



**INSTITUTO FEDERAL**

Sertão Pernambucano

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO SERTÃO  
PERNAMBUCANO  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA  
CURSO DE FÍSICA**

**ROBSON BEZERRA DA SILVA**

**PROPOSTAS DE ATIVIDADES EXPERIMENTAIS ACERCA DA ELETRIZAÇÃO  
DOS CORPOS, DO POTENCIAL ELÉTRICO E DA LEI DE GAUSS DA  
ELETROSTÁTICA**

**SALGUEIRO**

**2022**

ROBSON BEZERRA DA SILVA

**PROPOSTAS DE ATIVIDADES EXPERIMENTAIS ACERCA DA ELETRIZAÇÃO  
DOS CORPOS, DO POTENCIAL ELÉTRICO E DA LEI DE GAUSS DA  
ELETROSTÁTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, campus Salgueiro, como requisito parcial à obtenção do título de licenciatura em Física.

Orientador(a): Prof. Thiago Alves de Sá Muniz Sampaio.

SALGUEIRO

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

d0 da Silva, Robson Bezerra.

Propostas de atividades experimentais acerca da eletrização dos corpos, do potencial elétrico e da lei de Gauss da eletrostática / Robson Bezerra da Silva. - Salgueiro, 2022.  
49 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) -Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Salgueiro, 2022.  
Orientação: Prof. Msc. Thiago Alves de Sá Muniz Sampaio.

1. Ensino de Física. 2. Eletrostática. 3. Física experimental. 4. Eletroscópio Eletrônico. 5. Lei de Gauss. I. Título.

CDD 530.07

ROBSON BEZERRA DA SILVA

**PROPOSTAS DE ATIVIDADES EXPERIMENTAIS ACERCA DA ELETRIZAÇÃO  
DOS CORPOS, DO POTENCIAL ELÉTRICO E DA LEI DE GAUSS DA  
ELETROSTÁTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do curso de licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, campus Salgueiro, como requisito parcial à obtenção do título de licenciatura em Física.

Aprovado em: 30/ 09/ 2022.

**BANCA EXAMINADORA**

Thiago Alves de  
Sá Muniz Sampaio

Digitally signed by Thiago Alves de Sá Muniz Sampaio  
DN: cn=Thiago Alves de Sá Muniz Sampaio, o=Instituto Federal  
de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano,  
campus Salgueiro, ou=Coordenação de Física,  
email=thiago.muniz@fatesa-pb.edu.br, c=BR  
Date: 2022.10.09 23:16:20 -03'00'

---

Prof. Thiago Alves de Sá Muniz Sampaio  
IF Sertão PE – Campus Salgueiro

Eriverton da Silva

Rodrigues:05223960467

Assinado de forma digital por  
Eriverton da Silva

Rodrigues:05223960467

Dados: 2022.10.09 11:04:08 -03'00'

---

Prof. Eriverton da Silva Rodrigues  
IF Sertão PE – Campus Salgueiro

*Samuel B. Alves*

Dados: 2022.10.08

06:22:15 -03'00'

---

Prof. Samuel Bezerra Alves  
IF Sertão PE – Campus Petrolina

---

Prof. Marcelo Souza da Silva  
IF Sertão PE – Campus Salgueiro

SALGUEIRO

2022

Dedico este trabalho aos meus pais,  
professores e gestores que tornaram essa  
jornada possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Thiago Alves de Sá Muniz Sampaio, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Eriverton da Silva Rodrigues, Marcelo Souza da Silva e Samuel Bezerra Alves pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas da turma pelas reflexões críticas e sugestões instrutivas.

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.”

- Isaac Newton

## RESUMO

A maioria das descrições teóricas para explicar os fenômenos eletrostáticos são muito abstratas, como a própria ideia de campo elétrico, que é uma função vetorial, e a lei de Gauss que é uma integral de superfície. Baseado nessa problemática o presente trabalho propõe atividades experimentais para o ensino de tópicos da eletrostática concomitante a teoria. É proposto um resumo das cargas elétricas e como interagem com os materiais, o que é eletrização, além de metodologias experimentais acerca dos processos de eletrização. Todos os assuntos anteriores servirão de base para dois experimentos: Mensurar a ordem de grandeza do potencial elétrico, de uma esfera condutora de aço presa em um suporte de PVC, por meio do rompimento do dielétrico do ar na forma de uma centelha elétrica e usando novamente a esfera condutora, carregada negativamente, junto com um eletroscópio eletrônico percebemos a relação quadrática entre a carga elétrica e a distância, cuja explicação está na lei de Gauss.

**Palavras-chave:** 1. Eletrostática 2. Física Experimental 3. Ensino de física 4. Eletroscópio eletrônico

## ABSTRACT

Most theoretical descriptions to explain electrostatic phenomena are very abstract, such as the idea of the electric field, which is a vector function, and Gauss's law, which is a surface integral. Based on this issue this research proposes experimental activities for teaching electrostatic's topics concomitant to theory. It is proposed an *overview* of the electrical charges and how they interact with materials, what does mean electrification, as well as experimental methodologies about the electrification processes. All previous subjects will be the basis for two experiments: Measure the magnitude of the electrical potential using a conductive ball of steel attached to a PVC support, Through the rupture of the dielectric of the air in the form of an electric spark and using again the conducting sphere, negatively charged, together with an electronic electroscope we perceive the quadratic relationship between the electric charge and the distance, whose explanation is in the Gauss's law.

**Keywords:** 1. Electrostatics 2. Experimental physics 3. Physics teaching 4. Electronic electroscope

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 01 – Ilustração do átomo e sua estrutura.....  | 17 |
| Figura 02 – Atrito do papel com a cuba de acrílico.....   | 21 |
| Figura 03 – Atrito do papel com o PVC .....   | 22 |
| Figura 04 – O objeto acima está previamente carregada e induz uma separação de cargas na esfera ..... | 23 |
| Figura 05 - Após o aterramento a esfera fica carregada positivamente.....                             | 23 |
| Figura 06 – Induzindo e aterrando esfera de aço .....   | 25 |
| Figura 07 – Cargas após contato entre esferas .....   | 27 |
| Figura 08 – Divisão de cargas entre esferas de aço condutoras .....                                   | 28 |
| Figura 09 – Regiões equipotenciais de uma esfera carregada negativamente.                             | 30 |
| Figura 10 – Campo elétrico aproximadamente uniforme entre as esferas .....                            | 32 |
| Figura 11 – Medição da distância entre as esferas após centelha .....                                 | 33 |
| Figura 12 – Campo elétrico de esfera carregada negativamente .....                                    | 36 |
| Figura 13 – Fluxo de campo elétrico numa área fechada esférica.....                                   | 37 |
| Figura 14 – Esquema do FET MPF 102 e suas portas.....   | 39 |
| Figura 15 – Circuito com o transistor esquematizado no circuitlab.....                                | 40 |
| Figura 16 – Circuito do eletroscópio montado enquanto a esfera de metal se aproxima da antena.....    | 41 |
| Figura 17 - Aparato experimental montado .....  | 42 |
| Figura 18 - Equipamentos utilizados no experimento de divisão de cargas.....                          | 43 |
| Figura 19 - Esquema esfera carregada e dispositivo para detecção.....                                 | 44 |
| Figura 20 - Aproximação da esfera em direção a Antena.....  | 44 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 1 – Divisão de Carga em função da distância.....            | 45 |
| Gráfico 2 - Divisão de Carga em função da distância quadrática..... | 46 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 01: Materiais e triboeletrização ..... | 20 |
|---|----|

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1- INTRODUÇÃO .....</b>                                  | <b>14</b> |
| <b>2- CARGA ELÉTRICA .....</b>                              | <b>16</b> |
| <b>3- PROCESSOS DE ELETRIZAÇÃO .....</b>                    | <b>18</b> |
| <b>3.1- ELETRIZAÇÃO POR ATRITO.....</b>                     | <b>19</b> |
| <b>3.1.1- Teoria .....</b>                                  | <b>19</b> |
| <b>3.1.2 - Proposta Experimental.....</b>                   | <b>20</b> |
| <b>3.2-ELETRIZAÇÃO POR INDUÇÃO .....</b>                    | <b>23</b> |
| <b>3.2.1 Teoria .....</b>                                   | <b>23</b> |
| <b>3.2.2- Proposta Experimental .....</b>                   | <b>24</b> |
| <b>3.3 – ELETRIZAÇÃO POR CONTATO.....</b>                   | <b>26</b> |
| <b>3.3.1 – Teoria .....</b>                                 | <b>26</b> |
| <b>3.3.2 – Proposta Experimental .....</b>                  | <b>28</b> |
| <b>4- POTENCIAL ELÉTRICO.....</b>                           | <b>29</b> |
| <b>4.1 – TEORIA .....</b>                                   | <b>29</b> |
| <b>4.2 – PROPOSTA EXPERIMENTAL .....</b>                    | <b>31</b> |
| <b>5 – LEI DE GAUSS .....</b>                               | <b>35</b> |
| <b>5.1 – TEORIA .....</b>                                   | <b>35</b> |
| <b>5.1.1-Campo Elétrico .....</b>                           | <b>35</b> |
| <b>5.1.2- Fluxo Elétrico.....</b>                           | <b>36</b> |
| <b>5.1.3-Lei de Gauss e Fluxo Elétrico .....</b>            | <b>38</b> |
| <b>5.2- PROPOSTA EXPERIMENTAL.....</b>                      | <b>38</b> |
| <b>5.2.1 Eletroscópio Eletrônico .....</b>                  | <b>38</b> |
| <b>5.2.2 Experimento com o Eletroscópio Eletrônico.....</b> | <b>41</b> |
| <b>6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                       | <b>46</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                     | <b>48</b> |



## 1. INTRODUÇÃO

Na Grécia antiga, em torno de 600 a.C., já existiam evidências, feitas por meio de observações, acerca da existência de fenômenos eletrostáticos. Descobriu-se que após friccionar lã em um pedaço de âmbar, uma resina amarelada de seiva de árvore solidificada, ela passava a atrair outros objetos, efeito do desequilíbrio na distribuição das cargas através do atrito (Young, 2015). Os termos 'elétrico' e 'elétron' tem origem na palavra âmbar, em grego 'elektron', entretanto, naquela época, os principais interesses repousavam em filosofia e lógica, e não em ciência experimental (HAYT, 2013).

Em 1600, William Gilbert, médico da corte da Inglaterra, foi o primeiro a fazer algum trabalho realmente experimental abordando esse efeito, no seu tratado 'De magnete', o qual listou corpos que se eletrizam por atrito (HAYT, 2013). A existência de dois tipos de cargas e que as de mesmo tipo se repelem e de sinais opostos atraem foi feita por Du Fay em 1733 (NUSSENZVEIG, 1997). Um oficial de engenharia do exército francês, coronel Charles Coulomb, executou uma série de experimentos utilizando uma balança de torção, inventado por ele mesmo, para determinar quantitativamente a força exercida entre dois objetos, cada um com uma carga estática de eletricidade, criando assim a lei de Coulomb que nos diz que a força é proporcional ao produto das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância (HAYT, 2013). Em 1909, Robert Millikan descobriu que a carga elétrica sempre ocorre em múltiplos inteiros de uma carga fundamental 'e' (Radi, 2013).

É digno de nota que, desde de sua descoberta e primeiros estudos, os fenômenos eletrostáticos sempre estiveram intimamente ligados com a experimentação. Seus estudos sistemáticos começaram a partir do século XVII até o XVIII e, como pode ser inferido através do desenvolvimento histórico de nosso entendimento, todo o desenvolvimento teórico veio justamente da experimentação, observação direta, análises e deduções das aparentes causas e consequências.

Hoje, como comentado por McManus (2017), muitos estudantes de física têm tido dificuldades de internalizar conceitos importantes de eletrostática, e um dos motivos é a pouca atividade prática (experimental), que dá aos estudantes a oportunidade de entender as ideias centrais e como se desenvolveram. No entanto, há uma grande escassez de novas metodologias e experimentos para estudo e

assimilação. Assim, faz-se necessário uma abordagem voltada ao uso de laboratórios didáticos, abordando tais conteúdos não só aos alunos do ensino médio, mas também aos universitários, como é reforçado por Pinho Alves (2000).

A compreensão desses fenômenos é realmente necessária, visto que são a base para o entendimento de fenômenos mais complexos, como o eletromagnetismo, o próprio conceito de polarização e indução elétrica. Além disso, o conceito de carga e campo são abordados pela primeira vez no último ano do ensino fundamental (nono ano) ou no último ano do ensino médio, por isso a necessidade de experimentação concomitantemente a aulas expositivas.

Tendo em vista essa discussão, esse trabalho propõe uma abordagem teórica com sugestões de ações experimentais para uma discussão efetiva de temas relacionados a eletrostática, especificamente nas formas de eletrização, potencial elétrico, lei de Gauss, campo elétrico de uma esfera e o uso de um eletroscópio eletrônico como uma tentativa de mostrar a relação existente entre o fenômeno prático e algumas particularidades da teoria.

O texto a seguir está estruturado em seções que contém teorias concomitantemente a uma abordagem experimental: Na seção dois há uma discussão sobre as cargas elétricas e a forma como interagem entre si, além dos tipos de materiais e como reagem a estas cargas; Na seção três serão discutidos os processos de eletrização, que podem ser por meio do atrito, indução e contato, além de sugestões de experimentos para melhor compreensão; Na seção quatro é introduzida a ideia de potencial elétrico e formas de estimá-lo; Na seção cinco é introduzido a lei de Gauss, por meio da ideia do fluxo elétrico, além de uma maneira de verificar a relação quadrática entre a carga elétrica e a distância; Nas considerações finais abordaremos a importância do tipo de abordagem sugerida nesse trabalho e a perspectiva de futuros estudos e abordagens e finaliza com as referências.

## 2. CARGA ELÉTRICA

A força elétrica é produzida por haver cargas elétricas, são de dois tipos e chamadas atualmente de carga positiva e negativa. Termo cunhado por Benjamin Franklin que ficou convencido que o processo de eletrização não criava cargas, apenas transferia de um corpo para outro (RADI, 2013). As principais características destas cargas são:

- Duas cargas positivas ou duas negativas se repelem;
- Uma carga positiva e outra negativa se atraem.

A relação de interação entre estas cargas produz uma força que é descrita pela lei de Coulomb, ela nos diz que a força elétrica ' $F$ ' é diretamente proporcional ao produto das cargas ' $Q_1$ ' e ' $Q_2$ ' e inversamente proporcional ao quadrado da distância ' $r$ ' multiplicado por uma constante de permissividade elétrica no vácuo ' $\epsilon_0$ '.

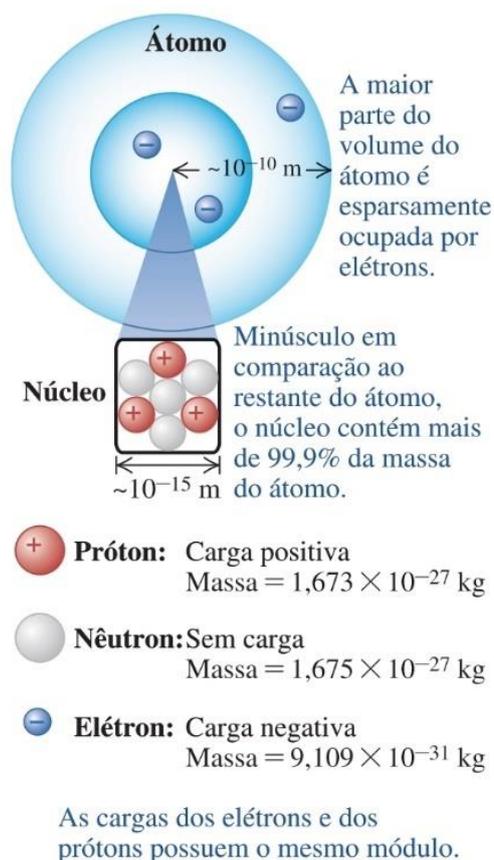
$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \hat{r}$$

A carga é quantizada, assim certa quantidade de carga ( $Q$ ) é a igual ao produto de ( $n$ ) enésimos múltiplos de vezes de um número fundamental ( $e$ ), que é o valor da carga elementar, extremamente pequeno na escala macroscópica e pode mudar seu sinal de acordo com o tipo de carga  $e = \pm 1,602177 \times 10^{-19}$  C (RADI, 2013).

$$Q = \pm n.e$$

A origem dessas cargas está intimamente relacionada à estrutura da matéria. Como é amplamente difundido, a menor estrutura da matéria são os átomos. Os átomos, no entanto, são constituídos basicamente de um conjunto de três partículas: os elétrons, que possuem a carga elétrica negativa, são partículas fundamentais do universo e ficam em uma área do átomo chamada de eletrosfera interagindo com a carga positiva; os prótons, que possuem como propriedade a carga elétrica positiva e os nêutrons que têm carga elétrica neutra e ficam na área mais densa do átomo, chamado de núcleo atômico, no entanto, ambos são resultado de interações de partículas ainda mais elementares, os quarks. Como os átomos possuem normalmente a mesma quantidade de prótons e elétrons, ou seja, a mesma quantidade de carga positiva e negativa, ele está em equilíbrio, eletricamente neutro. (YOUNG, 2015)

Figura 01: Ilustração do átomo e sua estrutura



Fonte: Young and Freedman, 2015

Em alguns materiais um fluxo de elétrons (corrente elétrica) consegue passar através do material com muita facilidade, em outros com certa dificuldade e em outros ainda não conseguem nem se mover. Os materiais podem ser classificados de acordo com estas propriedades e são chamados respectivamente de condutores, semicondutores e isolantes ou não-condutores.

Alguns materiais condutores são os metais: como o cobre, o alumínio, o ouro, e a prata, além disso, água da torneira, e o corpo humano (NUSSENZVEIG, 1997). É digno de nota que na ligação metálica, a corrente é totalmente conduzida pelos elétrons, enquanto os íons positivos estão fixos em posições regulares na estrutura cristalina, os dois elétrons de valência, ou seja, elétrons localizados na camada mais externa e conseqüentemente mais distante do núcleo de cada átomo se tornam livres na estrutura material, sendo, portanto, compartilhados por vários átomos. Assim são bons condutores de eletricidade por conter cargas móveis, um mar de elétrons livres. A região onde estão os elétrons livres é chamado de banda de

valência que tem uma diferença de energia em relação a banda de condução, onde há o vazio ou “buracos” pela falta de elétrons.

Nos Isolantes as cargas não conseguem se mover livremente, visto que os seus elétrons estão ligados fortemente em seus átomos específicos, como é o caso do vidro, da borracha e do plástico. Não conseguimos separar o elétron do núcleo e conseqüentemente não há corrente elétrica circulando pelo material (YOUNG, 2015). Podemos pensar que os elétrons estão presos por rédeas curtas e só podem se movimentar um pouco dentro do átomo. Uma característica interessante dos não-condutores é a polarização induzida, ela ocorre quando o corpo não-condutor é submetido a um campo elétrico forte e como consequência o núcleo é atraído em uma direção e o elétron é empurrado na direção oposta, ao mesmo tempo que estão fortemente ligados. Quando chegamos ao ponto de equilíbrio das forças, deixamos o material polarizado, ou seja, com as cargas ligeiramente deslocadas.

Os semicondutores são materiais que estão entre os condutores e os isolantes, tais como silício e germânio, que possuem quatro elétrons em sua órbita mais externa. As propriedades elétricas dos semicondutores podem ser mudadas drasticamente pela adição de quantidades específicas de certos átomos (impurezas), essas dopagens criam junções do tipo ‘n’ e ‘p’. Na junção do tipo n(n-type) há a adição de fósforo que possui cinco elétrons na sua última camada. Pela regra do octeto, que diz que os átomos devem possuir oito elétrons na sua camada de valência de modo a adquirir estabilidade, quando o silício se liga ao fósforo haverá um elétron livre excedente. Na junção tipo p(p-type) é adicionado boro que possui apenas três elétrons na camada de valência, quando se ligarem com o silício haverá uma lacuna, visto que falta um elétron para formar o octeto. Geralmente, a condutividade do material aumenta com a temperatura, em contraste com os condutores metálicos (RADI,2013).

### **3. PROCESSOS DE ELETRIZAÇÃO**

Um objeto em seu estado natural está em equilíbrio, isto é, possui a mesma quantidade de carga positiva e negativa. Assim, para causar um desequilíbrio neste corpo e eletriza-lo, excesso de partículas positivas ou negativas, é necessário a utilização de algum processo físico. Estes processos são: a eletrização por atrito, indução e contato.

### 3.1 ELETRIZAÇÃO POR ATRITO

#### 3.1.1 Teoria

O processo de eletrização por atrito, também chamado de triboeletrização, é o mais antigo, mais comum e mais conhecido dos processos de eletrização. Dois corpos, que estão inicialmente neutros, são atritados um no outro, com isso, alguns elétrons de um corpo são arrancados e transferidos para o outro corpo. Como resultado, o objeto que perde os elétrons fica carregado positivamente e o que recebe os elétrons fica carregado negativamente.

Esse processo só ocorre entre corpos feitos de materiais diferentes, além disso um mesmo material pode tanto perder elétrons, ficando positivamente carregado, como ganhar elétrons, ficando negativamente carregado. Isso depende totalmente da afinidade dos dois materiais que estão sendo atritados. Por exemplo: quando o algodão é atritado ao vidro, o vidro perde elétrons para o algodão e se torna positivo, enquanto que o algodão fica negativo. Já no caso do atrito do âmbar e algodão, o que ocorre é que o algodão perde elétrons para o âmbar, tornando-se positivo, ao passo que o âmbar fica negativo. Através de vários experimentos entre eletrização de materiais diferentes, construiu-se uma tabela de série triboelétrica dos materiais. Nessa tabela se um certo material for atritado com algum outro que está abaixo dele na colocação da tabela, ele se tornará positivo e outro material negativo; por outro lado, se estiver acima, nosso material ficará negativo e o outro se tornará positivo. (MACHADO, 2000)

TABELA 01: Materiais e triboeletrização

| Materiais  |                  |  |
|--|------------------|--|
|  | pele humana seca |  |
|  | couro            |  |
|  | pele de coelho   |  |
|  | vidro            |  |
|  | cabelo humano    |  |
|  | fibra sintética  |  |
|  | lã               |  |
|  | chumbo           |  |
|  | pele de gato     |  |
|  | seda             |  |
|  | aluminio         |  |
|  | papel            |  |
|  | algodão          |  |
|  | aço              |  |
|  | madeira          |  |
|  | âmbar            |  |
|  | borracha dura    |  |
|  | níquel e cobre   |  |
|  | latão e prata    |  |
|  | ouro e platina   |  |
| poliéster  |                  |  |
| filme de PVC   |                  |  |
| poliuretano  |                  |  |
| polietileno (fita adesiva)   |                  |  |
| polipropileno  |                  |  |
| vinil (PVC)  |                  |  |
| silicone   |                  |  |
| teflon   |                  |  |

Fonte: [static.preparaenem.com/conteudo/images/serie-triboeletrica.jpg](http://static.preparaenem.com/conteudo/images/serie-triboeletrica.jpg)

É preciso ressaltar que na eletrização por atrito os dois corpos adquirem a mesma quantidade de carga em módulo, porém com sinais opostos, garantindo a lei da conservação da carga. A lei da conservação da carga simplesmente explicita que cargas não surgem do nada, é o desequilíbrio de cargas que anteriormente estavam em equilíbrio (neutra). De forma que a soma total das cargas positivas e negativas permanece constante no tempo e é zero no parâmetro universal.

### 3.1.2 Proposta Experimental

Para realizarmos o experimento e verificar o processo de eletrização por atrito é necessária:

- Uma cuba de acrílico;
- Um pedaço de plástico PVC;
- Guardanapos de papel.

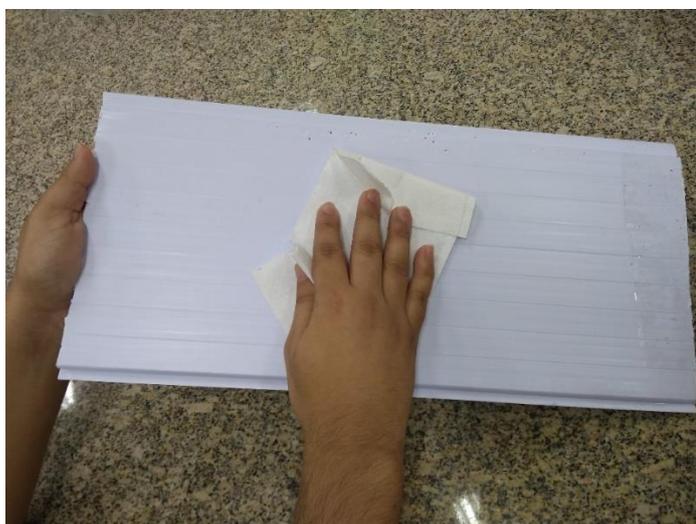
Atritamos o guardanapo no primeiro processo com a cuba de plástico, após isso atritamos outro guardanapo com o plástico PVC. A tabela de série triboelétrica nos ajuda a inferir o tipo de carga que obteremos em cada um dos materiais, tudo que precisamos fazer é procurar na tabela os materiais que vamos atritar e inferir pelas suas posições quem vai perder ou ganhar elétrons.

Figura 02: Atrito do papel com cuba de acrílico. O acrílico ganha carga positiva



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 03: Atrito do papel com o PVC. O PVC fica carregado negativamente



Fonte: Elaborado pelo autor

No caso do atrito entre o guardanapo de papel e a cuba de acrílico, o primeiro recebe elétrons do segundo, como resultado o papel fica com carga resultante negativa e a cuba de acrílico com a carga positiva. No segundo, quando o papel for atritado com o PVC, o papel vai ceder elétrons e ficar com a carga resultante positiva e o PVC ficará com carga positiva.

Uma maneira de nos certificarmos que os objetos não estão neutros, após o processo, é com o uso de um eletroscópio, o mais comum é o de folhas. Esse aparelho consiste de uma haste metálica condutora, tendo em sua extremidade superior, uma esfera também metálica e, na extremidade inferior, duas folhas metálicas leves, sustentadas de forma que possam abrir e fechar livremente, assim quando aproximamos um objeto carregado da esfera, as folhas metálicas de mesmo sinal vão se repelir. (TORRES, 2016)

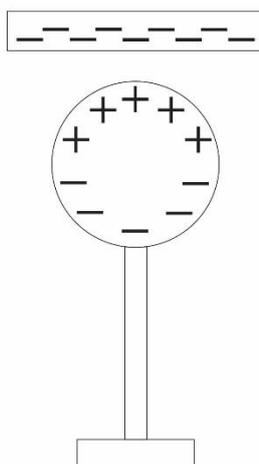
Infelizmente, não é possível inferir se a carga do objeto em questão é positiva ou negativa, além de não ser possível quantificá-las, apenas é possível provar que a carga existe por meio da interação das folhas no interior. No entanto, com o uso de um eletroscópio eletrônico, que será introduzido na seção 5.3.2, podemos determinar o sinal da carga dos materiais de forma bem simples, apenas com a aproximação. (SAMPAIO *et al.*, 2017)

## 3.2 ELETRIZAÇÃO POR INDUÇÃO

### 3.2.1 Teoria

No processo de indução não é necessário haver contato entre os materiais condutores para movimentar as suas respectivas cargas. Nesse caso temos um corpo carregado (indutor) e um corpo neutro (induzido). Quando o indutor se aproxima do induzido, as cargas de sinais opostos se acumulam na região mais próxima ao indutor. Se o indutor é positivo, ele atrai os elétrons do induzido e na região próxima do indutor o induzido fica negativo. Esses elétrons vêm das regiões mais afastadas, e assim, nessas regiões, o induzido apresenta uma carga positiva, de igual valor. No entanto, como um todo, o corpo está eletricamente neutro, esse processo é conhecido como indução eletrostática, que dura enquanto o indutor for mantido próximo. (PSSC, 1963)

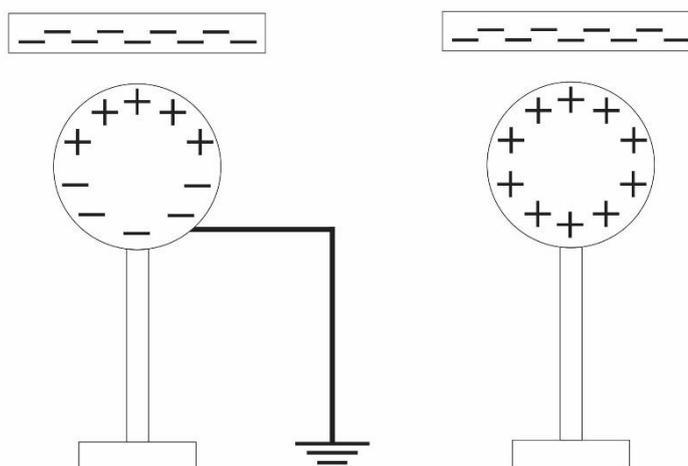
Figura 04: O objeto acima está previamente carregada e induz uma separação de cargas na esfera



Fonte: Elaborado pelo autor

Após o aparecimento destas duas regiões de cargas diferentes na esfera podemos aterra-la. Assim a região mais afastada do indutor fica neutra eletricamente, entretanto, como um todo o corpo possui uma carga elétrica não-nula. Depois de desconectar o fio-terra e ser afastado do indutor, o corpo ficará eletrizado com carga elétrica de sinal oposto ao indutor.

Figura 05: Após o aterramento a esfera fica carregada positivamente



Fonte: Elaborado pelo autor

No caso de um material isolante existe uma ‘força’ semelhante, porém menos intensa. Nem as partículas positivas nem as negativas podem afastar-se livremente de seus átomos. Só podem ser ligeiramente deslocadas de suas posições, as partículas de sinais opostos do indutor ficam mais próximas dele, o objeto está eletricamente polarizado.

Um fato interessante é que a esfera que for carregada por meio da indução, não precisa estar em contato com a cuba para haver interação das cargas, e não faz diferença se houver contato, visto que a cuba é isolante, ou seja, estão com os elétrons bem presos ao núcleo. Não há eletrização por contato, ou seja, movimento de cargas.

### 3.2.2 Proposta Experimental

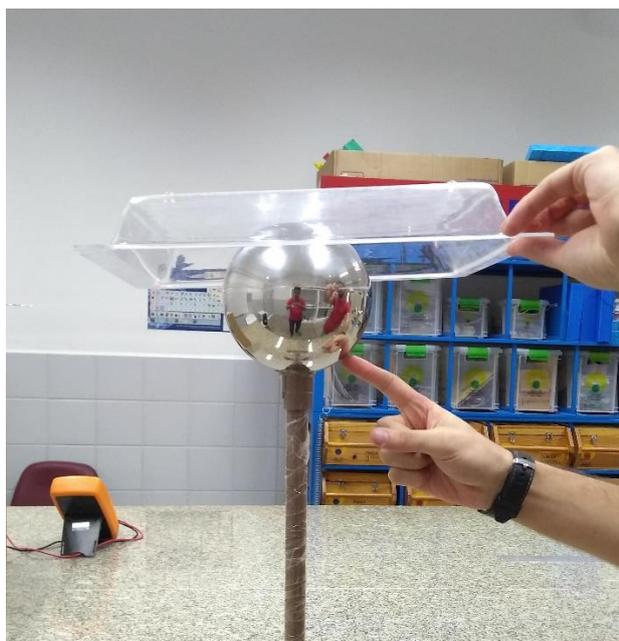
Para o experimento de eletrização por indução a seguir, vamos precisar de:

- Guardanapos de papel;
- Cuba de acrílico;
- Um pedaço de PVC;
- Esfera condutora de metal (aço) oca de 14 centímetros de diâmetro com um suporte isolante de PVC (montar como imagem 06).

Com o propósito de induzir a separação de cargas na esfera, vamos usar a cuba e a placa de PVC que adquiriram suas respectivas cargas de sinais diferentes

ao serem carregados por atrito na seção anterior 3.1.2. Um Isolante também não pode ser carregado por indução, é impossível visto que não escoam cargas do objeto, por isso foi necessário usar o atrito anteriormente para carregá-los.

**Figura 06:** Induzindo e aterrando esfera de aço



Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar de estar neutra, visto que não perdeu elétrons, a cuba deslocou os elétrons de forma vai adquirir um campo elétrico e conseqüentemente a capacidade de mover os elétrons da esfera na sua proximidade, que por ser de metal, podem fluir livremente. Assim, a cuba atrai as cargas de sinais opostas às suas e as cargas de mesmo sinal do indutor se afastarão do objeto e interagirão com a o solo por meio do aterramento, atraindo cargas de valores opostos e conseqüentemente ficarão em equilíbrio. No entanto, a carga total da esfera será de sinal oposto ao indutor, podemos nos certificar da existência dessas cargas por meio de um eletroscópio de folhas e identificar os seus tipos pelo eletroscópio eletrônico, discutido na seção 5.2.1.

Se faz altamente necessário a realização de práticas experimentais como esta proposta, para que haja um melhor entendimento dos conceitos físicos. A figura 05, por exemplo, é bem conhecida de livros didáticos quando tentam explicar a eletrização por indução. No entanto, apenas tal figura não consegue dar ao

estudante uma visão clara do fenômeno, conseqüentemente não entenderão o que é o aterramento na prática. O objetivo, do aterramento, é que a esfera e o solo interajam e troquem cargas elétricas entre si, lembrando que a terra é neutra, assim como somos bons condutores, um ser humano descalço pisando no solo pode ser usado como uma forma de aterramento.

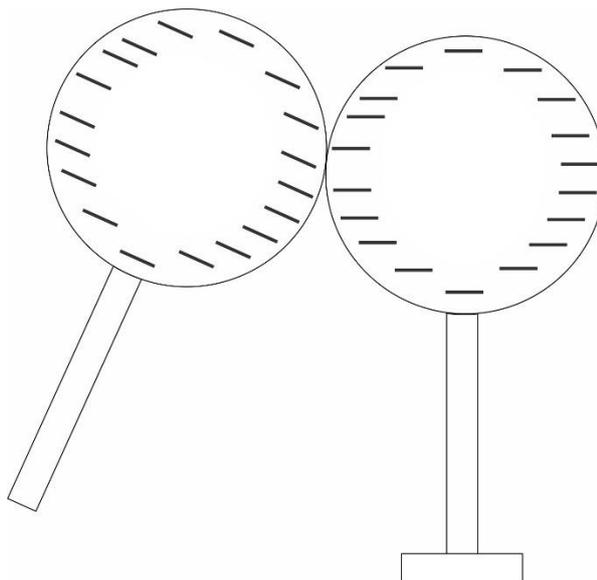
Quando estamos lidando com altas correntes elétricas é muito perigoso e pode causar danos ao corpo, quando usado como aterramento um ser humano. No entanto, estamos lidando com cargas estáticas e uma pequena corrente vai passar pelo seu corpo e talvez sinta um pequeno choque.

### 3.3 ELETRIZAÇÃO POR CONTATO

#### 3.3.1 Teoria

O processo de eletrização por contato é muito comum por causar um desequilíbrio na distribuição das cargas em materiais condutores, visto que neles ocorre uma grande mobilidade dos elétrons. Um material já eletrizado com certa quantidade de carga, positiva ou negativa, é posto em contato com outro inicialmente neutro. Se o corpo for negativo, ocorre um fluxo de elétrons desse corpo para o corpo neutro, e os dois adquirem uma certa carga negativa, de tal forma que a soma das cargas é igual à carga inicial do corpo carregado. Se o corpo for positivo, então lhe faltam elétrons, assim algumas dessas partículas do material neutro são transferidos no contato. O resultado é que ambos ficam positivos, com cargas tais que a soma é igual a carga positiva original, confirmando uma lei muito importante da física a conservação da carga elétrica. Tal princípio nos informa que os processos de eletrização não criam cargas, apenas as transferimos de um corpo a outro. (MACHADO, 2000)

Figura 07: Cargas após contato entre esferas



Fonte: Elaborado pelo autor

Suponha duas esferas condutoras de raios  $r_1$  e  $r_2$  e que a carga antes do contato são  $q_1$  e  $q_2$  e que no momento do contato os potenciais das esferas, que será definido adiante, sejam iguais. Depois do contato as esferas terão carga  $q'_1$  e  $q'_2$ . Assim os potenciais após o toque serão:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q'_1}{r_1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q'_2}{r_2}$$

Sabemos pela lei da conservação da carga que a quantidade de carga final no processo é igual ao seu valor inicial.

$$q_1 + q_2 = q'_1 + q'_2$$

Isolando a carga  $q'_1$  e substituindo na equação acima e depois de uma manipulação algébrica. Obtemos a carga  $q'_2$  após o contato em função das cargas iniciais.

$$q'_2 = \frac{q_1 + q_2}{1 + \frac{r_1}{r_2}}$$

No caso particular de dois condutores idênticos, com o mesmo raio ( $r_1=r_2$ ), oco e de mesmo material condutor, e que antes do contato só havia carga elétrica na esfera  $q_1$ , ou seja, a carga inicial de  $q_2$  é zero. Assim, considerando que os dois corpos idênticos vão interagir por contato, a carga em cada esfera será:

$$q'_1 = q'_2 = \frac{(q_1)}{2} \quad (1)$$

Assim, a carga do condutor inicial se divide pela metade entre os dois condutores esféricos de mesmo raio após o contato, como era de se esperar.

### 3.3.2 Proposta Experimental

Para esse experimento iremos utilizar:

- Duas esferas ocas metálicas(aço) idênticas com diâmetro de 14cm em seus respectivos suportes de PVC;
- Guardanapos de papel;
- Cuba de acrílico;
- Um pedaço de PVC.

A cuba e o PVC vão adquirir cargas por meio do atrito, como visto na seção 3.1.2, após isto, uma esfera será carregada por indução, como discutido na seção 3.2.2. De forma que uma esfera adquirirá uma carga negativa “-Q”, e a outra esfera estará inicialmente neutra. Ao colocarmos as duas esferas em contato, os potenciais entre as duas cargas ficarão iguais, e quando as separarmos, dividida em duas partes com carga “-Q/2”, como descrito pela equação 1.

**Figura 08:** Divisão de carga entre esferas de aço idênticas



Fonte: Elaborado pelo autor

Uma maneira de inferir se ambas as esferas adquiriram carga é usando um eletroscópio de folhas. Este instrumento simples permite a detecção de cargas

elétricas quando aproximamos o objeto eletrizado na direção do dispositivo (LUZ, 2007). No entanto, se usarmos de um eletroscópio eletrônico que será discutido na seção 5.2.1 e que tem como base um transistor de efeito de campo (SAMPAIO *et al.*, 2017), é possível avaliar, relacionando a carga e a distância que estão do dispositivo, que ambas as esferas irão provocar um efeito semelhante no circuito do eletroscópio. Quando estiverem a aproximadamente a mesma distância da antena, tal efeito implica que as cargas são aproximadamente iguais.

## 4. POTENCIAL ELÉTRICO

### 4.1 TEORIA

Um dos objetivos da física é identificar as forças básicas de nosso mundo e determinar se são forças conservativas, ou seja, se existe alguma energia potencial associada a esta força. Um dos motivos de associar a energia potencial com a força é que podemos aplicar o princípio da conservação de energia mecânica para sistemas fechados. Experimentalmente, os físicos descobriram que a força elétrica é conservativa, possuindo, conseqüentemente, uma energia potencial (elétrica) associada a esta força.

Quando uma partícula carregada se desloca por um campo elétrico, este exerce uma força que realiza um trabalho sobre a partícula. O trabalho ( $W$ ) realizado contra as forças elétricas para mover uma partícula entre os pontos  $a$  e  $b$  é a integral do produto escalar da força elétrica ( $F$ ) com um deslocamento infinitesimal ao longo da trajetória da partícula ( $d\vec{l}$ ) em cada ponto da trajetória.

$$W_{a \rightarrow b} = \int_a^b \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

O trabalho realizado por uma força conservativa sempre pode ser expresso em função de sua energia potencial elétrica ( $U$ ). Assim, quando a partícula se move de um ponto no qual a energia é  $U_a$  até um ponto no qual a energia potencial é  $U_b$ , a variação de energia é a diferença entre esses pontos.

$$W_{a \rightarrow b} = U_a - U_b = -(U_b - U_a) = -\Delta U$$

Havendo alguma distribuição de carga, que produz um campo elétrico, estamos calculando o trabalho necessário para mover uma pequena carga de um lugar para outro. É de nosso conhecimento que a força elétrica é diretamente

proporcional ao produto das cargas elétricas, para nosso propósito é mais interessante considerar o trabalho realizado no transporte de uma unidade de carga.

Como o campo elétrico é força por unidade de carga (Newton/Coulomb), podemos substituir a força, na equação do trabalho, por campo elétrico (E) vezes a carga ( $q_0$ ), obtendo a diferença de potencial (V) entre dois pontos, a e b.

$$V_a - V_b = \frac{W_{a \rightarrow b}}{q_0} = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

No caso de uma esfera condutora, se calcularmos a diferença de potencial entre dois pontos e considerarmos que o campo elétrico (E) gerado por esta esfera condutora uniformemente carregada é radial. Teremos como resultado:

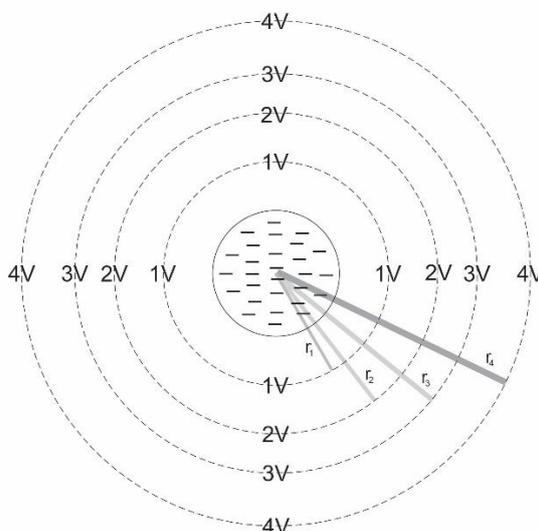
$$V_a - V_b = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int_a^b \frac{dr}{r^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_a} \right)$$

Por conveniência tomaremos como os limites de integração um ponto de referência qualquer (r) e o outro ponto de referência no infinito, obteremos então a função potencial elétrico, que depende apenas da distância r:

$$V = - \int_r^\infty \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (2)$$

A equação 2 implica na existência de regiões com o mesmo valor de potencial, chamada de equipotenciais, ou seja, o potencial não muda visto que a distância permanece constante, criando assim regiões com o mesmo potencial.

Figura 09: Regiões equipotenciais de uma esfera carregada negativamente



Fonte: Elaborado pelo autor

No caso de um campo elétrico uniforme, onde o vetor campo elétrico é o mesmo em todos os pontos, dois pontos, a e b, situados na mesma linha de campo a uma certa distância, a diferença de potencial elétrico é o produto do campo elétrico “E”, que é constante e sai da integral, vezes a distância entre os pontos a e b, que chamaremos de “d”.

$$V_a - V_b = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} = E \int_a^b d\vec{l} = E \cdot d \quad (3)$$

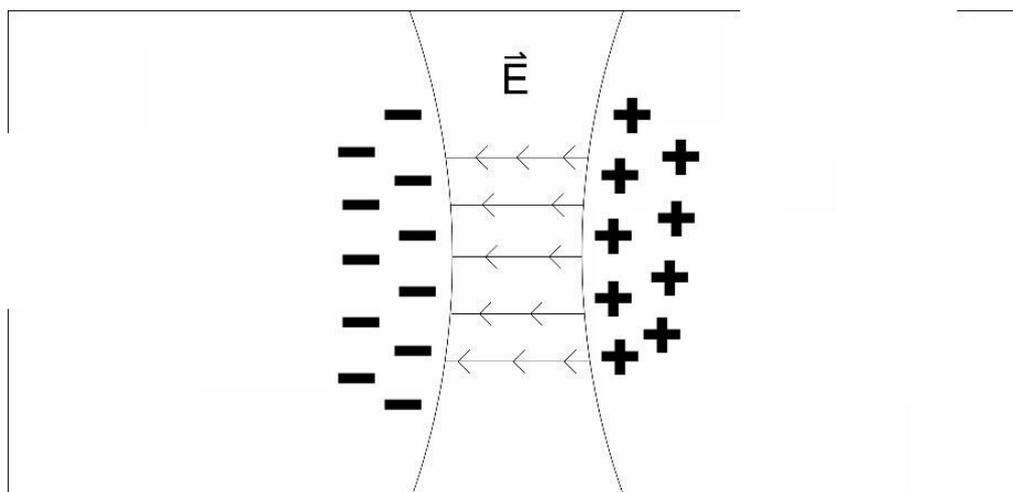
## 4.2 PROPOSTA EXPERIMENTAL

Para esse experimento utilizamos:

- Duas esferas ocas metálicas de 14 centímetros de diâmetro em seus respectivos suportes (uma carregada negativamente por indução, o método pode ser visto na seção 3.2.2, e outra neutra);
- Papel milimetrado;
- Régua.

Uma das esferas estará carregada negativamente por indução ou contato, que estão respectivamente nas seções 3.2.1 e 3.3.1. A segunda estará inicialmente neutra. O indutor, esfera carregada negativamente, irá repelir os portadores de carga negativa da outra esfera e atrairá a carga positiva. O resultado é a formação de um campo elétrico aproximadamente uniforme entre as esferas, visto que as cargas ficarão concentradas pontualmente, como pode ser visto na figura 10, e a uma distância de ordem de grandeza menor que a do raio da esfera. Como consequência, o potencial se torna uma função linear que depende apenas da distância entre as esferas.

Figura 10: Campo elétrico aproximadamente uniforme entre as esferas



Fonte: Elaborado pelo autor

No entanto, quando aproximamos as esferas, ao chegarmos a uma distância da ordem de decímetros, é possível ver uma descarga elétrica, transmissão de portadores de carga pelo ar, visíveis na forma de uma centelha elétrica. Até aqui assumiu-se que estamos fazendo experimentos no vácuo, entretanto, estamos envoltos pelo ar da atmosfera em todas as direções e o experimento também, assim é esperado que haja interação e influência destes parâmetros no experimento. O ar a nossa volta é um ótimo isolante, todavia, quando as esferas se aproximam e estão bem próximas o ar que está entre as esferas ioniza temporariamente, ou seja, elétrons são arrancados de seus átomos, e como resultado o ar age como condutor, permitindo a passagem das cargas entre as esferas por meio de uma centelha elétrica.

Primeiro tocamos as esferas e marcamos este ponto no papel milimetrado, que servirá de referência para medir a distância. Aproximamos então a esfera carregada(negativamente) em direção a esfera neutra e aterrada em cima do papel milimetrado. No momento que a centelha elétrica for observada e ouvida, a distância entre as esferas é marcada no papel milimetrado, medida com o auxílio de uma régua e computada. Como pode ser observado na figura 11, foi colado um papelão na parte inferior do suporte para facilitar a marcação da distância rente ao papel milimetrado.

Se um material condutor tiver de alguma forma contato com o solo, o corpo estará aterrado. Se um condutor estiver carregado negativamente, entrar em contato com o solo, seus elétrons em excesso movimentam-se para a terra e se torna neutro

novamente (TORRES *et al.*, 2016). Para aterrar a esfera basta tocar nela com o dedo da mão, com a pessoa estando descalça ou o uso de algum condutor que tenha contato com o solo. Visto que o ser humano é um condutor, qualquer distribuição em excesso de carga, será transferido para a terra. Uma outra opção é conectar o fio no terminal do aterramento da rede elétrica.

Figura 11: Medição da distância entre as esferas após a centelha, a esfera da direita está eletrizada e a da esquerda está neutra e aterrada



Fonte: Elaborado pelo autor

A medição de campo elétrico usando este método depende diretamente das condições climáticas, como umidade (água suspensa no ar), pressão, que depende da altitude (distância média entre os átomos pode variar), temperatura (energia cinética média das partículas do ar). No entanto, como estamos medindo valores de distância muito pequenos, estas influências são desprezíveis. Recomenda-se uma sala climatizada (ar condicionado) visto que o equipamento diminui a umidade do ar.

O ar é um ótimo isolante, no entanto, quando sujeito a um campo elétrico de alta intensidade, suficientemente forte para ionizar o ar, se torna condutor e permite a passagem de elétrons. 30 kV/cm (30 quilovolts por centímetro) é o valor de campo

aproximado no qual pode ocorrer a ruptura dielétrica do ar em condições atmosféricas normais (DUFRESNE, 2016). Com estas informações, podemos estimar o potencial elétrico por meio da distância para a qual a centelha aconteceu. Para realizar tais medições, precisamos saber a distância entre as duas extremidades das esferas, nas regiões onde aconteceu a centelha, que vamos chamar de 'x', medido em centímetros (cm), e assim obter o potencial 'V' em quilovolts (kV). Considerando a pressão como 1 atmosfera(atm) temos:

$$V(x) = 30[KV/cm] * x$$

Esse método, bastante utilizado para medir o potencial elétrico, é chamado de "spark gap" e são bem embasados nas literaturas experimentais (DUFRESNE, 2016; HOGG *et al.*, 2013; UNGUREANU *et al.*, 2014). Este método é geralmente utilizado com objetos carregados conectados à rede elétrica com altas tensões, alternada ou contínua, assim o objeto é continuamente alimentado por uma corrente.

No experimento descrito nesta seção existe uma diferença importante, as cargas serão mantidas estáticas. Todavia, há uma limitação deste processo, que é chamado de descarga de corona. Visto que o objeto carregado eletrostaticamente tem um alto potencial, algumas cargas escapam para o ar, que fica ionizado por causa da troca de cargas entre a atmosfera e o condutor, como resultado descarrega o objeto. Além da influência da umidade, a água, que é um bom condutor, está no ar na forma de vapor que pode acelerar esse processo de descarga.

Mesmo com todas essas limitações e influências atmosféricas, este método pode fornecer algumas estimativas interessantes sobre o potencial eletrostático destes corpos carregados.

Quando a esfera de 14 cm(centímetros) de diâmetro era eletrizada pelo processo de indução com a cuba de acrílico, os valores de potencial variavam entre 3 e 15 Kv (quilovolts), e conseqüentemente a distância das esferas quando apareciam as centelhas variavam entre 0,1 e 0,5 cm (centímetros) e carga entre 2 e 5,12  $\mu\text{C}$  (microcoulomb). Quando a esfera foi eletrizada por contato com o auxílio de um gerador de Van de Graaff, obtivemos valores maiores de potencial, máximo de 40,5 Kv (quilovolts), visto que as distâncias mensuradas puderam variar até 1,35 cm (centímetros) e a carga até 8,4 $\mu\text{C}$  (microcoulomb).

## 5. LEI DE GAUSS

### 5.1 TEORIA

#### 5.1.1 Campo Elétrico

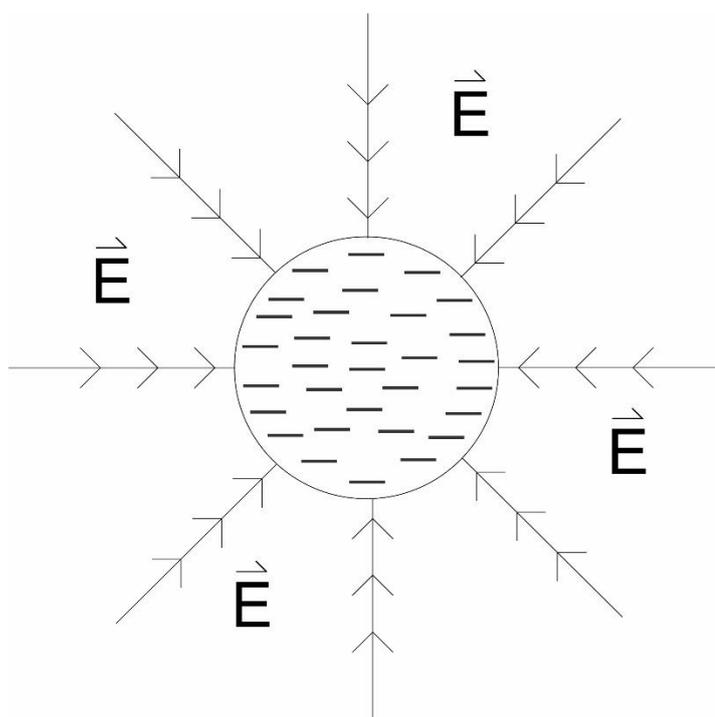
Quando duas partículas carregadas interagem no vácuo a uma certa distância, surge uma pergunta elementar: como é possível que uma carga saiba da existência da outra? Um modo de interpretarmos a ação dessa força é por imaginar uma “ação a distância”, ou seja, essa força poderia agir pelo espaço vazio sem a necessidade de uma interação física. Se imaginarmos que a carga elétrica de alguma forma modifica as propriedades do espaço ao redor dele e que por conseguinte a segunda carga sente essa modificação e a resposta é a força elétrica, teríamos uma ótima explicação para esse efeito (YOUNG, 2015).

O corpo eletricamente carregado produz um campo elétrico, este campo está presente mesmo que não haja mais cargas interagindo com o sistema e serve de intermediador para comunicar a existência da carga é conseqüentemente a força de interação entre as cargas, assim o campo está presente em todos os pontos ao redor do corpo carregado. Um campo é qualquer quantidade física que pode assumir diferentes valores para diferentes pontos no espaço (FEYNMAN, 2008).

Para verificar se existe um campo elétrico em certo ponto, colocamos uma carga teste, partícula carregada, assim, se ela sofre a ação de uma força elétrica, concluímos que existe um campo elétrico naquela região. Visto que a força é uma grandeza vetorial, o campo elétrico também, pode ser definido como a força elétrica por unidade de carga.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \hat{r} \quad (3)$$

Figura 12: Campo elétrico de esfera carregada negativamente



Fonte: Elaborado pelo autor

### 5.1.2 Fluxo Elétrico

Existe uma relação alternativa entre a distribuição de cargas e campos elétricos. Caso conhecêssemos a configuração do campo elétrico em uma dada região, o que podemos inferir da distribuição de cargas nesta região? Suponha uma caixa que seja feita de um material que não produza nenhum efeito sobre qualquer campo elétrico, essa caixa é uma superfície fechada visto que engloba todo o volume de cargas e que pode ou não ter cargas (YOUNG, 2015).

Sabemos que uma distribuição de cargas produz um campo elétrico e que uma carga teste sofre ação de uma força produzida por esse campo, essa carga teste desloca-se então em torno de pontos próximos da distribuição de carga. Medindo as forças em diversos pontos é possível produzir um mapa tridimensional do campo elétrico e, examinando os detalhes do mapa é possível calcular o valor exato da carga existente no interior da caixa.

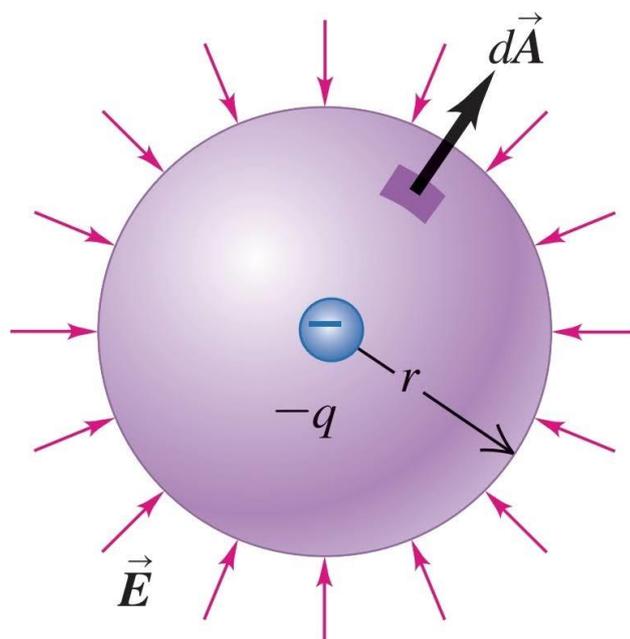
Existe um fluxo de campo elétrico ' $\Phi_E$ ' que passa por determinada área de uma superfície 'A'. Este fluxo depende da quantidade de linha de campo elétrico que

estão entrando nesta superfície. Usaremos o produto escalar entre o campo e um vetor perpendicular a área para obter o fluxo naquela área. Assim, o fluxo total é soma de todos os produtos escalares dos componentes de área com o campo elétrico.

$$\phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Essa integral de superfície, do componente perpendicular do campo elétrico em relação a soma das áreas infinitesimais, expressa a ideia de um fluxo sob uma superfície fechada de uma forma matemática mais rigorosa.

Figura 13: Fluxo de campo elétrico numa área fechada esférica



Fonte: Young and Freedman, 2015

Como no caso de uma esfera, o vetor campo elétrico ' $E$ ' é sempre paralelo ao vetor diferencial de área " $dA$ ". Neste caso a superfície é fechada.

$$\phi_E = \vec{E} \oint d\vec{A} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} (4\pi r^2) = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

O fluxo elétrico de uma esfera carregada independe da distância, assim se aumentamos a distância e consequentemente a área da superfície da esfera, menos campo passará em cada componente.

### 5.1.3 Lei de Gauss e o fluxo elétrico

A lei de Gauss é uma alternativa à lei de Coulomb, embora sejam equivalentes, apresentam, de uma forma diferente a relação entre a carga elétrica e o campo elétrico. Esta lei afirma que o fluxo elétrico total através de uma superfície fechada “ $\Phi_E$ ” é a integral de superfície do produto escalar entre o campo elétrico “ $E$ ” e um vetor infinitesimal “ $da$ ”, que é diretamente proporcional a carga elétrica líquida “ $Q_{int}$ ” existente no interior da superfície e é inversamente proporcional a permissividade elétrica do vácuo ‘ $\epsilon_0$ ’.

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

No caso de uma superfície gaussiana esférica concêntrica com uma esfera de raio ‘ $R$ ’, se estamos a uma distância ‘ $r$ ’ que está externa a esfera, podemos inferir que o campo elétrico é radial e perpendicular a cada ponto da superfície gaussiana. Assim o fluxo elétrico ‘ $\Phi_E$ ’ é o produto escalar do campo elétrico “ $E$ ” e a área “ $A$ ” de uma esfera, que é  $4\pi$  vezes o raio ‘ $r$ ’ ao quadrado, de forma que retornamos a “famosa” Lei de Coulomb:

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 A} = \frac{Q}{\epsilon_0 4\pi r^2}$$

## 5.2 PROPOSTA EXPERIMENTAL

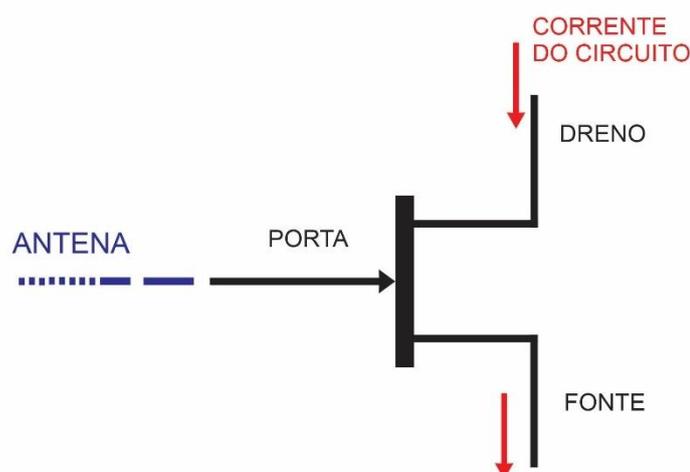
### 5.2.1 Eletroscópio Eletrônico

A fim de visualizar de maneira efetiva alguns fenômenos como a eletrização de corpos, o dispositivo mais utilizado é o eletroscópio de folhas metálicas. Entretanto, não conseguimos saber o tipo de carga (polaridade), nem obter alguma medida quantitativa do fenômeno, nem relacionar com alguma equação já conhecida da eletrostática. Além de tudo isto, quando há pequenas quantidades de carga, a repulsão não é muito nítida, às vezes, imperceptível. Por isso existe a necessidade de um dispositivo capaz de identificar o tipo de carga, obter medidas quantitativas, relacionar o fenômeno com as equações conhecidas e ser extremamente sensível.

Dentre todas as necessidades o eletroscópio eletrônico só não consegue suprir a segunda.

O eletroscópio eletrônico pode ser produzido com o uso de um transistor de efeito de campo (FET- *Field Effect Transistor*). Esse tipo de transistor tem uma maior sensibilidade na detecção de campos eletrostáticos e pode inclusive ser utilizado para obtenção de medidas de diferença de potencial elétrico entre as portas do dispositivo. O FET é um dispositivo amplificador, por isso é largamente usado em projetos de amplificação de sinais, e apresenta três terminais designados pelas letras G, D e S que são respectivamente a *Gate*(porta), *Drain*(dreno) e *Source*(fonte). Esse dispositivo é controlado pela diferença de potencial (tensão) entre a porta e a fonte, que controla a corrente que passa entre a fonte e o dreno. (MALVINO, 1997, p. 552).

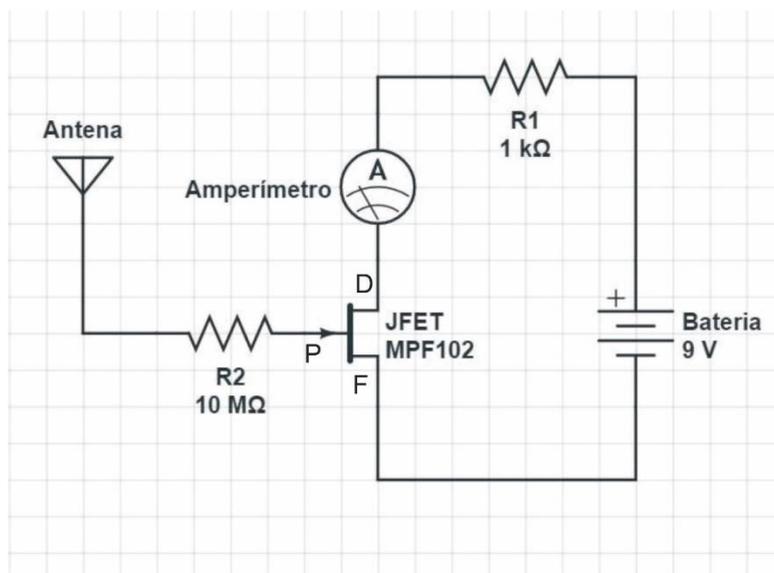
Figura 14: Esquema do FET MPF 102 e suas portas



Fonte: Elaborado pelo autor

Para produzir o circuito, no qual o FET é o principal componente, vamos precisar de uma protoboard, uma bateria de 9 volts (9v), um multímetro (com função amperímetro), um resistor de 1 quiloohm(1k $\Omega$ ) (opcional), um resistor de 10 megohms(10M $\Omega$ ), um pedaço de fio de cobre (antena) e um transistor de efeito de campo JFET MPF102. O circuito esquematizado pode ser visto a seguir:

**Figura 15:** Circuito do eletroscópio montado e esquematizado no circuitlab

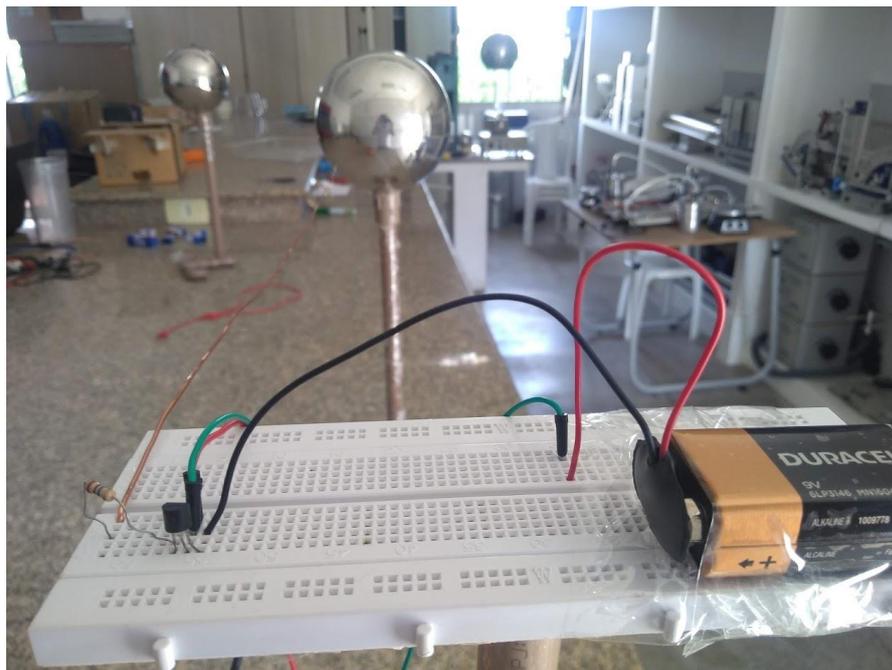


Fonte: Elaborado pelo autor

Quando um objeto carregado negativamente se aproxima da antena que é feita de um material condutor (cobre), os elétrons são repelidos por ter a carga com o mesmo sinal do objeto carregado, como consequência as camadas de depleção dentro do transistor aos poucos vão limitando a passagem de elétrons, diminuindo assim a corrente até o estrangulamento, ou seja, quando a tensão tiver o seu valor máximo e as camadas impedirem totalmente a passagem de elétrons, ou seja, a corrente entre a fonte e o dreno será igual a zero (SAMPAIO, 2017).

Para que as medidas de corrente sejam realmente válidas devemos assumir que o campo elétrico é o mesmo para valores de corrente iguais no circuito, assim presume-se que para um dado valor de corrente indicado no circuito o módulo do campo elétrico nas imediações da antena provocados por um corpo nas proximidades seja o mesmo. Esse entendimento é fundamental para assumirmos que os valores de corrente obtidos no multímetro, por meio de sua função amperímetro, têm como gerador fundamental o objeto carregado que aproximamos da antena. Não existe uma relação matemática que consiga quantificar o potencial elétrico da antena com a corrente no eletroscópio devido às imprecisões relacionadas a polarização do transistor.

Figura 16: Circuito do eletroscópio montado enquanto a esfera de metal se aproxima da antena



Fonte: Elaborado pelo autor

### 5.2.2 Experimento com o Eletroscópio Eletrônico

Para o experimento vamos utilizar:

- O eletroscópio eletrônico montado (circuito esquematizado na figura 15);
- Duas esferas condutoras de aço ocas de 14 centímetros(cm) de diâmetro em seus respectivos suportes de pvc;
- Cuba de acrílico;
- Peça de PVC;
- Guardanapos de papel.

Primeiramente eletrizamos a cuba de plástico acrílico ou pvc por atrito com o papel, a eletrização por atrito está na seção 3.1.2, lembrando que a carga resultante após o atrito pode ser positiva ou negativa dependendo dos materiais utilizados. Induzimos as cargas na esfera ao aproximarmos o objeto eletrizado, a indução é discutida na seção 3.2.2, e garantimos que no final do processo a esfera estará eletrizada negativamente.

Após o processo de eletrização e indução, vamos aproximando a esfera carregada negativamente em direção a antena, até o momento o qual a corrente do circuito, cuja intensidade é medida no multímetro amperímetro, é igual a zero. A

distância da esfera até a antena é computada, e a carga é dividida com a outra esfera de metal idêntica que está neutra, divisão de cargas na seção 3.3.2. Após a carga ser dividida igualmente por contato, a esfera é novamente aproximada em direção a antena, dessa vez com menos carga, e quando a corrente for novamente zero, a carga é dividida mais uma vez e a distância computada, e assim sucessivamente.

Figura 17: Aparato experimental montado



Fonte: Elaborado pelo autor

É muito importante lembrar-se, como pode ser visto na imagem 17, que a antena precisa estar apontando na direção central da esfera e paralela, assim faz se necessário o uso de um suporte vertical, para que a antena fique na mesma altura da esfera.

Podemos estabelecer uma relação matemática e determinar a carga da esfera “Q”, que dependerá da carga inicial “Q<sub>0</sub>” e a quantidade de divisões de carga “n” realizadas por meio do contato entre as esferas:

$$Q = Q_0 \cdot 2^{-n}$$

Quando aproximamos a esfera carregada em direção a antena, ela repele os elétrons, por terem a mesma carga, impedindo a passagem da corrente no circuito. Como sempre, antes de dividir a carga, certificamos que a corrente no circuito é zero,

assim podemos assumir que o campo elétrico é constante visto que causa o mesmo efeito no transistor.

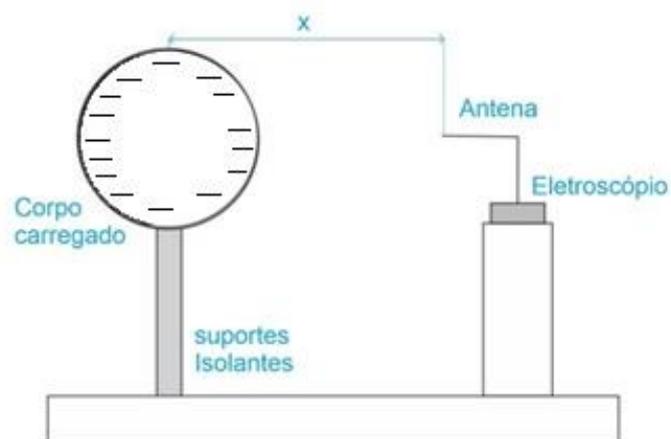
**Figura 18:** Equipamentos utilizados no experimento de divisão de cargas



Fonte: Elaborado pelo autor

As medidas foram feitas de forma manual, visto que aproximávamos a esfera eletrizada e quando o valor da corrente elétrica no circuito do eletroscópio zerasse a distância entre a antena e a esfera era medida e então o processo se repetia. Como a corrente se anula em todas as medidas, podemos supor que o campo elétrico detectado pela antena do eletroscópio permanecerá sempre constante em todas as medidas de distância realizadas, ou seja, variamos apenas a quantidade de carga pelas divisões e a distância que estão da antena.

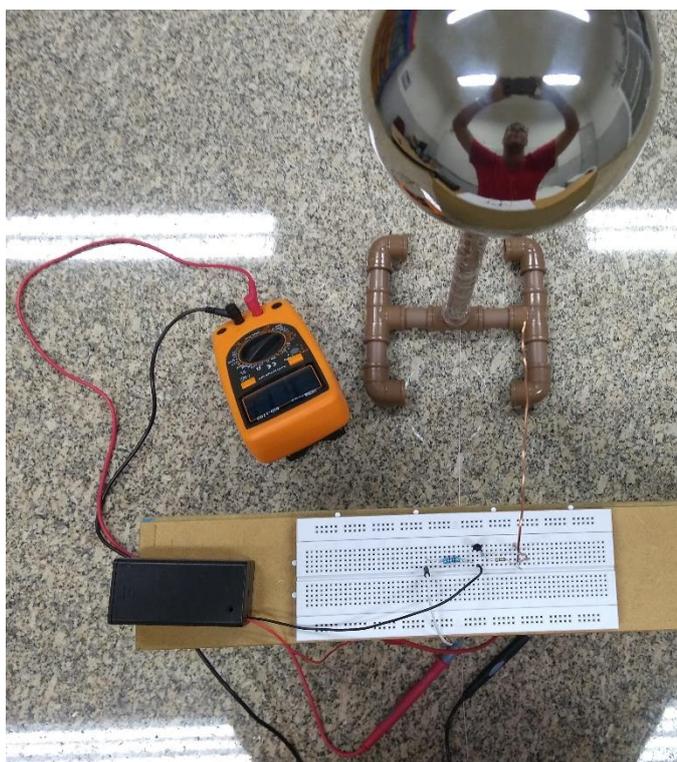
**Figura 19:** Esquema esfera carregada e dispositivo para detecção



Fonte: Elaborado pelo autor

Utilizamos também um gerador eletrostático de Van de Graaff, como opção possível para eletrizar a esfera de metal, entretanto é necessário que a cúpula do gerador esteja carregada negativamente. Se estiver positiva, podemos usar a indução para produzir na esfera uma carga resultante oposta.

**Figura 20:** Aproximação da esfera em direção a Antena



Fonte: Elaborado pelo autor

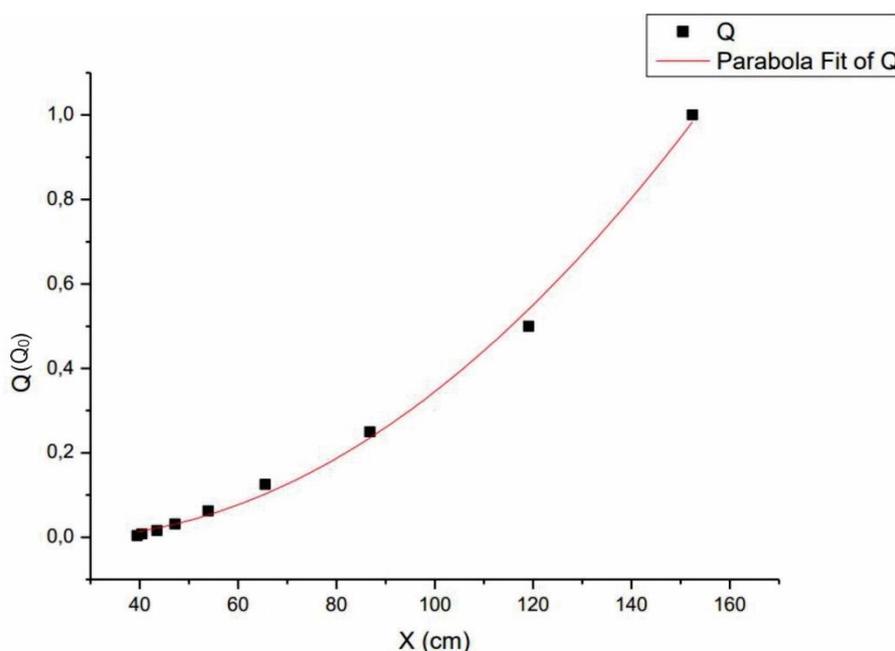
Ao aproximarmos a esfera com carga inicial “Q0” em direção a antena, vamos perceber que a corrente no multímetro está diminuindo, efeito do campo elétrico da esfera, quando a corrente for imediatamente zero marcamos a distância e dividimos a carga com uma esfera de aço idêntica. Assim obteremos ‘n’ divisões de cargas e valores de distância. Existe agora a possibilidade de estudar este comportamento.

O módulo do campo elétrico de uma esfera é obtido através da lei de Gauss (equação 3). Isolando a carga nesta equação vamos obter:

$$Q = E4\pi\epsilon_0 x^2$$

Visto que aproximamos a esfera em linha reta, podemos considerar apenas uma dimensão ‘x’. A carga da esfera é diretamente proporcional à distância ao quadrado. Assumindo que todos os outros valores são constantes e, obtendo diversas quantidades de divisão de carga e as suas respectivas distâncias em relação a antena, é possível plotar um gráfico e estudar como essas grandezas se relacionam.

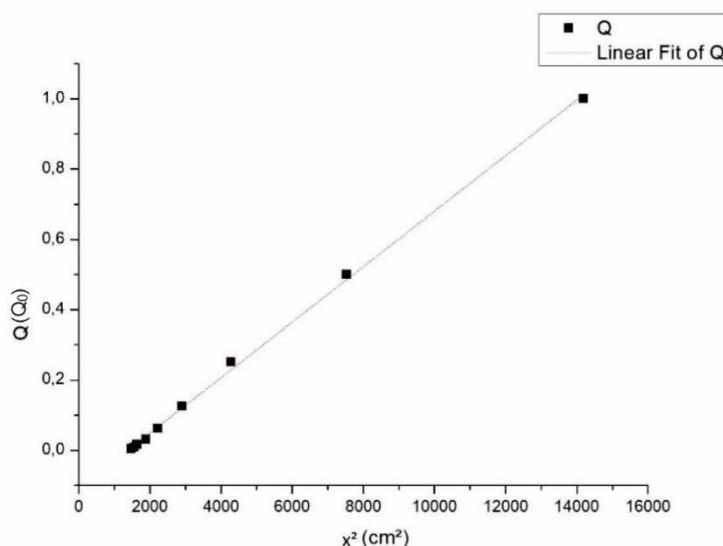
**Gráfico 01:** Divisão de carga em função da distância



Fonte: Elaborado pelo autor

Para uma análise mais simplista do fenômeno, elevamos os valores das distâncias ao quadrado, assim os valores de carga e distância se tornam diretamente proporcionais entre si. Vemos pelo gráfico 02 que a regressão linear se ajusta bem com os dados obtidos, de forma que os dados se encaixam bem em uma parábola.

Gráfico 02: Divisão de carga em função da distância quadrática



Fonte: Elaborado pelo autor

Assim, com um dispositivo relativamente simples e com baixo custo, conseguimos mostrar que, em uma esfera de metal carregada negativamente, existe uma relação entre a divisão de carga e a distância, que é aproximadamente quadrática, consequência direta da lei de Gauss.

## 6- CONSIDERAÇÕES FINAIS

A parte experimental é parte totalmente indissociável do processo de aprendizagem e é possível com materiais custo relativamente baixo, levantar algumas discussões importantes e essenciais acerca de efeitos e particularidades da teoria eletrostática. Embora a teoria seja muito importante, todo o desenvolvimento da teoria eletromagnética começou de forma experimental, ou seja, tentativas de

entender, quantificar e obter equações que explicassem os efeitos dos fenômenos que eram observados.

As propostas experimentais sobre os processos de eletrização se mostraram muito promissoras e poderiam ser capazes de criar muitas discussões acerca de cada um dos fenômenos. São ferramentas didáticas que sendo bem utilizadas pelo docente, seriam capazes ajudar os alunos agregar o conhecimento teórico ao experimental.

Conseguimos, por meio do estudo do potencial, promover estimativas de valores de potencial e assim estimar a carga da esfera de aço, valores difíceis de mensurar na prática, seriam necessários instrumentos de alta precisão que faltam em muitos laboratórios didáticos de graduação. O eletroscópio eletrônico é mais uma de várias outras ferramentas úteis e simples que nos ajudou a obter, por meio de dados experimentais, gráficos que condizem proporcionalmente com uma lei já estabelecida, a lei de Gauss. Espera-se no futuro encontrar uma relação entre o potencial entre as portas do FET e o Campo elétrico do objeto carregado, possibilitando assim a quantificação do campo elétrico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DUFRESNE, Steven. **MEASURING HIGH VOLTAGE IN MILLIMETERS (AND OTHER HV PROBE TRICKS)**. Hackaday, 2016. Disponível em: < <https://hackaday.com/2016/12/08/measuring-high-voltage-in-millimeters-and-other-hv-probe-tricks/> >. Acesso em: 12 de julho de 2022

FEYNMAN, Richard P. **Lições de física de Feynman Volume II**. Porto Alegre: Bookman, 2008

HAYT, William H.; BUCK, John A. **ELETROMAGNETISMO**. 8. ed, Porto Alegre: AMGH, 2013

HOGG, M. G.; Timoshkin, I.V.; MacGregor, S.J.; Wilson, M.P.; Given, M.J.; Wang, T. **Breakdown of Short Gaps at Atmospheric Pressure**. IEEE, 2013, ISBN 978-1-4673-5171-3

LUZ, Antônio Máximo Ribeiro; Alvarenga, Beatriz. **Física: volume único**. 2.ed, São Paulo: Scipione, 2007

MACHADO, Kleber Daum. **Teoria do Eletromagnetismo**. 1. ed. Ponta Grossa: UEPG, 2000

MALVINO, Alberto; BATES, David. **Eletrônica [recurso eletrônico]**. 8ª.ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MCMANUS, Jeff. **Demystifying electric flux and Gauss's law**, *phys. Teach.* **55**, 252-253 (2017)

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física básica, 3**. 1.ed, São Paulo: Edgard Blücher, 1997

PINHO ALVES, J. **Regras da transposição didática aplicadas ao laboratório**

**didático.** Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 17, n. 2, ag. 2000.

PSSC, **Física - Parte IV**, Editora Universidade de Brasília, tradução autorizada com direitos reservados para o Brasil pelo IBECC-UNESCO, 1963

RADI, Hafez A.; Rasmussen, John O. **Principles of physics for scientists and engineers.** Berlin Heidelberg: Springer,2013

SAMPAIO, Thiago Alves de Sá Muniz; RODRIGUES, Eriverton da Silva; SOUZA, Cícero Jailton de Moraes. **Aparato experimental para o ensino de tópicos da eletrostática: o eletroscópio com transistor de efeito de campo. Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 34, n. 1, p. 298-309, maio 2017. ISSN 2175-7941.

TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A. **Física moderna.** 6.ed, Rio de Janeiro: LTC,2014

TORRES, Carlos Magno A.; FERRARO, Nicolau Gilberto; SOARES, Paulo Antonio T.; PENTEADO, Paulo Cesar M. **Física ciência e tecnologia vol.3 Eletromagnetismo, Física moderna.**4. ed, São Paulo: Moderna,2016

UNGUREANU, Constantin; NEMTOI, Lacramioara Mihaela. **Peak Voltage Measurements Using Standard Sphere Gap Method.** Hindawi Publishing Corporation, Volume 2014, ID 980913, p. 1-5

YOUNG, Hugh D.; Freedman, Roger A. **Física III.** 14.ed, São Paulo: Pearson, 2015