de eletrização limitado.

Professor, as teorias que envolvem o funcionamento do GVDG mostradas acima, devem ser abordadas com os alunos em sala de aula. É uma forma diferente de trabalhar esses conceitos físicos. Abaixo teremos algumas propostas de atividades experimentais, que são o complemento da proposta. Procure sempre atuar como orientador das atividades, deixando os alunos com o máximo possível de autonomia, mas com o cuidado necessário para evitar acidentes, pois estamos lidando com eletricidade, e os riscos são sempre inerentes.

## 8 PROPOSTAS DE ATIVIDADES EXPERIMENTAIS COM O USO DO GVDG

### 8.1 Cálculo do potencial na superfície externa da cúpula do GVDG

**-Subsunçor necessário para a realização dessa atividade: potencial elétrico em uma superfície esférica.**

#### 1- OBJETIVOS:

- Identificar que a faísca produzida pelo GVDG dependerá do campo elétrico suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar;
- Calcular o potencial elétrico do gerador;

#### 2- MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Estrutura do GVDG;
- 1 fita métrica milimetrada

#### 3 - PROCEDIMENTOS

Inicialmente precisamos determinar o raio da esfera que forma a cúpula do GVDG. Para isso precisamos usar a fita milimetrada. A fita deve ser posicionada na região onde as duas bacias foram unidas. A medida encontrada será a do comprimento da circunferência. Para o cálculo do raio (***R***), utilizamos a seguinte expressão matemática para o comprimento da circunferência:

$$C = 2\pi R$$

Onde ***R***, representa o raio da esfera.

O potencial elétrico máximo ao qual pode ser submetido a cúpula do GVDG, depende do campo elétrico máximo ao qual o ar pode ser submetido, antes que ocorra a sua ruptura dielétrica e ele se torne condutor. Considerando condições normais de pressão atmosférica, o ar suporta um valor máximo de campo elétrico que é da ordem de  **$3 \times 10^6 \text{ V/m}$**  (***E<sub>máx</sub>***). Para o cálculo do potencial máximo ao qual a cúpula é submetida, tomaremos como base esse valor de campo elétrico e usaremos a seguinte equação:



$$V_{m\acute{a}x} = R \cdot E_{m\acute{a}x}$$

## 8.2 Cálculo da quantidade de carga acumulada na cúpula de descarga do GVDG

-Subsunçor necessário para a realização dessa atividade: cálculo da quantidade de carga acumulada em uma superfície esférica.

### 1- OBJETIVOS:

- Calcular a quantidade de carga acumulada na cúpula de descarga do GVDG;

### 2- MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Estrutura do GVDG;

- 1 centelhador

### 3 - PROCEDIMENTOS

Utilizaremos um centelhador para provocar a ruptura dielétrica do ar. Para a construção do centelhador, utilizamos uma lata de refrigerante presa a um cabo isolante de PVC. A figura 62 mostra o esquema do centelhador.

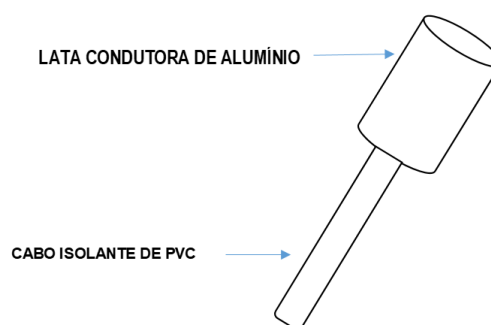


Figura 62: Centelhador feito de lata de alumínio e um pedaço de cano de PVC.

Aproxime o centelhador da cúpula de descarga do GVDG. Ao surgir a centelha temos a indicação da ruptura dielétrica do ar, e de que o potencial máximo  $V_{m\acute{a}x}$  foi atingido, considerando o campo elétrico  $E_{m\acute{a}x} = 3 \times 10^6 \text{ V/m}$  para o ar. Para determinar a quantidade de carga acumulada na cúpula utilizamos a equação seguinte:

$$Q = \frac{V_{m\acute{a}x} \cdot R}{K}$$

Onde K, representa a constante eletrostática no vácuo.

Pode-se ainda determinar o número de elétrons livres distribuídos na superfície do gerador através da seguinte equação:

$$n = \frac{Q}{e}$$

Onde  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ , e representa o valor da carga elementar.

### 8.3 O poder das pontas – torniquete elétrico

**-Subsunçor necessário para a realização dessa atividade: poder das pontas.**

#### 1- OBJETIVOS:

- Identificar o fenômeno do poder das pontas através do torniquete elétrico;
- Identificar a ação do campo elétrico;
- Identificar o princípio da ação e reação.
- Identificar o fenômeno do vento elétrico.

#### 2 - MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Estrutura do GVDG
- 1 lata de alumínio para construção do torniquete elétrico;
- 1 base isolante para fixação do torniquete elétrico
- Cola epóxi
- Peça de isopor
- 50 cm de fio de cobre de 2,5 mm desencapado nas pontas

#### 3 - PROCEDIMENTOS

##### 3.1 - MONTAGEM DO TORNIQUETE E BASE DE APOIO

Inicialmente é necessário a construção do torniquete. Para isso utiliza-se uma lata de alumínio de refrigerante que será cortada com uma tesoura. No centro do torniquete é necessário criar uma depressão, onde será encaixado a ponta do prego da base isolante. O torniquete será apoiado sobre o prego nessa depressão. O torniquete deverá ter a forma mostrada na figura 63.

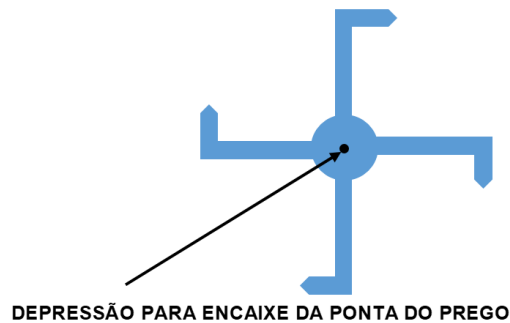


Figura 63: Modelo do torniquete. Fonte:

Para a base isolante será utilizado um prego e uma base de madeira. Faz-se um furo na base de madeira, com diâmetro suficiente para a passagem da cabeça do prego. O prego dessa forma será introduzido nesse furo de cabeça pra baixo, com a ponta virada pra cima, como mostra a figura 64. Para evitar que o prego se mova enquanto o torniquete estiver girando, coloca-se cola epóxi para preencher o furo. Como em experimentos de eletrostática, a madeira geralmente tem comportamento condutor, o ideal é colar um pedaço de isopor na base de madeira, para evitar que cargas elétricas escoem para a terra.

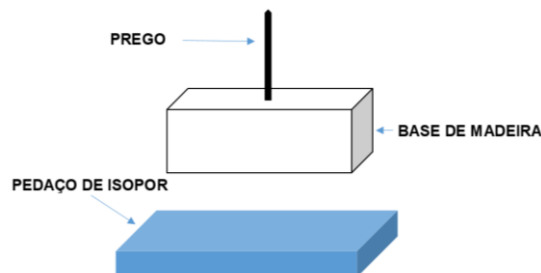


Figura 64: Esquema da base de apoio do torniquete.

Com o gerador desligado, fixe uma ponta do fio de cobre na base superior da cúpula de descarga do GVDG. A outra ponta deverá ser presa no prego da base isolante. Ligue o gerador e observe que o torniquete começa a girar.

#### 4 - COMENTÁRIO

As cargas elétricas produzidas pelo GVDG são transferidas para o prego e posteriormente para a superfície do torniquete. O torniquete então fica eletrizado, e adquire mesmo potencial elétrico da superfície da esfera. Pelo auto potencial e pelo poder das pontas, o campo elétrico na região das pontas fica bastante elevado. Este campo elétrico elevado, provoca a ionização das moléculas que compõem o ar próximo das pontas do torniquete. Essas moléculas ficam carregadas com cargas de mesmo sinal das pontas. Esses íons são então repelidos pelas pontas do torniquete. Pelo princípio da ação e reação, esses íons empurram as pontas do torniquete com força igual à que recebem, fazendo com que o torniquete gire no sentido contrário às suas pontas, como ilustra a figura 65. Esse fenômeno é chamado de *vento elétrico*.

Fonte: Construído pelo autor.

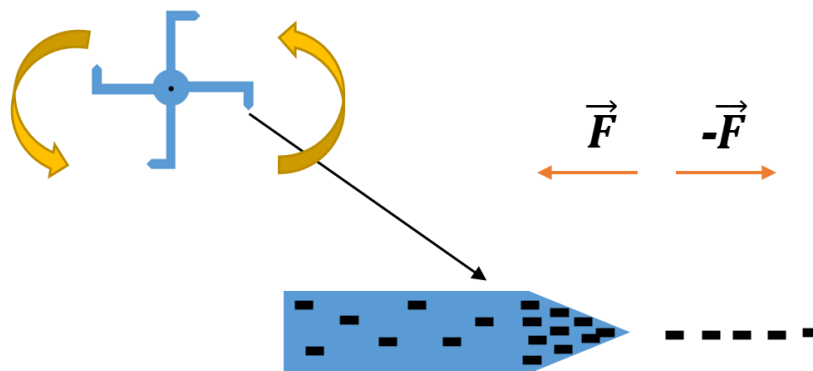


Figura 65: Torniquete elétrico. O vento elétrico faz o torniquete girar no sentido contrário às suas pontas.

#### 8.4 Testando a extensão da faísca produzida pelo do GVDG

**-Subsuncor necessário para a realização dessa atividade: rigidez e ruptura dielétrica.**

##### 1 - OBJETIVOS:

- Identificar que a centelha produzida depende do campo elétrico suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar;
- Identificar os fatores que influenciam na produção da centelha

##### 2 - MATERIAIS NECESSÁRIOS:

- Estrutura do GVDG

- 1 centelhador

### 3 - PROCEDIMENTOS

Ligue o gerador. Na sequência aproxime o centelhador até que a faísca surja. Aos poucos vá afastando o centelhador, e observe a que distância a faísca deixou de ocorrer.

### 4 - COMENTÁRIO

Depois de uma certa distância, observa-se que não é mais possível observar a geração de centelhas entre a cúpula de descarga do GVDG e o centelhador. Nesse caso, o campo elétrico entre a cúpula de descarga do GVDG e o centelhador passou a ter valor inferior ao campo elétrico necessário para romper a rigidez dielétrica do ar ( $E_{máx} = 3 \times 10^6 \text{ V/m}$  ou  $3 \times 10^4 \text{ V/cm}$ ) Além disso, outros fatores podem influenciar na formação da centelha. Deformidades na superfície da cúpula do GVDG como pontas ou depressões, ou até mesmo sujeiras ou gordura localizadas na superfície da cúpula tendem a formar um fio condutor que acabam atrapalhando a geração das centelhas. Mas sem dúvidas, o fator que mais influencia na geração do campo elétrico entre a cúpula de descarga e o centelhador, é a umidade do ar.

O ar úmido, tem rigidez dielétrica menor que a do ar seco, fazendo com que o processo de centelhamento ocorra de forma mais acelerada, com valores de campo elétrico bem menores. Por isso, o ideal é realizar experimentos de eletrostática em dias secos. Para minimizar os efeitos da umidade do ar, pode-se fazer uso de um secador de cabelo na estrutura do GVDG, tomando cuidado para usá-lo em potência baixa e com uma certa distância para o gerador. Outra dica é realizar experimentos de eletrostática em ambientes que tenham ar-condicionado. O ar-condicionado trabalha retirando umidade do ar, facilitando assim essas atividades.

## 8.5 Linhas de força em um dipolo elétrico

**-Subsunçor necessário para a realização dessa atividade: configuração de linhas de força de um dipolo elétrico**

### 1 - OBJETIVOS:

- Identificar a configuração das linhas de força em um dipolo elétrico;
- Entender como ocorre a polarização nos dielétricos
- Identificar como o campo elétrico se comporta nas proximidades de dois eletrodos pontuais;

### 2 - MATERIAIS:

- Estrutura do GVDG
- 2 pedaços de fios de 50 cm de comprimento (bitola 2,5 mm)
- 2 porcas com cabeças arredondadas para os eletrodos
- 1 refratário de vidro com pelo menos 30 cm de comprimento
- óleo vegetal
- 2 pedaços de 30 cm de fio de cobre esmaltado
- Farelo de pão

### 3 - PROCEDIMENTO

Inicialmente deve-se fazer a conexão dos eletrodos com os fios de cobre esmaltados. É importante retirar o esmalte das duas pontas desses fios de cobre para retirar o isolamento. Uma das extremidades de um desses fios é conectada ao eletrodo, e a outra extremidade é conectada à parte superior da cúpula do gerador através do fio de cobre de 2,5 mm. O outro fio de cobre esmaltado é conectado ao outro eletrodo, e a outra ponta deve ser ligada à terra através do fio de cobre de 2,5 mm. Com a ligação feita dessa forma, teremos a configuração de um dipolo elétrico, um eletrodo positivo e outro negativo. Os fios de cobre são dobrados de forma a criar um encaixe para o refratário. Observe o esquema mostrado na figura 66.

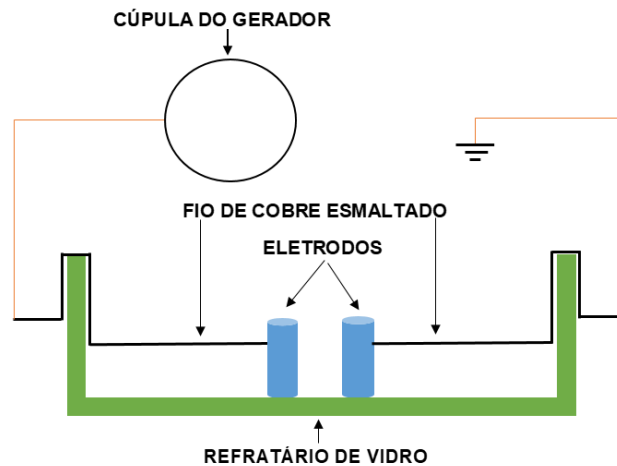


Figura 66: Esquema da montagem dos eletrodos e das ligações elétricas.

Na sequência, despeja-se o óleo vegetal dentro do refratário de vidro, de forma a cobrir metade da altura dos eletrodos. Para formar as linhas de força, jogue um pouco de farelo de pão sobre a superfície do óleo vegetal. Ligue o GVDG e aguarde até que as partículas se alinhem. Desligue o gerador na sequência e observe a disposição das linhas de força. A figura 67, ilustra o resultado esperado.

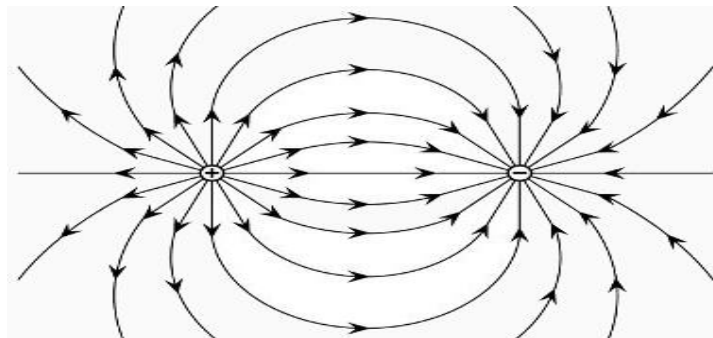


Figura 67: Configuração das linhas de força de um dipolo elétrico.

Fonte: Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/linhas-forca.htm#>

#### 4 - COMENTÁRIO

Durante essa atividade, as partículas de farelo de pão, mesmo sendo neutras e isolantes, se orientam sobre a ação do campo elétrico. Diferente da polarização que ocorre nos condutores, não há acumulação de cargas nos extremos dos dielétricos. Quando os dielétricos são colocados no interior de um campo elétrico, há na verdade

uma polarização das suas moléculas, ou seja, cria-se pequenos dipolos. Surge então um campo elétrico de polarização  $\vec{E}_{pol}$ , oposto ao campo elétrico externo  $\vec{E}_{ext}$ . Observe na figura 68 a ilustração dessa configuração.

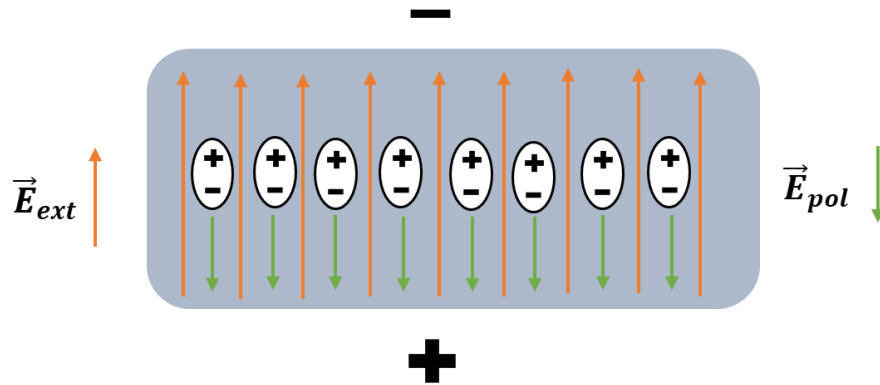


Figura 68: O campo elétrico de polarização no dielétrico é oposto ao campo elétrico externo.

Discuta com seus alunos a relação entre a proximidade das linhas de força e a intensidade do campo elétrico. Na região próxima aos eletrodos o campo elétrico é mais intenso, o que está relacionado a uma maior concentração de linhas de força nessa região. Além disso, é importante observar que em cada ponto das linhas de força, a direção do vetor campo elétrico é tangente à esse ponto, logo, se uma carga de prova for colocada em qualquer um desses pontos, ela irá sofrer a ação de uma força elétrica, e irá se deslocar na direção do vetor campo elétrico. Dessa forma a força elétrica realiza trabalho sobre a carga de prova, transformando energia potencial elétrica em energia cinética, ou o contrário.

## 8.6 Linhas de força entre dois eletrodos com cargas de mesmo sinal

**9 -Subsunçor necessário para a realização dessa atividade: configuração de linhas de força de duas cargas de sinais opostos.**

1 - OBJETIVOS:

- Identificar a configuração das linhas de força entre dois eletrodos com cargas de mesmo sinal.



- Reconhecer que duas linhas de força jamais se cruzam.

## 2 - MATERIAIS:

- Estrutura do GVDG
- 2 pedaços de fios de 50 cm de comprimento (bitola 2,5 mm)
- 2 porcas com cabeças arredondadas para os eletrodos
- 1 refratário de vidro com pelo menos 30 cm de comprimento
- óleo vegetal
- 2 pedaços de 30 cm de fio de cobre esmaltado
- Farelo de pão

## 3 - PROCEDIMENTO

A montagem é semelhante à do experimento anterior, com a diferença que dessa vez os eletrodos devem estar eletrizados com cargas de mesmo sinal. Para isso, conecta-se os dois fios na parte superior da cúpula de descarga do GVDG. As outras duas pontas dos dois fios serão conectadas uma em cada eletrodo, através dos fios de cobre esmaltados, assim os dois eletrodos são eletrizados com carga de mesmo sinal da cúpula. Veja o esquema da montagem na figura 69.

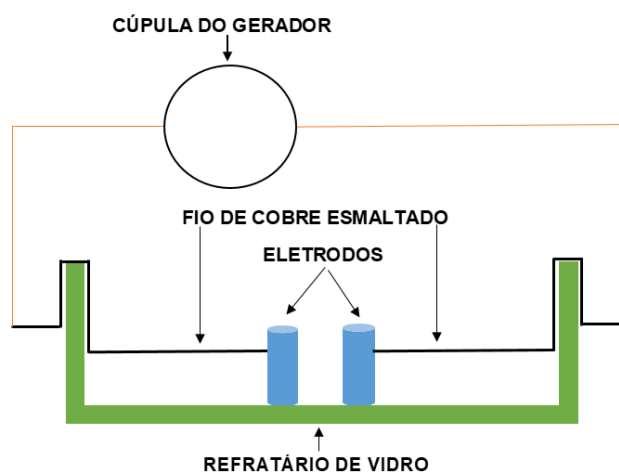


Figura 69: Esquema de montagem para eletrodos com cargas de mesmo sinal.

Na sequência, despeja-se o óleo vegetal dentro do refratário de vidro, de forma a cobrir metade da altura dos eletrodos. Para formar as linhas de força, jogue um pouco de farelo de pão sobre a superfície do óleo vegetal. Ligue o GVDG e aguarde até que as partículas se alinhem. Desligue o gerador na sequência e observe a disposição das linhas de força. A figura 70 ilustra o resultado esperado.

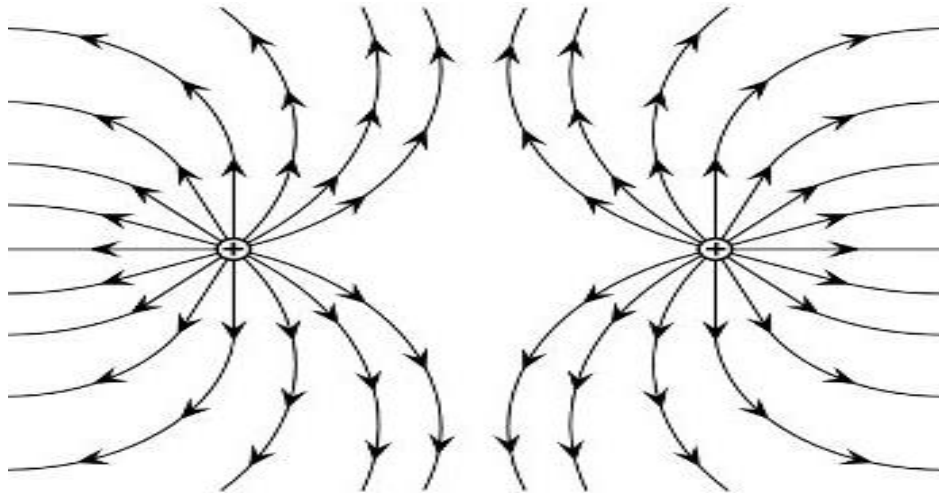


Figura 70: Configuração das linhas de força para dois eletrodos com cargas de mesmo sinal.

Fonte: Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/linhas-forca.htm#>

#### 4 - COMENTÁRIO

É importante ressaltar uma propriedade importante das linhas de força: elas jamais se cruzam. Observe a figura abaixo em que duas linhas de força  $r$  e  $l$ , hipoteticamente se cruzam em um ponto A. Como em cada ponto da linha de força o vetor campo elétrico é tangente a ela, teremos dois vetores campo elétrico,  $\vec{E}_r$  e  $\vec{E}_l$ , no ponto A. Isso não seria possível, pois em cada ponto do espaço existe apenas um vetor campo elétrico. Logo, duas linhas de força jamais se cruzam em um ponto, independentemente da configuração de cargas, como mostra a figura 71.

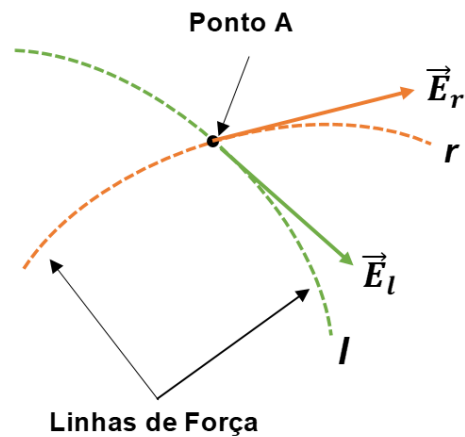


Figura 71: Cruzamento hipotético de duas linhas de força.

### 9.1 Linhas de força entre dois eletrodos planos e paralelos entre si

**-Subsunçores necessários para a realização dessa atividade: configuração de linhas de força entre dois eletrodos planos e paralelos entre si, campo elétrico uniforme.**

#### 1 - OBJETIVOS:

- Identificar a configuração das linhas de força entre dois eletrodos planos e paralelos entre si;
- Reconhecer que o campo elétrico é uniforme entre dois condutores planos e paralelos entre si;
- Discutir o conceito de superfícies equipotenciais.
- Reconhecer que as linhas de força sempre são perpendiculares às superfícies equipotenciais.

#### 2 - MATERIAIS:

- Estrutura do GVDG
- 2 pedaços de fios de 50 cm de comprimento (bitola 2,5 mm)
- 2 pedaços de arame em "T", que servirão como eletrodos planos
- 1 refratário de vidro com pelo menos 30 cm de comprimento

- óleo vegetal
- 2 pedaços de 30 cm de fio de cobre esmaltado
- Farelo de pão
- Cola epóxi

### 3 - PROCEDIMENTO

A montagem é semelhante à do experimento 5, com a diferença que dessa vez os eletrodos são planos e devem ser dispostos paralelamente. Para conexão com a terra e com a cúpula do gerador, construímos o eletrodo em forma de “T”, como mostrado na figura abaixo. Para formar o “T” utilizamos 2 pedaços de arame, que serão presos um ao outro com um pouco de cola epóxi. Conecta-se então um eletrodo na cúpula de descarga e o outro será conectado à terra, para isso faremos uso dos fios de cobre de 2,5 mm. Veja o esquema da montagem final na figura 72.

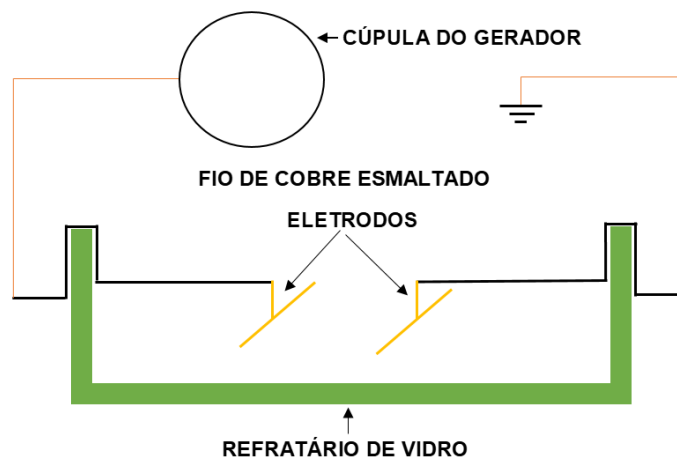


Figura 72: Eletrodos planos dispostos paralelamente.

Na sequência, despeja-se o óleo vegetal dentro do refratário de vidro, de forma a cobrir os eletrodos paralelos. Para formar as linhas de força, jogue um pouco de farelo de pão sobre a superfície do óleo vegetal. Ligue o GVDG e aguarde até que as partículas se alinhem. Desligue o gerador na sequência e observe a disposição das linhas de força. A figura 73 mostra a configuração das linhas de força em um campo elétrico uniforme.

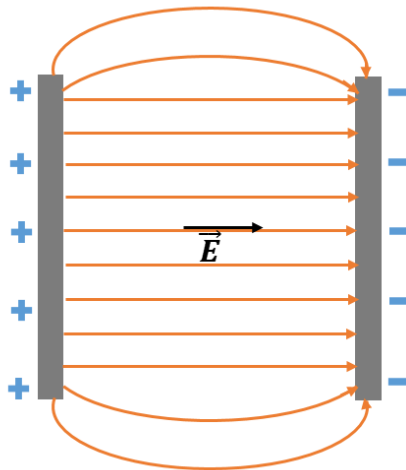


Figura 73: Linhas de força de um campo elétrico uniforme, formado entre dois condutores planos e paralelos entre si.

#### 4 - COMENTÁRIO

As linhas de força paralelas e igualmente espaçadas entre si, nos indica que em cada ponto dessa região, o vetor campo elétrico  $\vec{E}$ , tem a mesma intensidade, direção e sentido. Qualquer superfície que forma com as linhas de força um ângulo de  $90^\circ$ , representa uma superfície equipotencial. Como o vetor campo elétrico  $\vec{E}$ , sempre é tangente às linhas de força, as linhas de força, de fato, sempre são perpendiculares às superfícies equipotenciais. Observe a superfície abaixo, onde temos uma linha de força  $r$ . Se supormos que a linha de força  $r$ , não seja perpendicular à superfície  $S$ , o vetor  $\vec{E}$  também não será. Nesse caso, o vetor  $\vec{E}$  seria decomposto nos vetores  $\vec{E}_n$  e  $\vec{E}_t$ . O vetor  $\vec{E}_t$  é tangente à superfície, enquanto o vetor  $\vec{E}_n$  é perpendicular à superfície. A ilustração dessa situação pode ser vista na figura 74.

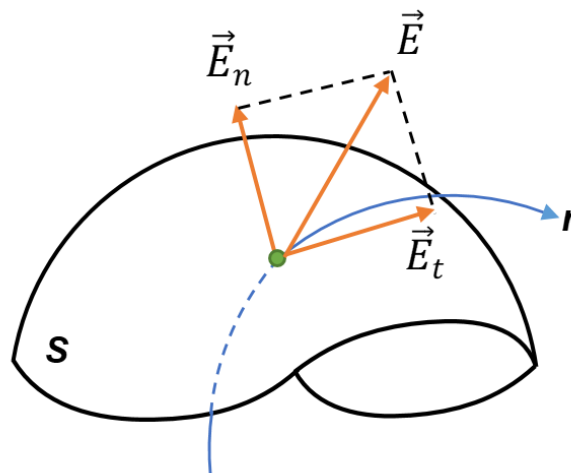


Figura 74: Decomposição do vetor  $\vec{E}$

Se dispusermos uma carga de prova  $q$  sobre a linha de força  $r$ , essa carga estaria sujeita à ação de duas forças elétricas,  $\vec{F}_n$  e  $\vec{F}_t$ . Dessa forma, a carga de prova ao sofrer a ação da força  $\vec{F}_t$ , se deslocaria ao longo da superfície  $S$ . Ocorre que, a superfície  $S$  é equipotencial, então isso não seria possível, assim como não seria possível também, a decomposição do vetor  $\vec{E}$  nas componentes  $\vec{E}_n$  e  $\vec{E}_t$ , pois ele é perpendicular à superfície. Como a linha de força é tangente a  $\vec{E}$ , ela também é perpendicular à superfície.

## 9.2 Blindagem eletrostática

**-Subsunçor necessário para a realização dessa atividade: blindagem eletrostática.**

### 1 - OBJETIVOS:

- Identificar o fenômeno da blindagem eletrostática;
- Discutir o conceito de condutor em equilíbrio eletrostático.

### 2 - MATERIAIS:

- Estrutura do GVDG

- 2 pedaços de fios de 50 cm de comprimento (bitola 2,5 mm)
- 2 eletrodos paralelos
- 1 refratário de vidro com pelo menos 30 cm de comprimento
- óleo vegetal
- 2 pedaços de 30 cm de fio de cobre esmaltado
- Farelo de pão
- 1 lata de refrigerante para a confecção do condutor em forma de anel

### 3 - PROCEDIMENTO

O primeiro passo é a confecção do condutor em forma de anel. Para isso use uma tesoura para cortar uma tira de aproximadamente 1,5 cm de altura da lata de alumínio, formando assim um condutor em forma de anel. Na sequência um dos fios de cobre esmaltado, é conectado a um dos eletrodos. Faz-se a conexão desse fio esmaltado à cúpula de descarga do GVDG com o pedaço de fio de cobre de 2,5 mm de diâmetro. A mesma conexão é feita no outro eletrodo, com a diferença que o fio de cobre esmaltado é conectado à terra através do fio de cobre de 2,5 mm. Observe o esquema da montagem na figura 75.

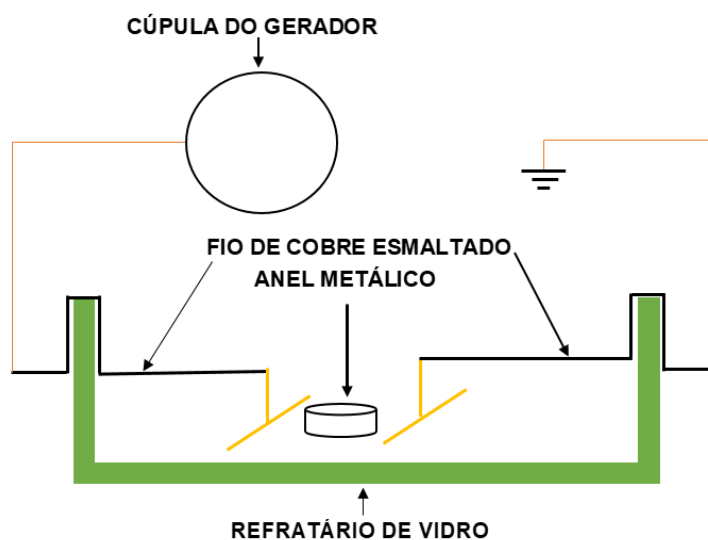


Figura 75: Esquema da montagem com anel metálico.

Posicione o anel metálico entre os dois eletrodos. Na sequência, despeja-se o óleo vegetal dentro do refratário de vidro, de forma a cobrir metade da altura dos eletrodos. Para formar as linhas de força, jogue um pouco de farelo de pão sobre a superfície do óleo vegetal. Ligue o GVDG e aguarde até que as partículas se alinhem. Desligue o gerador na sequência e observe a disposição das linhas de força.

#### 4 - COMENTÁRIO

Observa-se que no interior do anel metálico, as partículas de farelo de pão se mantêm em repouso, não há então, formação de linhas de força, o que prova que no interior do anel metálico, o campo elétrico é nulo, ou seja, o anel metálico está em equilíbrio eletrostático, como mostra a figura 76. O campo nulo no interior do condutor em equilíbrio eletrostático, configura o fenômeno da blindagem eletrostática.

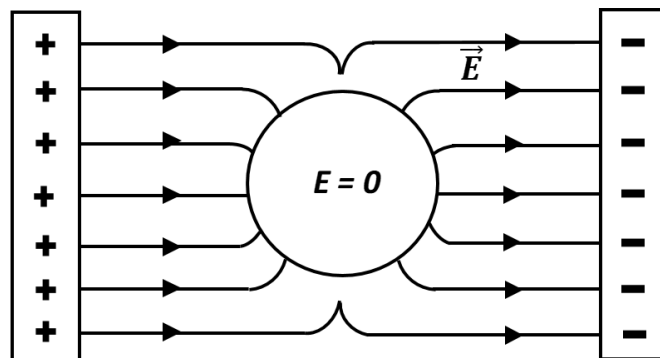


Figura 76: Anel metálico entre dois condutores planos. O campo elétrico é nulo no interior do anel condutor.

## 10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É importante destacar, que o objetivo principal desse projeto é oferecer ao professor que não dispunha de um laboratório de física na sua escola, uma alternativa para fugir do formalismo corriqueiro nas suas aulas. O gerador de Van de Graaff é um equipamento que oferece muitas possibilidades. Nessa perspectiva, não é objetivo desse material trazer os conteúdos sistematizados de eletrostática, pois esse material já se encontra disponível nos livros didáticos ou em outras fontes, como a internet. A



teoria apresentada aqui, está diretamente relacionada ao equipamento, objetivando contextualizar alguns conceitos e fenômenos da eletrostática. Vale lembrar, no entanto, que a atividade experimental por si só, não representa uma aula dinâmica ou diferenciada. Elas podem, tão somente, representar mais um elemento das famigeradas aulas tradicionais. É de suma importância que o docente busque cada vez mais colocar o aluno como protagonista da aprendizagem, ressaltando, no entanto, o papel imprescindível do professor como orientador e estimulador do processo de ensino-aprendizagem.

## 11 REFERÊNCIAS

MOREIRA, M. A., MASINI, E. F. S. **Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel**. 2º ed. São Paulo: Centauro, 2006.

ARAÚJO, Mauro Sérgio Teixeira de; ABIB, Maria Lúcia dos Santos. “**Atividades experimentais no ensino de Física: Diferentes enfoques, diferentes finalidades**”.

In: Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, vol. 25, n. 02, pp.176-194, jun. 2003.

