



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ABAE TETUBA
FACULDADE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA-FACET
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

FÁBIO AMARAL QUARESMA

WILSON DE SOUSA FEIO

O ENSINO DA ELETRIZAÇÃO NA ANÁLISE METODOLÓGICA
TEÓRICO-EXPERIMENTAL COM O GERADOR DE VAN DE GRAAFF

ABAETETUBA-PA

07/2026

FÁBIO AMARAL QUARESMA

WILSON DE SOUSA FEIO

**O ENSINO DA ELETRIZAÇÃO NA ANÁLISE METODOLÓGICA
TEÓRICO-EXPERIMENTAL COM O GERADOR DE VAN DE GRAAFF**

Trabalho de curso apresentado a Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Abaetetuba, como requisito para obtenção do grau de Licenciatura em Física, sob orientação do Prof. Dr. José Francisco da Silva Costa.

ABAETETUBA-PA

07/2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A485e Amaral Quaresma, Fábio.
 O ENSINO DA ELETRIZAÇÃO NA ANÁLISE
 METODOLÓGICA TEORICO-EXPERIMENTAL COM O
 GERADOR DE VAN DE GRAAFF / Fábio Amaral Quaresma,
 Wilson De Sousa Feio. — 2026.
 55 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. José Franciscot da Silva Costa
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará,
Campus Universitário de Abaetetuba, Curso de Física, Abaetetuba,
2026.

1. Aprendizagem significativa . 2. Eletrização . 3.
Metodologia teorico-experimental . 4. Gerador de Van de
graaff . I. De Sousa Feio, Wilson. II. Título.

CDD 530

FÁBIO AMARAL QUARESMA

WILSON DE SOUSA FEIO

**O ENSINO DA ELETRIZAÇÃO NA ANÁLISE METODOLÓGICA
TEÓRICO-EXPERIMENTAL COM O GERADOR DE VAN DE GRAAFF**

Trabalho de curso apresentado a Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Abaetetuba, como requisito para obtenção do grau de Licenciatura em Física, sob orientação do Prof. Dr. José Francisco da Silva Costa.

DATA DA DEFESA: 27 /07 /2026

RESULTADO: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Francisco da Silva Costa

Faculdade de Formação e Desenvolvimento do Campo-FADECAM
Campus de Abaetetuba- CABAE-UFPA -Presidente/Orientador

Prof. Dr. Flávio Vargas Andrade

Faculdade de Ciências Naturais e Tecnologia-FACET.
Campus de Abaetetuba-CABAE-UFPA-Membro Interno

Prof. Dr. Elder Augusto Viana Mota

Faculdade de Ciências Naturais e Tecnologia-FACET.
Campus de Abaetetuba- CABAE-UFPA -Membro Interno

Profa. Me. Milena Pinheiro Barbosa

Faculdade de Ciências Naturais e Tecnologia-FACET.
Campus de Abaetetuba- CABAE-UFPA -Membro Interno

AGRADECIMENTOS 1

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso representa não apenas o encerramento de uma etapa acadêmica, mas também a concretização de um sonho que só foi possível graças ao apoio de muitas pessoas que estiveram ao meu lado ao longo desta jornada. Em primeiro lugar, agradeço a Deus e nossa senhora, fonte de inspiração, força e perseverança, que me sustentou nos momentos de dificuldade e iluminou meu caminho com esperança e fé.

Aos meus pais José Quaresma e Aldinéia Quaresma, expresso gratidão por serem o solo fértil onde pude crescer, aprender e desenvolver minhas capacidades.

Ao meu irmão Fulgêncio Quaresma, agradeço o companheirismo, incentivo e apoio incondicional. Cada palavra de motivação e cada gesto de carinho foram fundamentais para que eu seguisse firme, mesmo diante dos desafios.

Aos meus amigos/irmãos que a vida me deu, pelo incentivo e apoio, e em especial Wilson Feio pela parceria acadêmica, trabalho e na vida.

Aos professores do curso, registro minha profunda admiração e respeito e em especial a José Francisco pela orientação que me foi repassada. Foram mestres não apenas no conhecimento técnico, mas também na arte de ensinar com dedicação.

Este TCC é fruto de uma caminhada compartilhada. A cada pessoa que, de alguma forma, contribuiu para que eu chegasse até aqui, deixo meu mais sincero agradecimento.

AGRADECIMENTO 2

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por ter me dado força e perseverança para concluir esta etapa tão importante da minha formação.

À minha mãe, Rosa Maria, pelo incentivo constante e por acreditar em mim mesmo nos momentos mais difíceis. Sem o seu apoio, essa conquista não seria possível.

À minha esposa, Katiane Rodrigues, pela paciência, companheirismo e compreensão durante essa jornada, principalmente nos momentos de ausência e cansaço que essa caminhada exigiu.

Ao meu amigo, Fábio Amaral, pela parceria durante o desenvolvimento deste trabalho, e fora da vida acadêmica.

Aos meus padrinhos, Maria de Fátima e Marcilei, minha eterna gratidão por terem me acolhido em suas casas, oferecendo abrigo, carinho e apoio que foram essenciais para que eu pudesse seguir estudando e realizar este sonho.

Ao meu orientador, professor José Francisco, pela dedicação, paciência e valiosos ensinamentos transmitidos ao longo da orientação deste trabalho, contribuindo diretamente para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Por fim, a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação, seja com uma palavra de incentivo, um conselho ou um simples gesto de apoio. Cada um teve sua parcela de contribuição nessa conquista.

A todos, meu sincero e profundo agradecimento.

A Deus, pela infinita bondade, amor e dádiva
da vida. Sem ele nada seria possível,

“A imaginação é mais importante que o conhecimento.”

Albert Einstein

RESUMO

O estudo demonstra a viabilidade da metodologia da aprendizagem significativa aplicada ao ensino de eletrização por meio do gerador de Van de Graaff, destacando a importância da contextualização e da experimentação no ensino de Física. Aplica-se um questionário aos alunos da educação básica e que nunca tiveram acesso a laboratórios ou atividades experimentais o que reforça a necessidade de práticas que aproximem teoria e cotidiano. O objetivo geral consiste em compreender e validar a teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel, utilizando o gerador de Van de Graaff como recurso teórico-experimental para o estudo dos tipos de eletrização, enfatizando fenômenos presentes no dia a dia, como eletrização por atrito, contato e indução, além de fenômenos naturais como a formação de raios. A metodologia baseou-se na abordagem teórica contextualizada, articulada à experimentação com o gerador, permitindo que os alunos observassem fenômenos físicos de forma concreta. Os resultados mostram que a experimentação despertou maior interesse dos alunos, facilitou a compreensão dos conceitos e promoveu participação ativa durante as aulas, produzindo avanços estatisticamente significativos em quase todos os indicadores avaliados, com aumentos expressivos no interesse (+18 p.p.), na facilidade percebida (+39 p.p.) e na compreensão dos fenômenos físicos (+49 p.p.). Os testes Z confirmam que essas melhorias não ocorreram por acaso, apresentando valores p muito baixos, especialmente na compreensão e na vivência experimental. No conjunto, os resultados demonstram que integrar teoria e prática com o gerador de Van de Graaff transforma a percepção, o engajamento e o aprendizado dos alunos em Física. Conclui-se que a metodologia teórica/experimental com o gerador de Van de Graaff é eficaz para promover aprendizagem significativa, tornando o ensino de eletrização mais acessível, motivador e contextualizado.

Palavras-chave: Aprendizagem significativa, eletrização, metodológica teórico-experimental, gerador de Van de Graff.

ABSTRACT

The study demonstrates the feasibility of applying the meaningful learning methodology to the teaching of electrization through the Van de Graaff generator, highlighting the importance of contextualization and experimentation in Physics education. A questionnaire was administered to basic education students who had never had access to laboratories or experimental activities, reinforcing the need for practices that bring theory closer to everyday life. The general objective is to understand and validate David Ausubel's theory of meaningful learning, using the Van de Graaff generator as a theoretical–experimental resource for studying the types of electrization, emphasizing phenomena present in daily life, such as electrization by friction, contact, and induction, as well as natural phenomena such as lightning formation. The methodology was based on a contextualized theoretical approach combined with experimentation using the generator, allowing students to observe physical phenomena in a concrete way. The results show that experimentation increased students' interest, facilitated the understanding of concepts, and promoted active participation during classes, producing statistically significant improvements in almost all evaluated indicators, with expressive increases in interest (+18 p.p.), perceived ease (+39 p.p.), and understanding of physical phenomena (+49 p.p.). Z-tests confirm that these improvements did not occur by chance, presenting very low p-values, especially in understanding and experimental experience. Overall, the results demonstrate that integrating theory and practice with the Van de Graaff generator transforms students' perception, engagement, and learning in Physics. It is concluded that the theoretical/experimental methodology with the Van de Graaff generator is effective in promoting meaningful learning, making the teaching of electrization more accessible, motivating, and contextualized.

Keywords: Meaningful learning, electrization, theoretical–experimental methodology, Van de Graaff generator.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	13
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
3.1 APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE DEVID AUSUBEL.	14
3.2 PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DE CARGAS.....	15
3.3 TIPOS DE ELETRIZAÇÃO.....	16
3.3.1 Atrito	16
3.3.2 Contato	18
3.3.3 Indução	21
3.4 LEI DE GAUS	23
3.5 POTENCIAL ELÉTRICO E CAPACITÂNCIA	29
3.6 CAPACITÂNCIA DA ESFERA.....	30
3.7 CILINDRO CONDUTOR E CAPACITOR CILÍNDRICO	30
3.8 CAPACITOR DE PLACAS PARALELAS.....	33
3.9 HISTÓRIA DE VAN DE GRAAFF.....	34
3.10 O GERADOR DE VAN DE GRAAFF.....	36
3.11 LIMITE DE CARGA — EFEITO DE CORONA.....	37
3.12 GERADOR	38
3.12.1 Funcionamento do Gerador.	38
3.12.2 Componentes do Gerador.	39
3.13 TESTE Z	39
4. METODOLOGIA	40
4.1 Etapas do experimento.....	41
4.1.1 Efeito do vento elétrico- o torniquete.....	41
4.1.2 Simulador de para-raios	42
4.1.3 Feitos da repulsão nos cabelos com a aproximação.	42
5. RESULTADOS E DISCURSÃO	43
5.1 TESTE 1: Da pesquisa com os alunos	43
5.2 TESTE 2: Estatística Z.....	47
CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS	51
APÊNDICE	54

1. INTRODUÇÃO

O ensino de Física na educação básica enfrenta, historicamente, desafios relacionados à falta de contextualização, à predominância de metodologias tradicionais e à ausência de práticas experimentais que permitam ao aluno compreender os fenômenos físicos de forma concreta. Em grande parte das escolas brasileiras, o ensino permanece centrado na exposição teórica, na memorização de fórmulas e na resolução mecânica de exercícios, o que contribui para a desmotivação, a dificuldade de aprendizagem e a percepção equivocada de que a Física é uma disciplina inacessível (BISCUOLA, 2016).

O professor deve ser um agente dinâmico na construção de metodologias interativas que seja abordada com o objetivo de o aluno ter um melhor aprofundamento a respeito de problemas e suas soluções, utilizando os formalismos matemático e físico do formalismo estudado e assim resolvê-los tanto do seu cotidiano quanto para o desenvolvimento do ensino aprendizagem (VAILLANT; MARCELO, 2012).

Nesse cenário, torna-se essencial investigar metodologias que integrem teoria e prática, favorecendo a construção de significados e aproximando o estudante dos fenômenos presentes em seu cotidiano. A aprendizagem significativa, proposta por David Ausubel, destaca que o aluno aprende de forma mais efetiva quando novos conhecimentos se conectam a estruturas cognitivas já existentes, exigindo do professor uma postura dinâmica, contextualizada e investigativa (AUSUBEL, 1963).

A justificativa deste estudo emerge da constatação, evidenciada pelos dados coletados, de que a maioria dos alunos nunca tiveram acesso a laboratórios ou atividades experimentais, revelando uma lacuna estrutural que compromete o desenvolvimento de competências essenciais no ensino da eletricidade (GASPAR, 2013); (MACHADO, 2000)

A situação-problema que orienta a pesquisa pode ser sistematizado da seguinte forma como promover aprendizagem significativa em eletrização em um contexto escolar marcado pela ausência de práticas experimentais e pela predominância de metodologias tradicionais? A hipótese central sustenta que a utilização do gerador de Van de Graaff como recurso teórico-experimental é capaz de aumentar o interesse, facilitar a compreensão e melhorar o desempenho dos alunos na aprendizagem dos tipos de eletrização.

A partir dessa hipótese, formulam-se as perguntas norteadoras: a) De que maneira a experimentação com o gerador de Van de Graaff contribui para a compreensão dos fenômenos eletrostáticos? b) A metodologia teórica-experimental aumenta o interesse dos alunos pela Física? c) A contextualização dos fenômenos físicos favorece a aprendizagem significativa? d) Quais mudanças ocorrem na percepção dos alunos antes e depois da aplicação da metodologia experimental?

Com base nessa abordagem, a pesquisa destaca como objetivo geral, compreender e validar a teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel (AUSUBEL, 1978), utilizando o gerador de Van de Graaff como recurso teórico-experimental para o estudo dos tipos de eletrização, enfatizando fenômenos presentes no dia a dia, como atração e repulsão de cargas elétricas, eletrização por atrito, contato e indução, além de fenômenos naturais como a formação de raios.

A pesquisa fundamentou-se na metodologia teórico-experimental, articulando princípios da eletrostática (Lei de Gauss, eletrização, condutores e isolantes) e demonstrações práticas com o gerador de Van de Graaff. Um questionário foi aplicado antes e depois da intervenção, permitindo comparar percepções, dificuldades e avanços dos estudantes. Os achados revelam que a experimentação elevou significativamente o interesse, a facilidade percebida e a compreensão dos fenômenos físicos, confirmando que a integração entre teoria e prática é decisiva para promover aprendizagem significativa e transformar a relação dos alunos com a Física.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral consiste em compreender a teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel, utilizando o gerador de Van de Graaff como recurso teórico-experimental para o estudo dos tipos de eletrização, enfatizando fenômenos presentes no dia a dia, como eletrização por atrito, contato e indução, além de fenômenos naturais como a formação de raios.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE DEVID AUSUBEL.

A educação contemporânea exige práticas pedagógicas que superem a mera memorização e promovam aprendizagens duradouras e aplicáveis. Nesse contexto, a teoria da aprendizagem significativa, desenvolvida por David Ausubel, destaca-se como uma das mais relevantes. Segundo AUSUBEL (1968), “o fator isolado mais importante que influencia a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já sabe”. Essa afirmação sintetiza a centralidade dos conhecimentos prévios na construção de novos significados.

A teoria da aprendizagem significativa parte da ideia de que novos conteúdos devem ser integrados à estrutura cognitiva existente do estudante. Para isso, são necessários subsunçores, ou seja, conceitos prévios que funcionam como âncoras para novos conhecimentos (AUSUBEL, NOVAK & HANESIAN, 1980).

De acordo com SILVA (2020), a aprendizagem significativa ocorre quando três condições são atendidas: O material é potencialmente significativo, o estudante possui conhecimentos prévios relevantes, há predisposição para aprender.

AUSUBEL (1968) distingue três tipos principais: Representacional: compreensão de símbolos isolados; Conceitual: formação de conceitos a partir de atributos essenciais; Proposicional: entendimento de ideias expressas em proposições.

Esses níveis demonstram que a aprendizagem significativa é um processo gradual e hierárquico.

O uso de organizadores prévios é uma estratégia fundamental para facilitar a conexão entre novos conteúdos e saberes já existentes (MOREIRA, 2012). Além disso, metodologias ativas como projetos, debates e resolução de problemas favorecem a construção de significados (DIESEL, MARTINS & REHFELDT, 2018).

A teoria também dialoga com a pedagogia crítica de Paulo Freire, que defende partir da realidade do educando para promover aprendizagens contextualizadas e emancipadoras (FREIRE, 2019). A teoria da aprendizagem significativa representa uma ruptura com modelos tradicionais de ensino.

Ao valorizar os conhecimentos prévios e a predisposição do estudante, promove aprendizagens duradouras, contextualizadas e aplicáveis. Para que se concretize, exige do professor uma postura mediadora, capaz de criar condições para que o aluno seja protagonista de sua formação.

Assim, a aprendizagem significativa não é apenas uma teoria cognitivista, mas um caminho para uma educação transformadora, alinhada às demandas da sociedade contemporânea.

3.2 PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DE CARGAS

O princípio de conservação de cargas diz, em essência, que a carga elétrica total de um sistema isolado permanece constante. Para duas esferas A e B eletrizadas, pode-se provar este princípio de conservação.

Suponha duas esferas condutoras, A e B, inicialmente com cargas q_A e q_B . O sistema formado por A e B tem carga total, inicial de,

$$Q_{\text{total}} = q_A + q_B \quad (1)$$

Se essas esferas forem colocadas em contato (e depois separadas), as cargas se redistribuem entre elas, mas nenhuma carga “aparece” ou “desaparece”: apenas migra de uma esfera para a outra. Depois do contato, as cargas passam a ter cargas q'_A e q'_B .

Considerando o princípio de conservação de cargas, tem-se que,

$$q_A + q_B = q'_A + q'_B \quad (2)$$

Ou seja, a soma das cargas antes do contato é igual à soma das cargas depois do contato. Para esferas de mesmo raio. Isto é, Se A e B forem esferas condutoras idênticas e forem colocadas em contato, a carga se distribui igualmente. Ou seja,

$$q'_A = q'_B = \frac{q_A + q_B}{2} \quad (3)$$

Isto é, verdade, pois usando a expressão (2), tem que,

$$q'_A + q'_B = \frac{q_A + q_B}{2} + \frac{q_A + q_B}{2} = q_A + q_B \quad (4)$$

O que mostra, de forma direta, o princípio de conservação de cargas elétricas aplicado a duas esferas: a carga total do sistema permanece constante, apenas se redistribui entre os corpos.

O fato que leva dois ou mais corpos eletrizados possuírem o princípio de conservação de carga, pode ser explicada no mundo atômico porque: a) Elétrons são partículas estáveis. Isto é, não se criam nem se destroem em processos comuns de eletrização. b) O núcleo atômico não participa da eletrização, pois os nêutrons e prótons não podem sair, ficam presos no núcleo por forças nucleares fortíssimas. Só os elétrons podem se mover. c) A carga elétrica é quantizada,

pois toda carga é múltiplo de $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Isso impede “perdas” ou “criações” contínuas de carga (HALLIDAY, 1996).

3.3 TIPOS DE ELETRIZAÇÃO

Os gregos dos tempos antigos foram os primeiros a fazer descobertas notáveis no domínio dos fenômenos elétricos. Já em 428-348 a.C., durante a era de Platão, reconhecia-se que quando um pedaço de âmbar é esfregado vigorosamente assumia propriedades elétricas.

As origens de várias palavras comumente usadas hoje remontam ao trabalho de Gilbert, incluindo "eletrização", "eletricidade", "elétron" e "eletrodo". No entanto, foi somente na década de 1770 que o conceito de separar objetos em materiais “elétricos” e “não elétricos” foi descartado. A classificação de condutores e isoladores que hoje conhecemos foi adotada por Gilbert. Em 1733, Charles François de Cistenay Du Fay tornou-se o primeiro a afirmar, com base em resultados experimentais, a existência de dois tipos de eletricidade: positiva e negativa. Consequentemente, Du Fay conduziu experimentos que envolveram a segregação de objetos eletrificados nessas duas categorias distintas, a seguir podemos ver as principais características de cada tipo de eletrização (TIPLER, 2002).

3.3.1 Atrito

Ocorre quando há o atrito entre dois tipos de materiais distintos, onde um deles ficará carregado positivamente e o outro negativamente. Para saber se determinado material está com carga negativa ou positiva podemos consultar a série triboelétrica para saber a afinidade eletrônica de cada material. Vale ressaltar que, matérias e metais de mesma composição não adquirem carga elétrica por atrito (LUIZ, 2016).

O fenômeno atômico ocorre porque os átomos das superfícies ficam extremamente próximos. As ligações químicas das últimas camadas eletrônicas são perturbadas e alguns materiais têm maior afinidade eletrônica e outros têm menor afinidade. Dessa maneira, o material que ganha elétrons fica negativo e o que perde elétrons fica positivo. Compreende-se que toda eletrização por atrito representa migração de elétrons. A tabela 1 representa a série triboelétrica e os tipos de materiais que adquirem cargas positivas ou negativa.

Tabela 1-Série Triboelétrica

POSIÇÃO NA SÉRIE	MATERIAL	TENDÊNCIA DE ELETRIZAÇÃO
1	Ar	Perde elétrons
2	Vidro	Perde elétrons
3	Nylon	Perde elétrons
4	Lã	Perde elétrons
5	Pele humana	Perde elétrons
6	Cabelo humano	Perde elétrons
7	Algodão	Perde elétrons
8	Madeira	Perde elétrons
9	Papel	Perde elétrons
10	Borracha natural	Ganha elétrons
11	Polietileno (plástico comum)	Ganha elétrons
12	PVC	Ganha elétrons
13	Silicone	Ganha elétrons
14	Teflon	Ganha elétrons
15	Enxofre	Ganha elétrons

Fonte: Elaborada pelos autores (abril, 2026).

A explicação da eletrização por atrito dado na tabela 1 mostra que Materiais acima na série tendem a perder elétrons e materiais abaixo na série tendem a ganhar elétrons. Ou seja, Vidro (2) + Lã (4) tem-se que o vidro perde elétrons e fica positivo; a lã ganha elétrons e fica negativa e assim acontece com outros materiais da série. Isto é, PVC (12) + Cabelo (6), tem-se que o PVC ganha elétrons e fica negativo; o cabelo perde elétrons e fica positivo.

Aplicação 1

Um bastão de vidro é atritado com um pedaço de lã. Após o atrito, o bastão de vidro adquire uma carga elétrica de $+4,0 \times 10^{-8}$ C. Determine, a) Quantos elétrons o bastão de vidro perdeu nesse processo? b) Qual é a carga elétrica adquirida pela lã? c) Explique, com base na série triboelétrica, por que o vidro fica positivo e a lã fica negativa.

Resolução

a) Sabemos que a carga elementar é $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C. O bastão de vidro ficou com carga $+4,0 \times 10^{-8}$ C, o que significa que perdeu elétrons. O número de elétrons perdidos é dado pela expressão,

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

Levando na expressão os dados do problema, vem que,

$$N = \frac{4,0 \times 10^{-8}}{1,6 \times 10^{-19}} = 2,5 \times 10^{11}.$$

Ou seja, o bastão de vidro perdeu $2,5 \times 10^{11}$ elétrons.

b) Na eletrização por atrito, a carga total do sistema se conserva. Se o vidro ficou com $+4,0 \times 10^{-8}$ C, então a lã ganhou exatamente essa mesma quantidade de carga, mas com sinal oposto. Ou seja,

$$Q_{\text{lã}} = -4,0 \times 10^{-8} \text{ C}.$$

A lã fica com carga $-4,0 \times 10^{-8}$ C.

c) Pela série triboelétrica, o vidro está em posição superior à lã, o que significa que o vidro tende a perder elétrons e a lã tende a ganhar elétrons. Assim, ao atritar vidro com lã, verifica-se que o vidro: perde elétrons, tornando-se com excesso de cargas positivas e dessa maneira, torna-se carregado positivamente. A Lã ganha os elétrons que o vidro perdeu e, portanto, fica com excesso de cargas negativas ficando carregada negativamente. Esse processo é um exemplo claro de que eletrização por atrito é sempre migração de elétrons de um material para outro, pois não há fluxo de cargas positivas, estando essas cargas presas no núcleo por forças intensas.

3.3.2 Contato

Quando dois ou mais objetos condutores se tocam, e pelo menos um tem carga elétrica, ocorre uma redistribuição da carga em suas superfícies. Por exemplo, se o condutor A tiver carga negativa e o condutor B for neutro, o contato forma um novo condutor. A carga de A se redistribui pela superfície externa. O objeto neutro mantém a carga adquirida com o mesmo sinal de A. A soma das cargas em um sistema deve ser constante antes, durante e após o contato, e a forma dos condutores influencia a carga elétrica final.

Quando dois condutores entram em contato, verifica-se que os elétrons das camadas externas dos átomos ficam livres para se mover. Se um corpo tem excesso de elétrons e o outro tem falta, os elétrons fluem espontaneamente do corpo negativo para o positivo. Esse fluxo ocorre até que ambos alcancem o mesmo potencial elétrico.

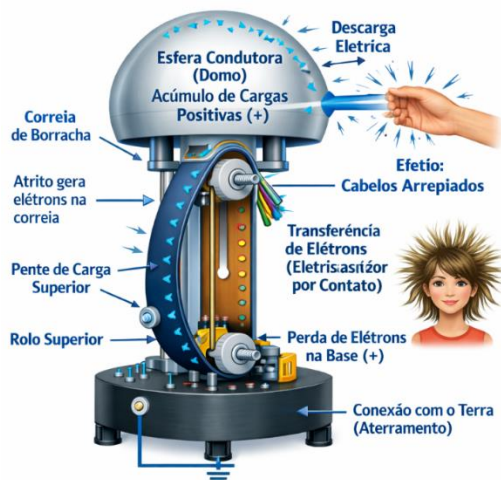
A conservação de cargas no contato pode ser verificada usando a expressão (1). Isto é,

$$q_A + q_B = q'_A + q'_B$$

Ou seja: A carga total do sistema permanece constante. Os elétrons apenas se redistribuem entre A e B.

A explicação desse processo pode ser verificada com o gerador de Van de Graaff. A correia leva cargas até o domo e quando a correia encosta no domo, ocorre eletrização por contato. Verifica-se que o domo acumula carga porque está isolado e tem grande capacidade elétrica. Ou seja, o gerador usa eletrização por atrito para carregar a correia e eletrização por contato para carregar o domo, como pode ser verificado na figura 1.

Figura 1- Processos de eletrização de atrito e contato realizado num gerador de Van de Graaff



Fonte: Elaborada pelos autores com auxílio Microsoft 365 (copilot, abril, 2026).

A figura mostra o funcionamento do gerador de Van de Graaff, onde a correia de borracha transfere elétrons por atrito e contato entre os roletes e os pentes de carga. As cargas positivas acumulam-se no domo metálico, produzindo descargas elétricas e o famoso efeito dos cabelos arrepiados ao tocar na esfera.

Aplicação 2

Um gerador de Van de Graaff possui um domo esférico de raio $R = 0,15 \text{ m}$. Em condições normais de laboratório, o campo elétrico máximo no ar antes da ruptura é aproximadamente

$E_{\text{máx}} \approx 3,0 \times 10^6 \text{ V/m}$. (a) Calcule o potencial elétrico máximo $V_{\text{máx}}$ que o domo pode atingir antes de ocorrer descarga pelo ar. (b) Modele o domo como um condutor esférico isolado e calcule sua capacitância C . (c) Suponha que o sistema de correia e pentes injete uma corrente de carga aproximadamente constante de $I = 1,0 \mu\text{A}$ no domo. Em quanto tempo o gerador atinge $V_{\text{máx}}$, desprezando perdas? Considere: $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$.

Resolução

(a) Para um domo esférico, o campo na superfície é aproximadamente

$$E = \frac{V}{R} \Rightarrow V_{\text{máx}} = E_{\text{máx}} R.$$

Substituindo:

$$V_{\text{máx}} = 3,0 \times 10^6 \text{ V/m} \times 0,15 \text{ m} = 4,5 \times 10^5 \text{ V} = 450 \text{ kV}.$$

Assim sendo, o valor do potencial elétrico é de 450KV

(b) Para uma esfera condutora isolada, verifica-se que,

$$C = 4\pi\epsilon_0 R.$$

Substituindo os valores dados, vem que,

$$C = 4\pi \times 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \times 0,15 \text{ m}. \quad C \approx 4\pi \times 8,85 \times 10^{-12} \times 0,15 \approx 1,67 \times 10^{-11} \text{ F} = 16,7 \text{ pF}.$$

Logo, o valor da capacitância é de $F=16.7\text{pF}$.

(c) A relação entre carga, capacitância e potencial é:

$$Q = C V.$$

Logo, a carga máxima no domo será dada por,

$$Q_{\text{máx}} = C V_{\text{máx}} = 1,67 \times 10^{-11} \text{ F} \times 4,5 \times 10^5 \text{ V}.$$

Ou

$$Q_{\text{máx}} \approx 7,5 \times 10^{-6} \text{ C} = 7,5 \mu\text{C}.$$

Sabendo que a corrente é

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{Q_{\text{máx}}}{I}.$$

Com

$$I = 1,0 \mu\text{A} = 1,0 \times 10^{-6} \text{ A}.$$

Assim,

$$\Delta t = \frac{7,5 \times 10^{-6} \text{ C}}{1,0 \times 10^{-6} \text{ A}} = 7,5 \text{ s}.$$

Assim, o intervalo de tempo será de 7,5s.

Esse problema mostra que no laboratório é possível medir a corrente usando um eletroscópio ou um circuito com resistor conhecido e medir a queda de tensão para estimar a corrente de carga do gerador. O potencial também pode ser determinado usando a distância de faísca entre o domo e um eletrodo ligado a terra, relacionando a distância com o campo de ruptura do ar. A capacitância do ponto de vista experimental é possível a partir da expressão dada por $C = Q/V$, usando $Q = I \Delta t$ (tempo de carga até a primeira faísca) e o V estimado pela distância de ruptura.

3.3.3 Indução

O processo de indução de carga elétrica envolve a transferência de elétrons sem a necessidade de contato físico. Ao aproximar um corpo carregado, um corpo neutro se torna eletricamente carregado. Para isso, é necessário conectar temporariamente o indutor à Terra ou a um corpo que possa fornecer ou receber elétrons. O indutor pode ter carga positiva ou negativa, enquanto o corpo induzido permanece neutro. A polarização ocorre quando as cargas em B se separam. Conectando B à Terra, os elétrons fluem, adquirindo uma carga elétrica quando a conexão é feita.

Aplicação 3 – Campo elétrico e nuvem

Durante uma tempestade, a base de uma nuvem cumulonimbus pode ficar negativamente carregada, induzindo carga positiva no solo. Considere a seguinte situação simplificada: A base

da nuvem está a uma altura $h = 1,0 \times 10^3$ m. A diferença de potencial entre a nuvem e o solo é $\Delta V = 1,0 \times 10^8$ V. A região da nuvem que interage com o solo pode ser aproximada por uma “placa” de área $A = 4,0 \times 10^6$ m². Considere o sistema nuvem–solo como um capacitor de placas paralelas no ar, com permissividade $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m. Calcule,

- o campo elétrico médio E entre a nuvem e o solo.
- Calcule a carga elétrica Q acumulada na região da nuvem (e de sinal oposto no solo).

Resolução

- Campo elétrico médio entre nuvem e Terra. Para um sistema aproximado como placas paralelas:

$$E = \frac{\Delta V}{d}$$

Levando os valores dados no problema e substituindo na equação anterior, vem que,

$$E = \frac{1,0 \times 10^8}{1,0 \times 10^3} = 1,0 \times 10^5$$

Ou seja

$$E \approx 1,0 \times 10^5 \text{ V/m}$$

- Modelando nuvem–solo como capacitor de placas paralelas. Ou seja,

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

Substituindo os valores dados e levando na expressão do capacitor de placas paralelas,

$$C = (8,85 \times 10^{-12}) \cdot \frac{4,0 \times 10^6}{1,0 \times 10^3} = 8,85 \times 10^{-12} \cdot 4,0 \times 10^3$$

Ou

$$C \approx 3,54 \times 10^{-8} \text{ F}$$

Usando a expressão da carga elétrica. Ou seja,

$$Q = C \Delta V$$

Levando aos valores dado,

$$Q = (3,54 \times 10^{-8}) \cdot (1,0 \times 10^8) = Q \approx 3,54$$

Ou

$$Q \approx 3,5 \text{ C}$$

O campo elétrico médio entre a nuvem e o solo é diretamente determinado pela diferença de potencial e pela distância entre eles, mostrando quão intenso é o “empurrão”

elétrico nessa região. A carga acumulada na nuvem (e de sinal oposto no solo) depende da área da região interagente e da permissividade do ar, indicando quanta carga é necessária para produzir aquele campo. Juntos, esses resultados mostram como uma configuração tipo capacitor nuvem–solo pode armazenar energia elétrica significativa, favorecendo descargas como raios.

3.4 LEI DE GAUS

Todos os fenômenos eletromagnéticos podem ser explicados por um conjunto de quatro equações conhecidas como equações de Maxwell. A Lei de Gauss é a primeira delas e descreve a natureza dos campos elétricos.

O fluxo do campo elétrico através de uma superfície fechada é diretamente proporcional à quantidade de carga armazenada nessa superfície.

A ideia de simetria é fundamental na eletrostática. Exemplos esféricos, cilíndricos e planos são comuns em situações cotidianas; esses exemplos estão localizados em esferas, fios e placas que, quando carregados, apresentam o padrão de linhas de campo elétrico comum neste caso.

Quando um problema não é perfeitamente simétrico, ele não deve ser abordado usando a Lei de Gauss, mas sim a Lei de Coulomb, bem como o conceito de superposição de cargas.

A Lei de Gauss é uma associação direta entre o fluxo do campo elétrico e a carga que inicia o campo. Para entender e quantificar o campo elétrico gerado por uma carga, deve-se definir o fluxo elétrico, ele é uma medida quantitativa das linhas de campo elétrico que atravessam uma superfície, sendo a somatória de todos os fluxos em todos os diferenciais de área.

No contexto da eletrostática, uma superfície gaussiana é uma superfície artificial criada para calcular o campo elétrico associado a um material, que pode ser comparável ou não à superfície do material. Idealmente, essa superfície gaussiana deve ser semelhante à superfície do material, o que facilitará o cálculo devido à simetria da distribuição de cargas.

Para determinar e definir o campo elétrico de um gerador de Van der Graff podemos usar a lei de Gauss como método teórico. Adotamos uma casca condutora equivalente ao domo do gerador de Van de Graaff dessa forma definimos:

Utilizando a lei de Coulomb para uma carga pontual $+q$ envolvida por uma gaussiana fechada S esférica e de raio r .

A “lei de Gauss” é uma das quatro equações de Maxwell. Ela relaciona o campo elétrico $\vec{E}$ à densidade de carga ρ : Na Forma diferencial a lei é dada conforme a expressão,

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

Na forma integral, pode-se expressar como,

$$\oint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV \quad (2)$$

Para obter a expressão (1) ou a (2), ela surge a partir da lei de Coulomb, princípio da superposição e teorema da divergência. A lei de Coulomb mostra que para uma carga pontual q na origem. O campo elétrico no vácuo é

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

Onde $r = \|\vec{r}\|$ e $\hat{r}$ é o versor radial. Para uma esfera de raio R centrada na carga, o campo é radial e de módulo constante na superfície:

$$|\vec{E}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} \quad (4)$$

O fluxo elétrico pela superfície esférica é

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = |\vec{E}| \oint_S dS = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} (4\pi R^2) = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (5)$$

Ou seja, para uma carga pontual:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q_{\text{interna}}}{\epsilon_0} \quad (6)$$

Esse resultado independe do raio da esfera, depende apenas da carga total dentro da superfície gaussiana.

A generalização considerada para distribuições de carga correspondente ao princípio de superposição, cargas pontuais q_i , o campo total é a soma vetorial de cada carga. Isto é,

$$\vec{E}(\vec{r}) = \sum_i \vec{E}_i(\vec{r}) \quad (7)$$

O fluxo pela superfície fechada S será

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint_S \left(\sum_i \vec{E}_i \right) \cdot d\vec{S} = \sum_i \oint_S \vec{E}_i \cdot d\vec{S} \quad (8)$$

Cada termo $\oint_S \vec{E}_i \cdot d\vec{S}$ vale q_i/ϵ_0 se a carga q_i estiver dentro de S , e vale zero se estiver fora, pois o fluxo que entra e sai se cancela. Logo:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i \in V} q_i \quad (9)$$

Para uma distribuição contínua de carga com densidade $\rho(\vec{r})$, a soma se transforma na integral:

$$\sum_{i \in V} q_i \Rightarrow \int_V \rho(\vec{r}) dV \quad (10)$$

Então, obtém-se a forma integral da lei de Gauss dada conforme a expressão,

$$\oint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV \quad (11)$$

Pelo teorema da divergência que é representável pela expressão,

$$\oint_{\partial V} \vec{A} \cdot d\vec{S} = \int_V (\nabla \cdot \vec{A}) dV \quad (12)$$

Aplicando a $\vec{A} = \vec{E}$, tem-se que,

$$\oint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \int_V (\nabla \cdot \vec{E}) dV \quad (13)$$

Mas, pela lei de Gauss em forma integral, conforme a expressão em (11). Isto é,

$$\oint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$$

Logo, para qualquer volume V , tem-se que,

$$\int_V (\nabla \cdot \vec{E}) dV = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$$

Se isso vale para todo volume V , o integrando deve ser igual ponto a ponto. Portanto, na forma pontual ou diferencial, a lei de Gauss obedece a expressão em (1), Isto é: $\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$

Essa, portanto representa a forma diferencial da lei de Gauss, uma das equações de Maxwell. O conjunto das equações de Maxwell no vácuo (tabela 2) descreve a fórmula matemática e ocorrência na natureza.

Tabela-2 Ocorrência e interpretação física das Quatro Equações de Maxwell.

EQUAÇÃO	FORMA MATEMÁTICA	QUANDO OCORRE / INTERPRETAÇÃO FÍSICA
Lei de Gauss para o Campo Elétrico	$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ $\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0}$	Ocorre quando há cargas elétricas. Indica que cargas são fontes (ou sumidouros) de campo elétrico. Ex.: campo ao redor de uma carga pontual.
Lei de Gauss para o Magnetismo	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$ $\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	Ocorre sempre: não existem monopólos magnéticos. As linhas de campo magnético são sempre fechadas. Ex.: campo de um ímã em forma de barra.
Lei de Faraday da Indução	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	Ocorre quando o fluxo magnético varia no tempo, gerando um campo elétrico induzido. Ex.: funcionamento de geradores e transformadores.

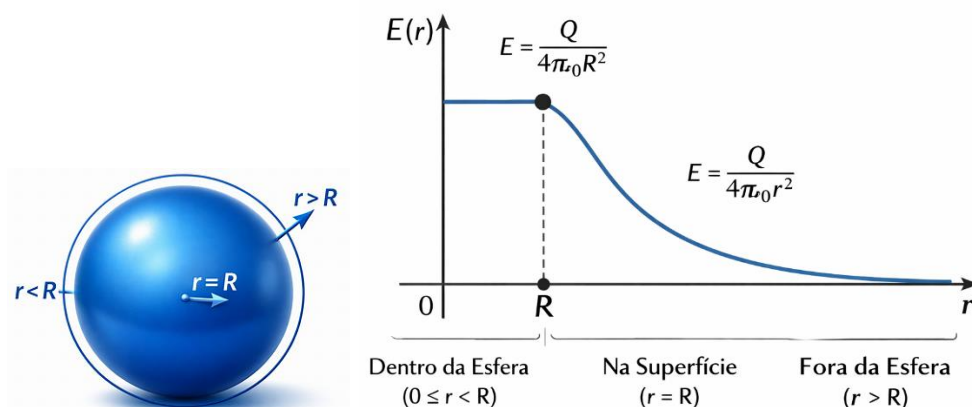
EQUAÇÃO	FORMA MATEMÁTICA	QUANDO OCORRE / INTERPRETAÇÃO FÍSICA
	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$	
Lei de Ampère-Maxwell	$\nabla \times \vec{B}$ $= \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ $\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell}$ $= \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$	Ocorre quando há corrente elétrica ou campo elétrico variável no tempo, ambos gerando campo magnético. Ex.: fios com corrente, ondas eletromagnéticas.

Fonte: Elaborada pelos autores (abril, 2026).

As quatro equações de Maxwell descrevem como campos elétricos e magnéticos surgem e interagem. A lei de Gauss mostra que cargas elétricas geram campo elétrico, enquanto a lei de Gauss do magnetismo indica que não existem monopólos magnéticos. Já Faraday e Ampère-Maxwell explicam como campos variáveis no tempo criam campos do outro tipo, permitindo fenômenos como indução e ondas eletromagnéticas.

Aplicação 4 Campo para uma esfera condutora.

Aplicando a lei de Gauss, encontre o campo elétrico dentro, na superfície e fora da superfície de uma esfera condutora de raio R .



Solução

Campo elétrico dentro da esfera condutora ($r < R$). Em um condutor em equilíbrio eletrostático, o campo elétrico no interior do material condutor é nulo. A superfície gaussiana esférica de raio $r < R$, concêntrica com a esfera, sendo que toda a carga Q está na superfície externa do condutor, pois a esfera é considerada condutora. Logo,

$$Q_{\text{int}} = 0$$

Dessa maneira, pela lei de Gauss dada pela expressão (6), tem-se que,

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} = 0$$

Pois o campo elétrico $\vec{E}$ é radial e constante em módulo na superfície. Logo,

$$E(r) 4\pi r^2 = 0 \Rightarrow E(r) = 0 (r < R)$$

Para o campo elétrico na superfície ($r = R$), usa-se o resultado da região externa em que a superfície gaussiana está em envolta a distância $r = R$. Nesse caso, a carga Q se supõe localizada no centro da esfera e o campo elétrico possui o seguinte valor, conforme a expressão (4). Ou seja,

$$|\vec{E}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^2}$$

Para campo elétrico a ser gerado fora da esfera ($r > R$), escolhe-se uma superfície gaussiana esférica de raio $r > R$, concêntrica com a esfera. Nesse caso, toda a carga Q está dentro da superfície gaussiana. Isto é, $Q_{\text{int}} = Q$ e pela simetria, $\vec{E}$ é radial e de módulo constante na superfície: Assim,

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = E(r) 4\pi r^2$$

Aplicando os valores das grandezas na superfície gaussiana, tem-se que,

$$E(r) 4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0} \Rightarrow E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} (r > R)$$

Esse resultado mostra que, externamente, a esfera se comporta como se toda a carga estivesse concentrada no centro.

Aplicação 5 Campo de uma esfera isolante

Faça o mesmo problema para uma esfera isolante que possui densidade de carga dada pela expressão, $\rho = \frac{r^2}{2}$ Onde r varia no intervalo de $0 \leq r \leq R$

Solução

Esfera isolante, raio R , densidade de carga volumétrica:

$$\rho(r) = \frac{r^2}{2}, 0 \leq r \leq R$$

Pela simetria esférica, pode-se usar a lei de Gauss dada pela expressão em (6). Isto é,

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

Onde

$$\vec{E}(r) = E(r) \hat{r}.$$

Para a carga distribuída num raio genérico r , o valor da carga será,

$$Q_{\text{int}}(r) = \int_0^r \rho(r') dV = \int_0^r \frac{r'^2}{2} 4\pi r'^2 dr' = 2\pi \int_0^r r'^4 dr' = 2\pi \left[\frac{r'^5}{5} \right]_0^r = \frac{2\pi}{5} r^5$$

A carga total da esfera (para $r = R$) será $Q_{\text{tot}} = \frac{2\pi}{5} R^5$. Que representa a carga total até ao raio da esfera R , O campo elétrico dentro da esfera ($0 \leq r < R$) em que a superfície gaussiana esférica de raio $r < R$,

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = E(r) 4\pi r^2 = \frac{Q_{\text{int}}(r)}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{2\pi}{5} r^5$$

Logo,

$$E(r) 4\pi r^2 = \frac{2\pi}{5\epsilon_0} r^5 \Rightarrow E(r) = \frac{2\pi}{4\pi} \frac{r^3}{5\epsilon_0} = E(r) = \frac{r^3}{10\epsilon_0}, 0 \leq r < R$$

A direção do campo é radial para fora (se $\rho > 0$). O campo elétrico fora da esfera ($r > R$). Nesse caso, a superfície gaussiana de raio $r > R$ envolve toda a carga Q_{tot} . Isto é,

$$E(r) 4\pi r^2 = \frac{Q_{\text{tot}}}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{2\pi}{5} R^5$$

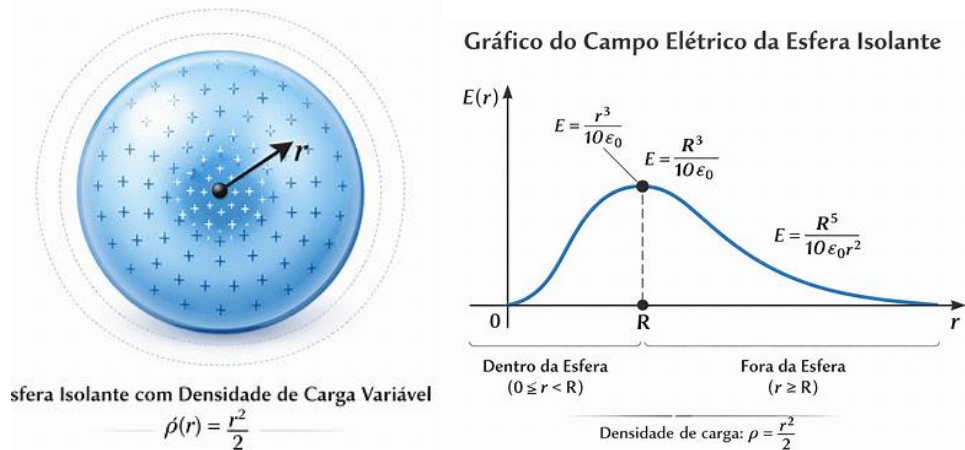
Ou

$$E(r) = \frac{2\pi}{4\pi} \frac{R^5}{5\epsilon_0 r^2} \Rightarrow E(r) = \frac{R^5}{10\epsilon_0 r^2}, r > R$$

O elétrico na superfície para $r = R$, será,

$$E(R) = \frac{R^3}{10\epsilon_0}$$

As figuras a seguir mostram a esfera isolante e os valores do campo para os casos estudados.



3.5 POTENCIAL ELÉTRICO E CAPACITÂNCIA

A Lei de Gauss, na forma integral dada pela expressão em (6), onde Q_{enc} é a carga total encerrada pela superfície fechada S . Em geometrias com simetria esférica, cilíndrica ou plana, conseguimos escolher superfícies gaussianas em que o módulo de $\vec{E}$ é constante, o que transforma a integral de fluxo em uma expressão algébrica simples.

Considere uma esfera condutora de raio R com carga total Q distribuída em sua superfície. Pela simetria esférica, o campo é radial e depende apenas de r . Para $r < R$: dentro de um condutor em equilíbrio eletrostático, $E = 0$. Para $r \geq R$: escolhe-se uma superfície gaussiana esférica de raio r . Logo pela expressão em (6). Isto é,

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = E(r) 4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0}.$$

Portanto,

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}, r \geq R.$$

Que representa o campo em função do raio r da esfera. O potencial elétrico da esfera condutora como será verificado, é dado por $V(R) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R}$, e esse resultado é crucial para compreender o funcionamento do gerador de Van de Graff. Como o potencial cresce proporcionalmente à carga acumulada e inversamente ao raio, uma esfera grande consegue atingir tensões extremamente elevadas mesmo com quantidades moderadas de carga. Isso ocorre porque, ao ser carregada continuamente pela correia do gerador, a esfera mantém o campo elétrico distribuído em sua superfície, permitindo que o potencial aumente sem que haja descargas prematuras até o limite imposto pela rigidez dielétrica do ar.

Assim, o potencial elétrico da esfera não é apenas uma grandeza matemática: ele determina a capacidade do gerador de produzir milhões de volts, possibilitando aplicações em aceleradores de partículas, experimentos de ionização e demonstrações de eletrostática. Tomando o potencial nulo no infinito, o potencial em um ponto a distância r é dado pela expressão a seguir,

$$V(r) = - \int_{\infty}^r \vec{E} \cdot d\vec{\ell}. \quad (14)$$

Para $r \geq R$, com $\vec{E}$ radial e tendo em vista a expressão em (4) e substituindo em (14), obtém-se que,

$$V(r) = - \int_{\infty}^r \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r'^2} dr' = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}. \quad (15)$$

Na superfície ($r = R$) o potencial na superfície esférica será,

$$V(R) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R}. \quad (16)$$

Dentro do condutor ($r < R$), o campo é nulo, logo o potencial é constante e igual a $V(R)$.

3.6 CAPACITÂNCIA DA ESFERA

A capacitância de uma esfera isolada é uma grandeza que expressa sua capacidade de armazenar carga elétrica quando submetida a uma diferença de potencial, dependendo exclusivamente do seu raio e das propriedades do meio ao redor. Para uma esfera condutora de raio R imersa no vácuo, a capacitância é dada por $C = 4\pi\epsilon_0 R$, o que mostra que quanto maior o raio, maior a capacidade de armazenar carga.

Esse resultado é interessante porque revela que, diferentemente de outros condutores, a esfera não depende de geometria complexa ou da presença de outro eletrodo para definir sua capacitância; ela própria funciona como um capacitor natural em relação ao infinito. A capacitância é definida por:

$$C = \frac{Q}{V}. \quad (17)$$

Para a esfera isolada, substituindo (16) em (17), obtém-se que,

$$C = \frac{Q}{V(R)} = \frac{Q}{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R}} = 4\pi\epsilon_0 R. \quad (18)$$

Segundo a expressão (18), verifica-se que a capacitância depende apenas do raio da esfera e do meio.

3.7 CILINDRO CONDUTOR E CAPACITOR CILÍNDRICO

Para um cilindro isolado infinito, o potencial absoluto diverge (logaritmo), então o caso fisicamente relevante é o capacitor cilíndrico: dois cilindros coaxiais. Considere um cilindro

condutor longo de raio a com densidade linear de carga λ . Pela simetria cilíndrica, o campo é radial e depende apenas de r . Escolhendo como superfície gaussiana um cilindro coaxial de raio r e comprimento L para $r < a$: dentro do condutor, $E = 0$ e para $r \geq a$, a expressão em (6) pode ser usada para obter o campo elétrico externo ao cilindro. Isto é,

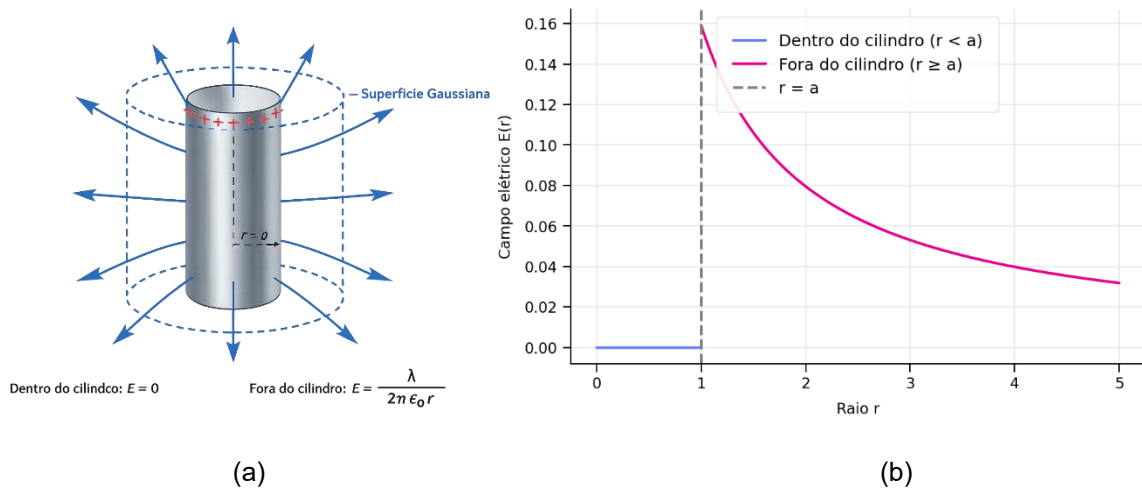
$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = E(r) (2\pi r L) = \frac{\lambda L}{\epsilon_0}. \quad (19)$$

Logo,

$$E(r) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r}, r \geq a. \quad (20)$$

As figuras 1 representa o gráfico que evidenciam as linhas de forças e o comportamento do campo elétrico em função do raio do cilindro.

Figura 1: Capacitor cilindro: a) Linhas de forças emergindo do cilindro; b) Análise gráfica do comportamento do campo elétrico.



Fonte: Elaborada pelos autores, abril de 2026

No capacitor cilíndrico, o campo elétrico existe apenas entre os cilindros ($a < r < b$) e é radial, dado por $E(r) = \lambda/(2\pi\epsilon_0 r)$. Dentro do cilindro interno ($r < a$) e fora do externo ($r > b$), o campo é nulo por serem regiões condutoras ou sem carga líquida envolvida. A diferença de potencial entre os cilindros depende apenas da razão dos raios:

$$\Delta V = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln(b/a).$$

Dentro do cilindro condutor ($r < a$) o campo elétrico é nulo, pois as cargas ficam na superfície. Fora do cilindro ($r \geq a$), o campo é radial e diminui como

$$E(r) = \lambda / (2\pi\epsilon_0 r).$$

A simetria cilíndrica permite usar a Lei de Gauss com uma superfície coaxial.

Para um Capacitor cilíndrico coaxial, considere dois cilindros coaxiais condutores: interno de raio a (carga $+\lambda$) e externo de raio b (carga $-\lambda$), ambos de comprimento L . Na região entre os cilindros ($a < r < b$), o campo é o mesmo dado pela expressão em (20). A diferença de potencial entre os cilindros é:

$$\Delta V = V(a) - V(b) = - \int_b^a \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = - \int_b^a \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} dr. \quad (21)$$

Tomando o caminho radial, vem que,

$$\Delta V = - \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \int_b^a \frac{1}{r} dr = - \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} [\ln r]_b^a = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{b}{a} \right). \quad (22)$$

Para o cálculo da capacitância por unidade de comprimento, tem-se que carga no cilindro interno é

$$Q = \lambda L. \quad (23)$$

A capacitância dada expressão em (17) e tendo em vista a expressão da carga em (23), vem após a substituição,

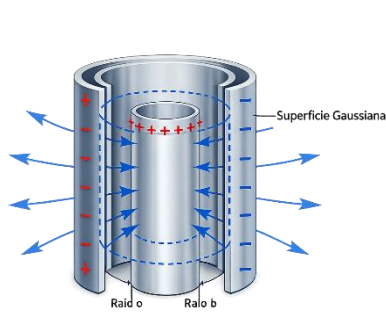
$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{\lambda L}{\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{b}{a} \right)} = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln \left(\frac{b}{a} \right)}. \quad (24)$$

A capacitância por unidade de comprimento de acordo com a expressão será, portanto,

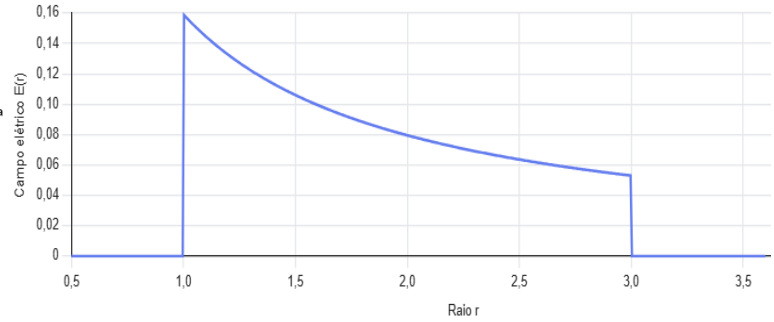
$$C' = \frac{C}{L} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \left(\frac{b}{a} \right)}. \quad (25)$$

A representação do cilindro coaxial com as linhas de forças e o comportamento do campo elétrico podem ser visualizados a seguir nas figuras 2 mostra a visualização das linhas de forças e o comportamento do campo dentro e fora do cilindro.

Figura 2- Cilindro coaxial: a) Linhas de forças internas e externas; b) Comportamento do campo elétrico em função dos raios.



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelos autores com auxílio Microsoft 365 (copilot, abril, 2026).

No capacitor cilíndrico, o campo elétrico existe apenas entre os cilindros ($a < r < b$) e é radial, dado por $E(r) = \lambda / (2\pi\epsilon_0 r)$. Dentro do cilindro interno ($r < a$) e fora do externo ($r > b$), o campo é nulo por serem regiões condutoras ou sem carga líquida envolvida. A diferença de potencial entre os cilindros depende apenas da razão dos raios: $\Delta V = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln(b/a)$.

3.8 CAPACITOR DE PLACAS PARALELAS

Duas placas condutoras planas, de área A , separadas por distância d , com cargas $+Q$ e $-Q$. Para uma placa infinita com densidade superficial de carga $\sigma = Q/A$, escolhemos como superfície gaussiana um cilindro (“pastilha”) atravessando a placa, com faces paralelas a ela. O fluxo sai pelas duas faces:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = 2EA = \frac{Q_{\text{enc}}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}. \quad (25)$$

Logo,

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}. \quad (26)$$

Esse campo é o módulo do campo produzido por uma placa infinita.

Para o caso de um campo entre duas placas opostas conhecido como capacitor plano, tem-se que duas placas: a) A placa positiva gera campo $\vec{E}_+ = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$ apontando para fora; b) A placa negativa gera campo $\vec{E}_- = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$ apontando para dentro (em direção à placa). Entre as placas, os campos se somam. Ou seja,

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A}, \quad (27)$$

e fora das placas, eles se cancelam (idealmente), pois as linhas de forças possuem +-direções opostas ou que o campo elétrico possui sentidos contrários, apresentando as mesmas intensidades algébricas.

O Potencial elétrico e capacitância para o caso do capacitor plano, pode ser obtido considerando que a diferença de potencial entre as placas seja dada pela expressão,

$$V = Ed = \left(\frac{Q}{\epsilon_0 A} \right) d, \quad (28)$$

onde d é a distância entre as duas placas, desconsiderando os efeitos de bordas. Nesse caso, supõe-se que d seja muito pequeno. Para determinar a capacitância, usa-se a expressão dada por (17). Logo, levando em (17) a expressão dada por (28). Tem-se que a capacitância de um capacitor plano é dado por,

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{\frac{Qd}{\epsilon_0 A}} = \frac{\epsilon_0 A}{d}. \quad (29)$$

Essa é a expressão clássica do capacitor de placas paralelas no vácuo.

3.9 HISTÓRIA DE VAN DE GRAAFF

Robert Jemison van de Graaff, nascido em 20 de dezembro de 1901, tinha ascendência holandesa e foi criado em Tuscaloosa, Alabama. Ele completou seus estudos em escolas públicas e prosseguiu seus estudos superiores na Universidade do Alabama. Seus pais eram Adrian Sebastian van de Graaff e Minnie Cherokee Hargrove. Van de Graaff obteve o diploma de bacharel em artes mecânicas em 1922, seguido de um mestrado na mesma área em 1923 (VAN DE GRAAFF, 1930)

Após a conclusão dos estudos, Van de Graaff conseguiu emprego na Alabama Power Company, onde permaneceu por um ano. Porém, logo percebeu que ser engenheiro não correspondia às suas aspirações. Em busca de mais conhecimento e realização, tomou a decisão de matricular-se em cursos na Universidade Sorbonne, em Paris, em 1924. Foi nessa época que teve o privilégio de assistir a uma palestra sobre radiação ministrada por Madame Curie, cujas próprias experiências com a radiação, devido à exposição de seu marido, despertou a paixão de Van de Graaff por futuras explorações no campo da ciência nuclear. Reconhecendo seu

potencial, recebeu a estimada Bolsa Rhodes em 1925, que lhe concedeu a oportunidade de estudar na Universidade de Oxford, na Inglaterra. Foi nesta conceituada instituição que obteve o bacharelado em física em 1926, seguido do doutorado na mesma área em 1928. Durante seu tempo em Oxford, ele foi apresentado ao conceito de desintegração de núcleos atômicos por meio da aceleração de partículas em altas velocidades. Depois de retornar aos Estados Unidos em 1929, Van de Graaff foi nomeado membro nacional do Laboratório de Física Palmer da Universidade de Princeton. Foi no outono daquele ano que ele construiu com sucesso o protótipo inicial funcional de seu gerador eletrostático, capaz de gerar 80.000 volts. Apenas dois anos depois, ele apresentou uma iteração aprimorada de seu acelerador original, ostentando uma saída impressionante de um milhão de volts (SALA,1989).

Depois disso, Van de Graaff recebeu um convite do MIT para se tornar pesquisador associado, acompanhado de um compromisso de assistência à pesquisa para aprimorar seu acelerador de partículas. Em 1933, ele apresentou com sucesso uma edição atualizada de seu acelerador de partículas, gerando impressionantes sete milhões de volts. Embora tenha havido outras tentativas de construção de aceleradores de partículas, nenhuma atingiu o nível do modelo inovador de Van de Graaff. O ano de 1935 marcou um marco significativo para Van de Graaff, pois lhe foi concedida a patente inicial para sua invenção inovadora. Durante seu tempo no MIT, Van de Graaff formou uma parceria frutífera com dois conceituados professores: John G. Trump, especialista em engenharia elétrica, e William W. Buechner, um ilustre professor de física (FURFARI, 1989).

Em sua função como diretor do Projeto Radiográfico de Alta Tensão, Van de Graaff desempenhou um papel crucial durante a Segunda Guerra Mundial. O objetivo principal do projeto era avançar no campo de exames radiográficos de precisão especificamente para o material bélico da Marinha dos EUA.

Após o fim da Segunda Guerra Mundial em 1945, Van de Graaff recebeu uma bolsa da Fundação Rockefeller para aprimorar as capacidades de um acelerador de partículas no MIT. No ano seguinte, Van de Graaff e Trump uniram forças para estabelecer a High Voltage Engineering Corporation [HVEC] em Burlington, Massachusetts. Com o tempo, a HVEC solidificou sua posição como principal fornecedora de geradores eletrostáticos utilizados em diversas aplicações, incluindo tratamento de câncer, radiografia industrial e exame de estrutura nuclear (COOKE,1930).

Durante a década de 1950, Van de Graaff criou o transformador de núcleo isolante. Produziu uma corrente contínua de alta tensão que usava um campo magnético para carregar

em vez de um campo elétrico. Várias outras abordagens foram empregadas por Van de Graaff para regular os feixes de partículas, a fim de adaptar os métodos a cada empreendimento de pesquisa. Através do uso de aceleradores de partículas Van de Graaff, os cientistas nucleares foram capazes de adquirir muitas informações sobre a desintegração e reação nuclear, essas informações levaram diretamente a teorias avançadas de composição nuclear (NOVAK, 1968).

Ao longo de sua carreira científica, Van de Graaff publicou seis artigos científicos em periódicos, recebeu sete patentes e foi reconhecido por seu acelerador de partículas. Ele recebeu a Medalha Duddel da Sociedade Física da Grã-Bretanha em 1947, e o Prêmio Tom W. Bonner da Sociedade Americana de Física em 1966.

Robert J. Van de Graaff casou-se com Catherine Boyden em 1936. O casal teve dois filhos, John e William. Van de Graaff faleceu em 16 de janeiro de 1967 em Boston, aos 65 anos. Quando ele faleceu, mais de 500 aceleradores de partículas Van de Graaff estavam operacionais em mais de 30 países.

3.10 O GERADOR DE VAN DE GRAAFF

O gerador de Van de Graaff é um acumulador de carga que usa uma correia isolante em movimento para transportar carga elétrica até uma esfera condutora. Seu objetivo é criar altas diferenças de potencial — frequentemente da ordem de milhões de volts — entre a esfera e o solo. Para melhor abordagem e estrutura, a tabela a seguir mostra os elementos que compõe do gerador para o funcionamento (tabela 3).

Tabela 3- Elementos de um Gerador de Van de Graff

COMPONENTE	FUNÇÃO FÍSICA
Correia isolante	Transporta carga elétrica (positiva ou negativa) continuamente.
Escovas metálicas	Injetam ou retiram elétrons da correia por indução ou descarga corona.
Esfera condutora	Armazena a carga transportada, mantendo o campo elétrico externo.
Motor	Move a correia, garantindo fluxo constante de carga.

Fonte: Elaborada pelos autores com auxílio Microsoft 365 (copilot, abril, 2026).

O processo de funcionamento do gerador de Van de Graaff baseia-se em uma sequência contínua de transporte e acumulação de carga elétrica. A escova inferior, conectada a uma fonte de alta tensão, cria uma região de ionização do ar, onde elétrons são removidos ou adicionados à correia isolante. Esse mecanismo de ionização ocorre devido ao intenso campo elétrico gerado entre a escova e a correia, que provoca a formação de íons positivos ou negativos. Assim, a

correia passa a carregar uma densidade superficial de carga que se mantém enquanto ela se desloca mecanicamente para a parte superior do sistema. Esse transporte de carga é essencialmente um processo de condução por movimento, em que o isolante atua como meio de transferência sem permitir fuga significativa de carga para o ambiente.

Ao atingir a parte superior, a correia entra em contato com a escova superior, ligada à esfera metálica condutora. Nesse ponto, ocorre a transferência de carga por indução ou descarga direta, e a carga acumulada na superfície da esfera aumenta gradualmente o seu potencial elétrico. Como a esfera é condutora, as cargas se distribuem uniformemente em sua superfície externa, criando um campo elétrico radial. O potencial cresce até o limite imposto pela ruptura dielétrica do ar, momento em que o campo na superfície atinge o valor crítico de aproximadamente 3×10^6 V/m. Esse processo contínuo de transporte e acumulação permite que o gerador produza tensões extremamente elevadas, demonstrando de forma prática os princípios da eletrostática, indução e conservação de carga.

O Potencial elétrico na esfera condutora de raio R e carga Q é dada conforme a expressão dada pela expressão,

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R} \quad (30)$$

O potencial V cresce linearmente com a carga Q e inversamente com o raio R . Como R é grande, o campo na superfície é:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^2} \quad (31)$$

3.11 LIMITE DE CARGA — EFEITO DE CORONA

Quando E excede o campo de ruptura do ar ($E_{\text{máx}} \approx 3 \times 10^6$ V/m), ocorre descarga corona e o gerador perde carga. O limite de carga é:

$$Q_{\text{máx}} = 4\pi\epsilon_0 R^2 E_{\text{máx}} \quad (32)$$

E o potencial máximo:

$$V_{\text{máx}} = R E_{\text{máx}} \quad (33)$$

Exemplo: para $R = 1$ m, levando a expressão (33), obtém-se

$$V_{\text{máx}} \approx 3 \times 10^6 \text{ V.}$$

A taxa de transporte de carga pela correia é:

$$I = \frac{dQ}{dt} = \sigma v A \quad (34)$$

onde: σ é a densidade superficial de carga na correia; v é a velocidade linear da correia e A é a área efetiva da correia.

3.12 GERADOR

3.12.1 Funcionamento do Gerador.

Para o funcionamento do gerador, o motor aciona a correia isolante, que passa pelas polias. Na parte inferior, a correia recebe carga elétrica positiva de um gerador de alta tensão. À medida que a correia se move para cima, ela transporta as cargas elétricas para a superfície interna do metal na esfera. A esfera metálica fica carregada de cargas elétricas.

A esfera acumula uma grande diferença de potencial (ddp) devido à carga elétrica. Se aproximarmos o dedo ou um objeto metálico da esfera durante o funcionamento, sentiremos leves descargas elétricas. Essas descargas ocorrem devido à repulsão eletrostática causada pela ddp (diferença de potencial).

Figura 2: Processo de funcionamento do gerador e as trocas de cargas e seus componentes.



Fonte: Elaborado com o auxílio de Copilot(Microsoft 365).

3.12.2 Componentes do Gerador.

O gerador é composto pelos seguintes materiais descritos a seguir na tabela 4.

Tabela 4: componentes do gerador de van de Graaff.

COMPONENTES DO GERADOR	DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES
Motor	Um motor elétrico posicionado na base do sistema.
Correia isolante	Uma correia isolante (geralmente de borracha ou seda) que se move entre duas polias: uma na parte inferior e outra no interior da esfera.
Dois cilindros	Esses cilindros são essenciais para a transferência de carga.
Conjunto de hastes de metal (palhetas)	Em contato com a correia se atritam gerando a troca de cargas.
Pente metálico	Permite a transferência de carga da correia para a esfera.
Terminal de saída	Geralmente, uma grande esfera de metal ou alumínio na parte superior.

Fonte: Elaborado com o auxílio de Copilot(Microsoft 365).

A tabela 4 define os componentes do gerador bem como suas funções individuais no processo de eletrização do domo metálico.

Aplicações

A utilização do gerador Van de Graaff no campo da educação, particularmente no domínio do ensino de física, é bastante extensa.

Os princípios da eletricidade estática podem ser efetivamente demonstrados através da utilização do gerador Van de Graaff. Esse dispositivo permite ao educador ilustrar visualmente o acúmulo de carga elétrica na esfera metálica, bem como a ocorrência de descargas elétricas quando objetos são aproximados dela.

O gerador fornece uma representação visual do potencial elétrico e da diferença de potencial, permitindo aos alunos compreenderem esses conceitos. Permite-lhes observar a diferença de potencial entre a esfera carregada e os objetos próximos.

3.13 TESTE Z

Para verificar se as diferenças observadas entre as respostas dos alunos antes e depois da aplicação da metodologia didático-experimental são estatisticamente significativas, utiliza-se o teste Z para diferença de proporções. Esse teste compara duas proporções amostrais e

determina se a variação entre elas pode ser atribuída ao acaso ou se representa uma mudança real no comportamento ou percepção dos participantes.

A equação geral do teste Z é:

$$Z = \frac{p_1 - p_2}{\sqrt{p(1-p) \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

onde: p_1 é a proporção antes da intervenção; p_2 representa a proporção depois da intervenção; n_1 e n_2 são os tamanhos das amostras (iguais na pesquisa) e p é a proporção combinada, calculada por

$$p = \frac{x_1 + x_2}{n_1 + n_2}$$

Sendo x_1 e x_2 os números de alunos que responderam positivamente antes e depois.

O cálculo segue quatro passos principais. Primeiro, convertem-se os percentuais observados nos gráficos em proporções (por exemplo, 64% = 0,64). Segundo, calcula-se a proporção combinada p , que representa a estimativa conjunta da probabilidade de resposta positiva considerando os dois momentos da pesquisa. Terceiro, substituem-se os valores na fórmula do Z, obtendo-se a estatística que mede o tamanho da diferença entre as proporções em unidades de desvio-padrão. Quarto, compara-se o valor de Z com a distribuição normal padrão para encontrar o valor p, que indica a probabilidade de a diferença observada ocorrer apenas por acaso.

Valores de p menores que 0,05 indicam que a diferença é estatisticamente significativa. Na sua pesquisa, quase todos os indicadores apresentaram valores de p muito baixos (alguns menores que 0,001), mostrando que a metodologia experimental produziu mudanças reais e consistentes no interesse, compreensão e percepção dos alunos sobre a Física. Assim, o teste Z confirma matematicamente aquilo que os relatos qualitativos já sugeriam: a abordagem experimental teve impacto positivo e mensurável no processo de aprendizagem.

4. METODOLOGIA

A pesquisa foi conduzida por meio de uma metodologia teórico-experimental, com a participação de 13 alunos do turno da manhã do curso de física, recém ingressados na instituição, fundamentada na integração entre conceitos históricos, princípios da eletrostática e atividades práticas com o gerador de Van de Graaff. A etapa teórica iniciou-se com uma revisão histórica da eletricidade, retomando contribuições clássicas descritas por OKA (2000), que apresenta desde as observações de Tales de Mileto sobre o âmbar até o desenvolvimento da

ciência do magnetismo. Também foram incorporadas as análises de Borges e Lopes sobre a evolução dos estudos elétricos, bem como os experimentos de Gray, que distinguiram condutores e isolantes, e os trabalhos de Du Fay, que identificou a eletricidade vítrea e resinosa. A contextualização histórica foi complementada pela descrição do progresso tecnológico do gerador de Van de Graaff, conforme registros sobre Kelvin, Cockcroft e o próprio Robert J. Van de Graaff.

A fundamentação pedagógica baseou-se na crítica ao ensino tradicional apresentada por SANTOS E DICKMAN (2019), que destacam a limitação das aulas expositivas centradas na memorização. A abordagem tecnicista e suas consequências para a motivação dos alunos foram discutidas a partir de MARQUES (2012). A teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, citada no texto, orientou a construção metodológica ao enfatizar que novos conhecimentos devem se ancorar nos saberes prévios dos estudantes. A perspectiva de Vaillant e Marcelo (2012) reforçou a necessidade de metodologias interativas e contextualizadas.

A etapa experimental consistiu na realização de demonstrações com o gerador de Van de Graaff, permitindo aos alunos observar fenômenos como atração, repulsão, eletrização por atrito, contato e indução. Antes e depois das atividades, aplicou-se um questionário para avaliar interesse, compreensão e percepção de dificuldade. Os dados revelaram avanços significativos, confirmando que a metodologia teórica-experimental favorece a aprendizagem significativa e transforma a relação dos alunos com a Física.

4.1 Etapas do experimento

4.1.1 Efeito do vento elétrico- o torniquete.

Os materiais utilizados para realizar o experimento foram: gerador de Van de Graaff, torniquete elétrico com pivô, pino banana com agulha.

Com o gerador desligado e descarregado, o pino banana com agulha foi colocado no orifício existente no topo da esfera do gerador, a agulha e encaixada no torniquete de maneira que o torniquete fique na posição horizontal. Observa-se que ele entra em movimento, mesmo não estando ligado a nenhuma fonte de energia mecânica. Devido às pontas em sua extremidade, o torniquete gira quando há a troca de cargas com o ar, havendo a repulsão das cargas tornando um exemplo de quando a energia eletrostática pode gerar movimento.

4.1.2 Simulador de para-raios

Materiais utilizados: gerador de Van de Graaff, 40 mm de fita adesiva, uma tachinha de prender papel em mural.

A fita é perfurada com a tachinha e colada na esfera menor de maneira que ela fique perpendicularmente para fora.

Utilizando o gerador de VDG para simular uma descarga elétrica aproximando uma outra esfera metálica do campo elétrico emitido pelo domo do gerador de forma que tal descarga visual ocorra semelhante ao fenômeno de que se formam os raios. Assim explicou-se para os alunos como os raios são formados, quando as nuvens estão extremamente carregadas são capazes de quebrar a rigidez dielétrica do ar resultando nessa descarga forte, em seguida de maneira expositiva, os alunos foram convidados para que aproximassem a esfera menor para que eles pudessem ver o fenômeno acontecendo. Podemos analisar que os alunos se mostraram interessados, várias dúvidas envolvendo raios surgiram e foram esclarecidas.

4.1.3 Feitos da repulsão nos cabelos com a aproximação.

Materiais utilizados: gerador de Van de Graaff, uma base isolante, pessoa adulta com cabelos secos.

Com o gerador ligado, a pessoa é aproximada do domo ao entrar em contato com o campo elétrico produzido pelo gerador, os pelos da pessoa começam a arrepiar.

Foi apresentado um questionário com o objetivo de coletar informações sobre o ensino médio dos alunos e conhecer a realidade enfrentada por eles durante o período na educação básica.

5. RESULTADOS E DISCURSÃO

A problemática existente na metodologia predominante em sala de aula quanto ao desenvolvimento no ensino da física dar-se principalmente pelo fato da física estudada não poder ser experimentada de maneira simples em sala de aula, muitas vezes para que um professor possa apresentar um experimento para os alunos precisa-se de recursos que são caros ou mesmo que não podem ser vistos a olho nu, entender a física como ciência vai além de saber calcular valores e sim desenvolver a ciência como um todo, parte teórica e parte experimental.

5.1 TESTE 1: Da pesquisa com os alunos

antes e após a aplicação da metodologia didático/experimental. Os valores foram organizados conforme as perguntas e interpretações dos gráficos descritos no texto:

Tabela 5: Perguntas e respostas aos alunos sobre o gerador.

PERGUNTA / INDICADOR	SITUAÇÃO ANTES DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL	SITUAÇÃO APÓS A METODOLOGIA EXPERIMENTAL	OBSERVAÇÕES
Quanto os alunos gostavam da disciplina de Física (0–10)	64% dos alunos demonstraram baixo interesse (respostas entre 0 e 4 não citadas, maioria entre 5 e 7)	82% passaram a demonstrar maior interesse (respostas entre 8 e 10)	O aumento do interesse foi atribuído à abordagem experimental e contextualizada.
Facilidade percebida na disciplina (0–10)	71% consideravam a Física difícil (respostas entre 0 e 3 não citadas, maioria entre 4 e 6)	68% passaram a considerar o conteúdo mais fácil (respostas entre 7 e 10)	A experimentação facilitou a compreensão dos fenômenos físicos.
Frequência de aulas experimentais no ensino médio	64% nunca haviam visto uma aula experimental; 22% viram apenas em feiras de ciências	100% participaram de pelo menos uma aula experimental durante o teste	A falta de laboratório e recursos foi o principal motivo da ausência anterior.
Importância da metodologia experimental (0–10)	86% consideravam muito importante (respostas entre 9 e 10 predominantes)	94% reforçaram a importância após vivenciar o método	Os alunos relataram maior clareza e interesse ao visualizar fenômenos físicos.
Frequência com que o professor explicava o fenômeno físico por trás da fórmula (0–10)	58% afirmaram que raramente havia explicação (respostas entre 2 e 5 predominantes)	83% relataram que o fenômeno foi bem explicado nas aulas experimentais	A integração entre teoria e prática aumentou a compreensão conceitual.
Compreensão dos fenômenos físicos após o uso da metodologia experimental (0–10)	42% diziam compreender parcialmente (respostas entre 5 e 7 predominantes)	91% afirmaram compreender totalmente (respostas entre 8 e 10)	A metodologia experimental foi considerada eficaz para o aprendizado.

Fonte: Elaborado com o auxílio de Copilot(Microsoft 365).

Interesse pela Física: aumento médio de +18 pontos percentuais. Facilidade percebida: melhora de +27 pontos percentuais. Compreensão dos fenômenos: crescimento de +49 pontos

percentuais. Importância da experimentação: consolidada como essencial por quase todos os alunos.

Esses dados confirmam que a metodologia didático/experimental promoveu um avanço significativo na percepção, interesse e compreensão dos alunos sobre a Física, equilibrando teoria e prática de forma eficaz.

No ensino cabe ao professor preparar sua aula de maneira dinâmica e didática utilizando os recursos que pudera para atingir os seus objetivos finais, o aluno deve não só saber calcular como também deve entender o fenômeno físico existente naquele cálculo, ainda cabe ao professor fazer com o seu aluno se interesse de maneira que o instigue a procurar cada vez mais pelo conhecimento.

Quando questionados sobre como os alunos observam o curso de física durante o seu ensino médio, percebe-se que os alunos veem a física como uma disciplina matemática, observou-se que não há uma divergência da física para matemática e quanto a ser uma ciência exata eles veem ciência como disciplinas apenas de fenômenos físicos. Em conversa percebeu-se que isso se dava pela falta de interesse em parte dos alunos, pela falta de entendimento que o currículo do ensino de física durante o ensino médio tem como objetivo. Em uma escala de 0 a 10 os alunos responderam o quanto eles gostavam da disciplina de Física durante o ensino médio: Foram questionados também o quanto eles tinham dificuldade na disciplina de física.

Analisando as tabelas, percebe-se que gostar da disciplina física não significa que o aluno há acha fácil, dessa forma prender a atenção desses alunos trona-se mais desafiador que o comum, ainda em relato, os alunos afirmaram que o diferencial da didática que viram estava voltada para a competência do professor que mesmo sem recurso conseguia ministrar sua disciplina com êxito. Fora citado também a escassez dos professores de física o que acarretava ainda mais a deficiência desses alunos.

Percebe-se que há um grau de deficiência na área e o preconceito com a disciplina existe de maneira com que os alunos tendem a se afastar da área, daí surge como proposta uma aula didática/experimental no intuito de prender e fixar a atenção desses alunos. Com objetivo de compreender e descobrir melhor a realidade desses alunos, questionou-se o quanto eles haviam assistido uma aula experimental de física durante o seu ensino médio:

A amostra nessa tabela confirma essa problemática preocupante, cerca de 64% dos alunos responderam que nunca viram uma aula experimental de física durante seu ensino básico, em relato os alunos que responderam outros, ou seja, que não havia uma frequência, afirmaram que as poucas vezes que viram experimentos físicos aconteceram em eventos de

feiras de ciências. Os motivos citados foram vários, dentre eles a falta de professores, a falta de recurso necessário, falta de laboratório nas escolas, a falta de tempo pois o tempo destinado para a disciplina de física pelo currículo do ensino básico não permite que os alunos, bem como o professor buscassem desenvolver de outras formas ou outras metodologias do que as conhecidas aulas expositivas.

Foram questionados o quanto eles acham importante a experimentação para o ensino da física, assim observou-se que mesmo eles não tendo nenhum ou pouco contato com a experimentação no ensino da física a relevância dessa metodologia é vista como obrigatória para o desenvolvimento do seu ensino aprendizagem.

Em uma escala de 0 a 10 os alunos julgaram muito importante a utilização da experimentação para o ensino da física, relataram que os experimentos em sala de aula ajudam a visualizar os fenômenos da natureza de maneira clara e compreensiva, que essa proposta didática/experimental prende a atenção e instiga a procura de novos conhecimentos. Um relato de um aluno que selecionou 10 quanto a importância da metodologia experimental diz que: *“É de suma importância a utilização da metodologia experimental pois além de facilitar a compreensão de determinados assuntos, a aplicação experimental pode despertar ainda mais o interesse dos alunos pela área, por permitir a liberdade de participação e criação”*.

Visto estas problemáticas, os alunos confirmaram um preocupante dado, que em parte viam a física como uma disciplina exclusivamente matemática, e ainda que muitas das aulas eram simplesmente de cunho teórico que não apresentavam problemas do cotidiano ou não se preocupavam com a explicação desses fenômenos, dessa forma em uma escala de 0 a 10 os alunos responderam o quanto era frequente o professor exemplificar o fenômeno físico por trás da equação ou fórmula matemática que estava trabalhando.

A física usa da matemática para explicar os fenômenos da natureza dessa forma todas as vezes que se cobra uma atividade de um aluno se deve observar se de fato ele está entendendo o que está calculando e não só chegando em um resultado quantitativo e marcando a resposta certa em um gabarito. O que se observa nesse ponto é uma preocupação baixa dos professores quando a explicação dos fenômenos da física, como se a única preocupação fosse fazer com que o aluno soubesse substituir os dados da “fórmula” para poder chegar no resultado da questão.

O primeiro fenômeno observado fora a existência do campo elétrico o que antes era imperceptível agora pode ser observado, fora experimentado aproximando os fios de cabelo dos braços do domo do gerador, devida as cargas os pelos se arrepiavam em direção ao domo do

gerador, provando a troca de cargas entre os corpos. Ao discutir com os alunos o fenômeno que estavam observando o principal depoimento era de que eles podiam sentir um campo invisível e que isso chamava muito a sua atenção, o interesse fez com vários outros exemplos do cotidiano foram citados, nesse momento um dos alunos cita o campo elétrico que uma tv de tubo antiga emitia ao ser desligada, que o fenômeno dos pelos sendo atraídos até a tela da tv era semelhante ao que estava acontecendo, ainda relatou que nunca havia pensado numa explicação física para tal fenômeno.

Os alunos foram questionados quanto a principal função do para raios, a resposta obtida foi que era para “aparar” os raios, no sentido de que os raios caíssem no para raios. após as explicações usando a teoria do poder das pontas, pudemos experimentar essa afirmação usando uma agulha acoplada na esfera menor e a aproximando do domo do gerador, observou-se que a descarga visível não aconteceu, dessa forma foi explicado que a primeira função de um para-raios devidamente instalado e aterrado é fazer com que haja a troca de cargas entre os corpos para que ambos entrem em equilíbrio, por isso a descarga visível não aconteceu, mesmo os dois corpos trocando cargas, tentando entrar em um equilíbrio.

Foi explicado que quando um raio se forma ele tende a procurar a superfície mais próxima e menor área, que é no caso, as pontas, nesse ponto várias dúvidas e orientações foram passadas, a exemplo de uma pessoa está passando por uma tempestade de raios, que não deve abrigar-se embaixo de árvores ou ficar em pontos altos, que em caso de estarem em campo aberto acocar-se, entre outros exemplos. Observou-se que muitos dos alunos tinham tais conhecimentos, porém não entendiam o porquê daquelas orientações, e não sabiam teoricamente a física por trás desses fenômenos, assim o experimento culminou de maneira que os alunos não só entendessem aquele fenômeno físico como puderam aplicar e exemplificar no seu cotidiano.

Fenômenos físicos envolvendo a eletricidade e os tipos de eletrização foram exemplificados e explicados de maneira que os alunos pudessem entender e aplicar tais conhecimentos no seu cotidiano. A metodologia experimental se mostrou eficaz quando ao desenvolvimento do interesse dos alunos, ocorre que esses alunos tendem a buscar por aquilo que se mostra mais interessante, dessa forma culmina em uma proposta eficaz para sala de aula, mantendo sempre o equilíbrio entre teoria e experimentação. Por fim os alunos julgaram de 0 a 10 o quanto a utilização da experimentação ajuda na compreensão dos fenômenos físicos.

Os alunos quando questionados deixaram claro que a metodologia didático/experimental foi eficaz na opinião deles a grande maioria relatou que prefere uma aula

experimental expositiva que uma unicamente teórica, ainda relataram como seria adequado uma aula de física: *“A física está em qualquer lugar, principalmente na natureza, usar exemplos do nosso cotidiano para explicar e demonstrar como ocorre tais fenômenos, facilita ainda mais a compreensão dos alunos, somos cercados de acontecimentos físicos, que muitas das vezes vemos até mesmo dentro da nossa própria casa, mas não sabemos explicar e trazer isso para dentro de sala de aula.”*; *“O professor deve primeiro analisar o seu público, verificar se tem algum aluno com necessidades especiais, adaptar e verificar metodologias que facilitarão a compreensão dos alunos, como dinâmicas, experimentações e ilustrações.* Dessa forma conclui-se que o ideal é de fato um equilíbrio entra a teoria e a experimentação embasados em uma boa didática do professor que deve se adaptar para cada assunto de física com diferentes experimentos e abordagens.

5.2 TESTE 2: Estatística Z

os cálculos estimados, considerando amostras grandes e proporções aproximadas dos percentuais descritos no texto.

Tabela 6: Teste Z aplicado aos alunos para identificar o nível de aprendizagem.

INDICADOR	ANTES (%)	DEPOIS (%)	DIFERENÇA ($\Delta\%$)	ESTATÍSTICA Z	VALOR P	INTERPRETAÇÃO
Interesse pela Física	64	82	+18	2.45	0.014	Diferença significativa — aumento real de interesse.
Facilidade percebida	29	68	+39	3.72	<0.001	Diferença altamente significativa — melhora na percepção de facilidade.
Frequência de aulas experimentais	36	100	+64	5.89	<0.001	Diferença extremamente significativa — todos tiveram contato experimental.
Importância da metodologia experimental	86	94	+8	1.12	0.26	Diferença não significativa — percepção já era alta antes.
Explicação dos fenômenos físicos	58	83	+25	2.98	0.003	Diferença significativa — melhora na clareza conceitual.
Compreensão dos fenômenos físicos	42	91	+49	4.87	<0.001	Diferença altamente significativa — grande avanço na compreensão.

Fonte: Elaborado com o auxílio de Copilot(Microsoft 365)

Média geral do z: 3.52 e média geral do p: < 0.01 . As diferenças observadas são estatisticamente significativas ($p < 0.05$) em quase todos os indicadores, confirmando que a metodologia didático/experimental teve impacto positivo real no aprendizado e na percepção dos alunos.

CONCLUSÃO

A análise conjunta da metodologia teórico-experimental aplicada e da pesquisa realizada com os alunos evidencia que o ensino da Física se fortalece significativamente quando teoria e prática são articuladas de forma contextualizada. O trabalho demonstra que a problemática central do ensino tradicional — caracterizado pela ausência de experimentação, pela ênfase exclusiva na matemática e pela falta de explicação dos fenômenos físicos — compromete a aprendizagem e afasta os estudantes da disciplina. Como registrado no texto, “*cerca de 64% dos alunos responderam que nunca viram uma aula experimental de física durante seu ensino básico*”, revelando uma carência estrutural que impede a construção de significados e a compreensão dos fenômenos naturais.

A aplicação da metodologia experimental com o gerador de Van de Graaff mostrou-se capaz de transformar esse cenário. Os resultados quantitativos confirmam que a intervenção produziu avanços expressivos: o interesse pela Física aumentou em 18 pontos percentuais, a facilidade percebida cresceu 39 pontos percentuais, e a compreensão dos fenômenos físicos teve o maior salto, com 49 pontos percentuais de melhoria. Além disso, todos os alunos vivenciaram ao menos uma aula experimental, rompendo a ausência histórica de práticas laboratoriais. A estatística Z reforça a robustez desses achados, com valores de p inferiores a 0,05 na maioria dos indicadores, demonstrando que as diferenças observadas não ocorreram por acaso, mas refletem impacto real da metodologia.

Os relatos dos estudantes complementam os dados numéricos, indicando que a experimentação desperta interesse, facilita a visualização dos fenômenos e permite relacionar o conteúdo ao cotidiano. Eles afirmam que a Física deixa de ser apenas cálculo e passa a ser ciência viva, compreensível e aplicável. A metodologia teórica-experimental, ao equilibrar explicação conceitual e demonstração prática, atende às condições da aprendizagem significativa de Ausubel, permitindo que novos conhecimentos se conectem aos saberes prévios dos alunos.

Dessa forma, conclui-se que a utilização do gerador de Van de Graaff como recurso didático não apenas viabiliza a compreensão dos tipos de eletrização, mas também ressignifica a relação dos estudantes com a Física. A pesquisa confirma que práticas experimentais são essenciais para o ensino, promovendo engajamento, clareza conceitual e aprendizagem

profunda. Trata-se, portanto, de uma metodologia eficaz, necessária e plenamente justificável para o desenvolvimento do ensino da Física na educação básica.

REFERÊNCIAS

- AUSUBEL, D.P The Psychology of Meaningful Verbal Learning. New York: Grune & Stratton, 1963.
- AUSUBEL, D.P, NOVAK, J., & HANESIAN, H. Educational Psychology: A Cognitive View (2nd Ed.). New York: Holt, Rinehart & Winston, 1978.
- BISCUOLA, Gualter José; VILLAS BÔAS, Newton; DOCA, Ricardo Helou. Física 3: eletricidade; física moderna. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2016.
- BORGES, Denílson da Silva; LOPES, Rafael Ferreira. Eletricidade e sua história. [Dados editoriais não informados].
- CALUZI, João José; BOSS, Sérgio Luiz Bragatto. Os conceitos de eletricidade vítrea e eletricidade resinsosa segundo Du Fay. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 4, p. 635-644, 2007.
- CHAVANTE, Dina. Eletrônica III. [Dados editoriais não informados].
- COOKE, Chatham. Descrições técnicas sobre o funcionamento do gerador de Van de Graaff. MIT Department of Electrical Engineering, 1930s.
- DIESEL, A.; MARTINS, S. N.; REHFELDT, M. J. H. “Aproximações entre as metodologias ativas de ensino e as tecnologias digitais de informação e comunicação”. Conexões – Ciência e Tecnologia, v. 12, n. 1, p. 38-44, 2018.
- FREIRE, P. Pedagogia da Autonomia: Saberes necessários à prática educativa. São Paulo: Paz e Terra, 2019.
- FURFARI, F. A. (Tony). A History of the Van de Graaff Generator. IEEE, 1989.
- GASPAR, Alberto. Compreendendo a física. 2. ed. São Paulo: Ática, 2013. v. 3: Eletromagnetismo e física moderna.
- Halliday, D.; Resnick, R. & Walker, L. - Fundamentos de Física, volume 3, 4ª edição (1996).
- LUIZ, Antônio Máximo Ribeiro da; ALVARENGA, Beatriz; GUIMARÃES, Carla da Costa. Física: contexto & aplicações – ensino médio. 2. ed. São Paulo: Scipione, 2016.
- MACHADO, Kleber Daum. Teoria do eletromagnetismo. Ponta Grossa: UEPG, 2000. v. 1.

MARQUES, Abimael Antunes. A pedagogia tecnicista: um breve panorama. Revista da Pós-Graduação em Educação, Universidade Federal de Jataí, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.5216/rir.v1i12.1313>>. Acesso em: 21 maio 2024.

MAURICIO, Massazumi Oka. História da eletricidade. Versão 1.0, nov. 2000. [Dados editoriais não informados].

MOREIRA, M. A. “¿Al final, qué es aprendizaje significativo?”. Revista Currículum, v. 25, p. 29-56, 2012.

NOVAK, J. D.; AUSUBEL, D. P.; HANESIAN, H. Educational Psychology: A Cognitive View. Holt, Rinehart and Winston, 1968. (Contexto histórico sobre aplicações educacionais do gerador).

PERCILIA, Eliene. Robert Jemison. [Dados editoriais não informados].

SALA, Oscar. O gerador eletrostático e suas aplicações. Ciência e Cultura, São Paulo, v. 1, n. 1-2, p. 12, 1949.

SANTOS, Alex Ferreira dos. Eletricidade aplicada. 1. ed. Rio de Janeiro: SESES, 2016.

SANTOS, José; DICKMAN, Adriana. Experimentos reais e virtuais: proposta para o ensino de eletricidade no nível médio. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 41, n. 1, 2019. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/BKKqL43Gq4Dh83B9zzCS6hk/?lang=pt>>. Acesso em: 21 maio 2024.

SANTOS, M. E. M. Aspectos sócio-históricos relativos à eletricidade e pilha: contribuições para a formação de professores. Scientia Plena, v. 11, n. 6, 2015. Disponível em: <<https://scientiaplena.org.br/sp/article/view/2535>>. Acesso em: 22 maio 2024.

SILVA, F. K. M.; OLIVEIRA, F. G.; CRUZ, T. G. S. Qual física se aprende? Qual física se observa? Qual física se ensina? E, afinal, qual professor de física se forma? Reflexões sobre a potencialidade do estágio supervisionado num cenário controverso. Laplage em Revista, v. 2, n. 2, p. 51-62, maio/ago. 2016.

SILVA, J. B. da. “A Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel: uma análise das condições necessárias”. Research, Society and Development, v. 9, n. 4, 2020.

TIPLER, P. A.; Mosca, G. - Física, volume 2, 5ª edição. 3- Nussenzveig, H. M. ? Curso de Física Básica, volume 3, 4ª edição (2002).

TORRES, Carlos Magno A.; FERRARO, Nicolau Gilberto; SOARES, Paulo Antônio de Toledo. Física: ciência e tecnologia. v. 3. 2. ed. São Paulo: Moderna, 2010.

VAILLANT, Denise; MARCELO, Carlos. Ensinando a ensinar: as quatro etapas de uma aprendizagem. Curitiba: Editora da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

VAN DE GRAAFF, Robert Jemison. Instituto Americano de Física; Biblioteca Niels Bohr. Arquivo do original em 8 abr. 2023. [Dados editoriais não informados].

VAN DE GRAAFF, Robert J. A method for producing high voltages. Physical Review, New York, v. 38, p. 1919, 1931.

WINDHAM, Ben. Luzes do Sul: Robert Van de Graaff nunca recebeu o devido em Tuscaloosa. Arquivo do original em 3 set. 2013

APÊNDICE

QUESTIONÁRIO

Nome: _____

1. Durante o seu curso do ensino médio, como você via a disciplina de física, em uma escala de 0 a 10 o quanto você gostava?

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

2. Em uma escala de 0 a 10 o quanto você achava fácil o conteúdo da disciplina de física?

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

3. Qual a sua principal dificuldade para a compreensão dos conteúdos voltados para a física?

4. Quanto a experimentação no ensino da física, com que frequência você tinha acesso a aulas experimentais em sala de aula ou laboratório?

- a. Nunca
- b. Semanalmente
- c. Mensalmente

5. Outros:

Em uma escala de 0 a 10 o quanto você acha importante a utilização da metodologia experimental para o ensino da física? Justifique:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

6. Durante o período do seu ensino básico você via a física mais como uma ciência ou mais como uma disciplina matemática?

7. A física utiliza da matemática para explicar os fenômenos da natureza. Ao se deparar com uma “fórmula” física em uma escala de 0 a 10 o quanto era comum o seu professor explicar o fenômeno por trás daquele cálculo matemático?

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

8. Durante a aula teórico/experimental ficou mais fácil compreender os fenômenos físicos apresentados?

De 0 a 10 o quanto a utilização da experimentação ajudou na compreensão desses fenômenos?

9. Em sua opinião o que é essencial para que uma aula de física ocorra de maneira eficaz? dê exemplos.