



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE EDUCAÇÃO E SAÚDE
UNIDADE ACADÊMICA DE FÍSICA E MATEMÁTICA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

MARIA DAS VITÓRIAS DA SILVA

FENÔMENOS ELÉTRICOS: ESTUDO DE CASOS

CUITÉ – PB

2024

MARIA DAS VITÓRIAS DA SILVA

FENÔMENOS ELÉTRICOS: ESTUDO DE CASOS

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Cuité, como exigência parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Ferreira de Medeiros

CUITÉ – PB

2024

S586f Silva, Maria das Vitórias da.

Fenômenos elétricos: estudo de casos. / Maria das Vitórias da Silva. -
Cuité, 2024.
51 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) -
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Educação e Saúde,
2024.

"Orientação: Prof. Dr. Fábio Ferreira de Medeiros".

Referências.

1. Eletromagnetismo. 2. Eletricidade. 3. Eletricidade - natureza. 4.
Eletricidade - história. 5. Eletricidade - evolução humana. 6. Centro de
Educação e Saúde. I. Medeiros, Fábio Ferreira de. II. Título.

CDU 537.8(043)

MARIA DAS VITÓRIAS DA SILVA

FENÔMENOS ELÉTRICOS: ESTUDO DE CASOS

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Cuité, como exigência parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Aprovado em: 21/05/2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **FABIO FERREIRA DE MEDEIROS**
Data: 29/05/2024 14:16:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fábio Ferreira de Medeiros – UAFM/CES/UFCG

(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **HERON NEVES DE FREITAS**
Data: 29/05/2024 13:53:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Heron Neves de Freitas – UAFM/CES/UFCG

(Examinador Interno)

Documento assinado digitalmente
 **JOSECLECIO DUTRA DANTAS**
Data: 29/05/2024 11:24:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Joseclécio Dutra Dantas – UAFM/CES/UFCG

(Examinador Interno)

CUITÉ – PB

2024

A minha querida mãe Francisca (In memoriam), que me ensinou que por mais difícil que seja, não devemos desistir de nossos sonhos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram e ajudaram-me na realização desse trabalho e de um sonho que não é só meu, mas também de minha mãe Francisca, que infelizmente não está mais aqui entre nós.

Primeiramente, agradeço a Deus, o autor da minha vida, por iluminar meu caminho nessa trajetória árdua, por ter me guiado durante todas as minhas escolhas. Agradeço a Ele por ter me proporcionado viver momentos e experiências inesquecíveis durante a minha graduação e por ter colocado pessoas incríveis no meu caminho.

A minha família, meu esposo Edinaldo, meus filhos Emerson e Lucas Rian, por todo apoio e compreensão que me proporcionaram durante esta jornada. Obrigado por serem minha fonte de força e por tornarem esta jornada memorável. Amo vocês.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Ferreira de Medeiros, pela orientação dedicada, paciência e valiosos ensinamentos. Agradeço pelas palavras de incentivo na hora em que pensei em desistir, por não acreditar que não seria capaz de realizar esse trabalho. Seu apoio foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Minhas amigas, Silvanira, Jessíla, Sueli, Maria Laura, Thayse, pessoas maravilhosas que tive o prazer de conhecer durante a graduação. Obrigada por cada momento de aprendizagem e pelos momentos de conversas aleatórias, muitas das vezes estava me sentindo incapaz e vocês mesmo sem perceber falavam alguma coisa que me fazia me sentir bem. Obrigada meninas, saibam que cada uma de vocês tem um lugarzinho especial dentro do meu coração.

Agradeço também aos professores membros da banca examinadora, Prof. Dr. Heron Neves de Freitas e Prof. Dr. Joseclécio Dutra Dantas, pela avaliação cuidadosa e pelos comentários construtivos que ajudaram a aprimorar este trabalho.

Não poderia deixar de agradecer aos professores, Jair, Miranda, Luciano e Alexandre Pascal (Professor preceptor do Programa Residência Pedagógica), pelos

ensinamentos repassados. Vocês foram essenciais para que esse dia chegasse. Agradeço pelas palavras de incentivo que talvez vocês nem saibam que foram ditas, mas quando estava prestes a desistir (durante a pandemia do Covid-19), vocês me fizeram enxergar que desistir não é a solução dos problemas e sim ter persistência e dedicação.

Por fim agradeço, a todos os professores do Curso de Licenciatura em Física, pela dedicação e conhecimentos compartilhados.

Muito obrigada!

"A educação tem raízes amargas, mas os
seus frutos são doces."

(Aristóteles)

RESUMO

A história da eletricidade é uma jornada fascinante que remonta milhares de anos, desde as primeiras observações de fenômenos elétricos até as sofisticadas tecnologias modernas. Ao longo dos séculos, a curiosidade humana e a busca por compreender a natureza levaram a descobertas e avanços significativos no campo da eletricidade. A partir disso, este trabalho traça uma linha do tempo da evolução do conhecimento humano sobre a eletricidade, desde as antigas civilizações até as descobertas científicas contemporâneas. Este trabalho, portanto, explora-se como a compreensão da eletricidade foi moldada por figuras históricas importantes e marcos científicos, desde os experimentos iniciais com âmbar até os avanços do século XIX. Além disso, investiga a relação entre a história da eletricidade e fenômenos naturais como relâmpagos, trovões, auroras, fogo de Santelmo, sonoluminescência, triboluminescência e raios cósmicos. Nesse trabalho é analisado como esses fenômenos foram percebidos e interpretados ao longo da história, influenciando a cultura, religião e o desenvolvimento científico. Sendo assim, tem como objetivo fazer um breve levantamento histórico e bibliográfico sobre a eletricidade e compreender a natureza física através de alguns fenômenos elétricos observados na natureza, proporcionando ao leitor uma visão geral da evolução da eletricidade e compreensão da física associada a fenômenos naturais. Para a realização desta obra, foi feita uma revisão bibliográfica em livros, artigos, teses, monografias e sites na internet. Portanto este estudo nos leva a refletir sobre a importância do conhecimento científico e da inovação tecnológica para impulsionar o progresso humano e reconhecermos a complexidade e a beleza dos fenômenos elétricos estudados.

Palavras-Chaves: eletricidade, atmosfera, natureza.

ABSTRACT

The history of electricity is a fascinating journey that goes back thousands of years, from the earliest observations of electrical phenomena to sophisticated modern technologies. Over the centuries, human curiosity and the quest to understand nature have led to significant discoveries and advancements in the field of electricity. From this, this work traces a timeline of the evolution of human knowledge about electricity, from ancient civilizations to contemporary scientific discoveries. It explores how the understanding of electricity has been shaped by important historical figures and scientific milestones, from the early experiments with amber to the advances of the century XIX. Furthermore, the relationship between the history of electricity and natural phenomena such as lightning, thunder, auroras, Saint Elmo's fire, sonoluminescence, triboluminescence and cosmic rays is investigated. The work analyzes how these phenomena have been perceived and interpreted throughout history, influencing culture, religion, and scientific development. Therefore, this work aims to make a brief historical and bibliographic survey about electricity and understand the physical nature through some electrical phenomena observed in nature, providing the reader with an overview of the evolution of electricity and understanding of physics associated with natural phenomena. To carry out this work, a bibliographic review was carried out in books, articles, theses, monographs and websites. Therefore, this study leads us to reflect on the importance of scientific knowledge and technological innovation to drive human progress and we recognize the complexity and beauty of the electrical phenomena studied.

Key words: electricity, atmosphere, nature.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Motivação e Objetivos	10
1.2. Apresentação	10
2. METODOLOGIA	12
3. UMA BREVE HISTÓRIA DA ELETRICIDADE	13
3.1 Origens Históricas da Eletricidade	13
4. FENÔMENOS ELÉTRICOS NATURAIS: UMA EXPLORAÇÃO CIENTÍFICA	19
4.1 Relâmpagos e Trovões: A Dança Cósmica da Energia	19
4.2 Auroras Boreal e Austral: Dança de Luz no Céu.....	26
4.3 Fogo de Santelmo: Luz Misteriosa dos Mastros Marítimos	32
4.4 Sonoluminescência: Luz nas Profundezas do Mistério.....	34
4.5 Triboluminescências: Luz a partir do Atrito Terrestre.....	39
4.6 Raios Cósmicos visuais: Mensageiros Luminosos do Universo.....	42
5. CONCLUSÕES	46
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e Objetivos

A escolha da temática abordada nesse Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) surgiu a partir do interesse em obter um melhor entendimento sobre os fatos históricos a respeito da eletricidade, bem como compreender a física associada a alguns fenômenos elétricos encontrados na natureza. O estudo desses fenômenos é importante para que estudantes e público em geral, ao ler este material, possa compreender e identificar alguns desses fenômenos.

Ao explorar a história da eletricidade, é possível entender como as civilizações antigas começaram a perceber e experimentar os fenômenos elétricos naturais, como os relâmpagos e a eletricidade estática. Essa jornada histórica revela não apenas as descobertas científicas que impulsionaram o entendimento da eletricidade, mas também as consequências sociais, econômicas e culturais dessas descobertas ao longo dos séculos.

Além disso, ao investigar os fenômenos elétricos, como tempestades elétricas e auroras boreais, podemos compreender melhor a relação entre a eletricidade na natureza e as tecnologias humanas.

O objetivo geral desse TCC é fazer um breve levantamento histórico e bibliográfico sobre a eletricidade e compreender a natureza física através de alguns fenômenos elétricos observados na natureza.

Objetivos específicos:

- Descrever, brevemente, a história da eletricidade;
- Explorar alguns fenômenos elétricos naturais;
- Criar um material de apoio para estudantes de física e o público geral.

1.2. Apresentação

O estudo da eletricidade e dos fenômenos elétricos, associados com a natureza, sempre intrigaram a humanidade desde séculos passados. Através dessa curiosidade de compreender os mecanismos por trás da eletricidade e explicar as

ocorrências desses fenômenos que nasce a Ciência, em particular a Física, considerada como:

(...) o ramo da Ciência que, juntamente com a Matemática, a Biologia e a Química, procura explicar os fenômenos que ocorrem na natureza, como o movimento dos corpos, as trocas de energia entre sistemas, a propagação da luz, etc.(...) (ROBORTELLA, 1984, p.6).

A partir dos objetivos apresentados anteriormente. Neste trabalho faz-se uma abordagem sobre a história da eletricidade e alguns fenômenos encontrados na natureza, o qual está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2, é descrita metodologia do trabalho e como surgiu a escolha do tema. No Capítulo 3, faz-se uma breve explanação sobre as origens históricas da eletricidade, a partir de Tales de Mileto até os dias atuais, abordando alguns dos principais cientistas e suas descobertas ao longo dos séculos.

No Capítulo 4, iremos explorar alguns dos fenômenos elétricos encontrados na natureza, como relâmpagos, auroras, fogo de santelmo, sonoluminescência, triboluminescência e raios cósmicos visuais. Buscamos não apenas descrever esses fenômenos, mas também destacar sua importância científica e demonstrar como a eletricidade na natureza continua a cativar e enriquecer nossa compreensão do mundo ao nosso redor.

No Capítulo 5, iremos apresentar as conclusões que foram obtidas através das pesquisas bibliográficas. Por fim, no Capítulo 6, temos todas as referências bibliográficas utilizadas nas pesquisas para realização deste trabalho.

2. METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho que teve como objetivo principal compreender a natureza física de alguns fenômenos elétricos observados na natureza, foi desenvolvida uma pesquisa bibliográfica. Este tipo de pesquisa está inserido no meio acadêmico com a finalidade aprimorar e atualizar o conhecimento, através de uma investigação científica de obras já publicadas.

De acordo com Andrade (2010, p.25):

A pesquisa bibliográfica é habilidade fundamental nos cursos de graduação, uma vez que constitui o primeiro passo para todas as atividades acadêmicas. Uma pesquisa de laboratório ou de campo implica, necessariamente, a pesquisa bibliográfica preliminar. Seminários, painéis, debates, resumos críticos, monografias não dispensam a pesquisa bibliográfica. Ela é obrigatória nas pesquisas exploratórias, na delimitação do tema do trabalho ou pesquisa, no desenvolvimento do assunto, nas citações, na apresentação das conclusões. Portanto, se é verdade que nem todos os alunos realizarão pesquisas de laboratório ou de campo, não é menos verdadeiro que todos, sem exceção, para elaborar os diversos trabalhos, solicitados, deverão empreender pesquisas bibliográficas (ANDRADE, 2010, p.25).

Primeiramente, foi a escolha do tema que se deu a partir do interesse em compreender a física associada aos fenômenos elétricos encontrados na natureza. A partir de então, deu-se início aos estudos, partindo da identificação e localização das fontes bibliográficas, como: livros, artigos, teses, monografias e sites na internet, sobre a história da eletricidade e os fenômenos citados no referido trabalho.

Durante as pesquisas foram encontrados alguns trabalhos referentes ao tema escolhido. Mas para a elaboração desse trabalho foram selecionados os que abrangiam mais informações sobre o objetivo proposto, e traziam informações importantes sobre a história da eletricidade e os fenômenos descritos no Capítulo 4.

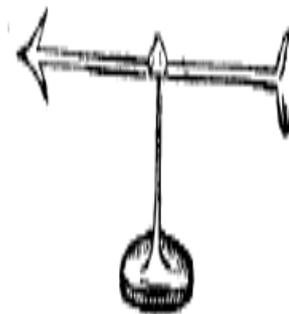
Em 1600, Gilbert demonstrou que a eletricidade poderia ser produzida por atrito. Foi o primeiro a distinguir claramente a relação entre os fenômenos elétricos e magnéticos. Ele quem criou a palavra eletricidade, derivando-a de “*elektron*” que significa âmbar em grego. Gilbert mostrou que o efeito elétrico não é exclusivo do âmbar, mas que muitas outras substâncias podem ser carregadas eletricamente ao ser esfregadas. Ele também reuniu vários fatos sobre fenômenos elétricos (ASSIS, 2010, p. 27-29).

Gilbert, em seu livro *De Magnete*, de 1600, mencionou um aparelho por nome de *Versorium* (Figura 2), o qual consegue destacar a existência de forças elétricas muito pequenas. De acordo com Assis (2010):

Este instrumento elétrico é o mais antigo inventado pelo homem. Segundo Gilbert, o versório é um instrumento que normalmente consiste de duas partes: um membro vertical, que age como um suporte fixo em relação a Terra, e um horizontal capaz de girar livremente sobre o eixo vertical definido pelo suporte. Ele é similar a uma bússola magnética em construção, exceto pelo fato do membro horizontal não ser magnetizado como ocorre na bússola. Conceitualmente, a habilidade de o membro horizontal poder girar livremente significa que este instrumento é muito sensível a torques externos muito pequenos. Portanto, pode ser usado para detectar estes torques da mesma forma como a bússola detecta o torque magnético exercido pela Terra (ASSIS, 2010, p.38).

Por ser um aparelho muito sensível, Gilbert realizou várias experiências, no qual obteve onde um grande número de substâncias atritadas.

Figura 2 - Versorium de Gilbert

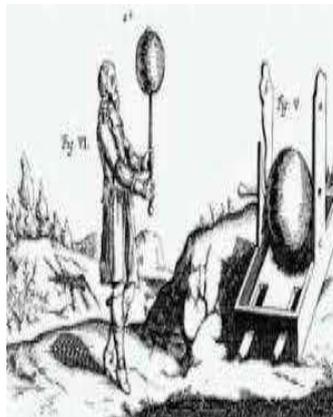


Fonte: Google.

Segundo Rocha et al. (2002, p.190), Gilbert afirmava que determinados corpos, quando atritados, emitiam um eflúvio (do latim *effluvium*), de natureza material, o qual é liberado pelo calor produzido entre corpos por meio de fricção. Uma ideia muito comum em sua época, segundo a qual deveria existir alguma conexão material entre dois corpos quando um exerce uma força sobre o outro, ideia essa que influenciou Gilbert.

Durante a Idade Média, entre os séculos V e XV, a compreensão da eletricidade era limitada, e muitos fenômenos elétricos eram mal compreendidos. A maioria dos conhecimentos sobre a eletricidade baseava-se em ideias e crenças religiosas. Todavia, alguns cientistas e inventores começaram a fazer experimentos com a eletricidade. Em 1660, Otto von Guericke (1602 -1686), um físico alemão, construiu a primeira máquina eletrostática (Figura 3), que permitia a geração de cargas elétricas através do atrito.

Figura 3 - Esfera de enxofre e máquina de fricção elétrica de Otto von Guericke



Fonte: Google.

A partir do século XVIII, a eletricidade começou a ser estudada de uma forma mais sistemática. Um dos estudiosos foi Benjamin Franklin (1706 – 1790), o qual realizou diversos experimentos com a eletricidade, incluindo o famoso experimento com o papagaio e a chave, onde se provou a existência de cargas elétricas positivas e negativas.

Franklin iniciou seus estudos sobre a eletricidade somente após receber de seu amigo Peter Collinson (1694-1768), em 1745, uma tradução de trabalhos alemães, relatando experimentos elétricos publicados na *Gentleman's*

Magazine, uma revista voltada à divulgação das novidades europeias. Além das revistas, Collinson enviou um tubo de vidro que era utilizado para produzir faíscas. Não foi só isso que conquistou Franklin, ele propôs uma “teoria do fluido único”, segundo a qual todo corpo teria uma quantidade normal desse fluido e, por isso, seria eletricamente neutro. Se um corpo fosse atritado com outro, o que adquirisse excesso de fluido estaria carregado positivamente e o que perdesse fluido estaria carregado negativamente. Franklin foi o primeiro a usar as palavras positivo e negativo na eletricidade (SILVA; PIMENTEL, 2008, p. 118).

Durante o século XIX, a eletricidade passou por um grande avanço tecnológico que resultou durante esse período em várias descobertas e invenções. “Na segunda metade do século XIX, por exemplo, a máquina a vapor transformou a maior parte das atividades econômicas, e a sua difusão provocou um grande e vasto avanço industrial na Europa”, (IZERROUGENE, 2013, p. 11). Destacamos também a lei da conservação da carga elétrica, proposta pelo físico francês Charles Coulomb (1736 – 1806), em 1785, a qual estabelece que a carga elétrica não pode ser criada nem destruída, mas transferida de um objeto para outro. E em 1800, o físico italiano Alessandro Volta (1745 -1827), inventou a pilha voltaica (Figura 4) que foi a primeira fonte de energia elétrica contínua, a qual permitiu o desenvolvimento de experimentos e pesquisas mais avançadas nessa área.

Figura 4 - Pilha voltaica



Fonte: Disponível em: https://www.nationalgeographic.pt/historia/alessandro-volta-e-os-misterios-da-electricidade_294. Acesso em: 26/03/2024.

Michael Faraday (1791- 1867), cientista inglês ao realizar experimentos com campos eletromagnéticos, descobriu o princípio da indução eletromagnética. Descoberta essa que foi fundamental para o desenvolvimento de aparelhos amplamente utilizados até hoje, como os geradores elétricos e transformadores. No

ano de 1831, Faraday construiu o primeiro motor elétrico prático, ele se baseou nos seus estudos sobre magnetismo e indução eletromagnética. Este motor foi um marco significativo na aplicação prática da eletricidade.

Em meados do século XIX, o inventor americano Samuel Morse (1791 – 1872) e o cientista britânico William Cooke (1806 – 1879) desenvolveram o telégrafo elétrico (Figura 5), que permitiu a transmissão de mensagens usando correntes elétricas. O telégrafo foi um dos primeiros sistemas de comunicação a longa distância.

Figura 5 - Telégrafo elétrico



Fonte: Disponível em <https://www.coladaweb.com/curiosidades/telegrafo>. Acesso em: 26/03/2024.

No final do século XIX, ocorreram avanços significativos na área de iluminação elétrica. O cientista americano Thomas Edison (1847 – 1931) desenvolveu a lâmpada incandescente comercialmente viável em 1879, que revolucionou o setor de iluminação e substituiu gradualmente as lâmpadas a gás e o uso de velas e lamparinas. Além disso, foram realizadas importantes pesquisas na área de corrente alternada (CA). O engenheiro elétrico sérvio-croata Nikola Tesla (1856 – 1943) foi um dos pioneiros na promoção da corrente alternada como uma forma mais eficiente de distribuição de energia elétrica em relação à corrente contínua (CC), desenvolvida por Edison (1847 – 1931). Tesla criou diferentes patentes relacionadas a sistemas de

transmissão e distribuição de corrente alternada, incluindo o motor de indução e a bobina de Tesla.

Em síntese, as origens históricas da eletricidade refletem uma jornada complexa, desde as observações antigas até as descobertas científicas fundamentais. A evolução da eletricidade desde a antiguidade até os dias atuais representa um extraordinário salto tecnológico e cultural. Na antiguidade, a compreensão limitada desse fenômeno estava restrita a observações rudimentares, como a descoberta dos efeitos estáticos em substâncias como o âmbar. Hoje, vivemos em uma era em que a eletricidade não é apenas compreendida teoricamente, mas também dominada e amplamente utilizada. Enquanto antigas civilizações se maravilhavam com fenômenos elétricos naturais, como relâmpagos, a sociedade contemporânea aproveita redes elétricas complexas, fontes diversificadas de energia e tecnologias avançadas. A eletricidade, em tempos passados, era um mistério, e agora uma força central na vida cotidiana, impulsionando a inovação, a comunicação e a sustentabilidade. A transição para fontes renováveis e a automação inteligente são testemunhas da trajetória extraordinária que a eletricidade percorreu desde os tempos antigos até os dias atuais.

4. FENÔMENOS ELÉTRICOS NATURAIS: UMA EXPLORAÇÃO CIENTÍFICA

No vasto panorama da natureza, fenômenos elétricos naturais capturam a nossa imaginação e despertam curiosidade. Desde os majestosos relâmpagos até os enigmáticos raios cósmicos visuais, esses eventos intrigantes desafiam a nossa compreensão, conectando-se de maneira íntima aos elementos fundamentais de nosso planeta. Neste capítulo, exploraremos alguns fenômenos como relâmpagos, auroras, fogo de santelmo, sonoluminescência, triboluminescência e raios cósmicos visuais. Buscamos não apenas descrever esses fenômenos elétricos naturais, mas também destacar sua importância científica, cultural e estética, demonstrando como a eletricidade na natureza continua a cativar e enriquecer nossa compreensão do mundo ao nosso redor.

4.1 Relâmpagos e Trovões: A Dança Cósmica da Energia

Os relâmpagos e trovões, fenômenos comuns e espetaculares, têm fascinado a humanidade desde os tempos passados. Aqui, buscamos elucidar os mecanismos por trás desses eventos atmosféricos, destacando a complexidade da interação entre partículas carregadas na atmosfera e o solo. Exploraremos como as descargas elétricas se formam e se manifestam, resultando nesse espetáculo visual e auditivo que inspirou mitos e lendas em diversas culturas.

Os elementos tempestuosos da natureza (relâmpagos e trovões) compõem uma sintonia visual e sonora que ecoa pelos céus. Este espetáculo magnífico é fruto da dança caótica entre cargas elétricas nas nuvens, um fenômeno que hipnotiza e aterroriza simultaneamente.

Os relâmpagos e trovões, desde as antigas civilizações, foram muitas vezes associados à divindade e fenômenos sobrenaturais. Na mitologia nórdica, por

exemplo, o trovão era atribuído a Thor¹, que brandia² um martelo capaz de criar estrondos no céu. E na mitologia grega, por exemplo, Zeus, o deus dos céus, era frequentemente associado aos relâmpagos, lançando-os como símbolos de sua ira. Para os índios brasileiros, os raios significam sinais de proteção divina. Segundo a crença Tupi-Guarani, Tupã lançava seus raios sobre os homens dominados por maus espíritos (MEDEIROS; SOUSA; SABA, 2019). Com o avanço da ciência, especialmente a partir dos séculos XVII e XVIII, a compreensão desses fenômenos começou a mudar. O trabalho pioneiro de Benjamin Franklin, no século XVIII, ao realizar experimentos com pipas para entender a natureza elétrica dos raios (Figura 6), marcou um ponto de virada crucial para a transição de explicações mitológicas.

Figura 6 - Benjamin Franklin, experimento sobre a eletricidade com pipa



Fonte: Google.

Os relâmpagos são fenômenos elétricos que ocorrem na troposfera da Terra como consequência da separação de cargas elétricas nas nuvens durante tempestades. Essas impressionantes descargas elétricas são resultado de um acúmulo de cargas opostas nas nuvens, onde cargas elétricas são transferidas entre a atmosfera e a Terra. Tais nuvens apresentam elevado desenvolvimento vertical e horizontal, com formação de gelo em altas altitudes (acima de 5 - 6 km) e fortes

¹Deus do trovão, das tempestades e da agricultura.

² Agitar uma arma antes de desferir o golpe.

correntes verticais de vento (MACGORMAN, RUST, 1998; RAKOV, UMAN, 2003; NACCARATO, 2005). Essas cargas elétricas são geradas principalmente pelo atrito entre as partículas de gelo e a água dentro das nuvens de tempestades. À medida que essas partículas colidem, elétrons são transferidos, criando uma separação de cargas. As partículas mais leves, como os cristais de gelo, tendem a ser levadas para as partes superiores das nuvens, enquanto as gotas de água carregadas negativamente se acumulam nas regiões inferiores. Esse desequilíbrio resulta em uma grande diferença de potencial, essa diferença de potencial é devido a criação de um enorme campo elétrico. Quando essa diferença de potencial atinge um ponto crítico, ocorre descarga elétrica formando um canal de ionização no ar. A corrente elétrica viaja através desse canal, aquecendo o ar a temperaturas incríveis. O calor extremo expande o ar rapidamente, criando ondas de choque que resultam no som estrondoso do trovão. O trovão pode ser ouvido a grandes distâncias, dependendo da intensidade da tempestade e das condições atmosféricas. Devido à intensidade da luz produzida pela energia liberada durante esse fenômeno fascinante, o relâmpago ilumina o céu. Portanto, o relâmpago consiste em uma descarga elétrica de grandes proporções que ocorre na atmosfera, a qual possui um longo canal ionizado, na maioria das vezes de diversas ramificações, que se estende por vários quilômetros, tanto na vertical, como na horizontal (NACCARATO, Kleber Pinheiro, 2006).

De acordo com PINTO JR.; PINTO, 2008, conforme citado por BORTOLIN, e GALVANI (2017, p. 230),

A formação do aspecto visual de um relâmpago é devido ao rápido movimento dos elétrons de um ponto a outro. Sua aparência sugere que ele seja uma descarga contínua, porém são curtos pulsos com duração de dezenas a centenas de microssegundos³ e intensidade de até centenas de milhares de ampères⁴, bem como de correntes com lentas variações com duração de dezenas a centenas de milissegundos⁵ e intensidade de até centenas de ampères (apud BORTOLIN e GALVANI, 2017, p. 230).

Os relâmpagos têm uma importância que transcende o espetáculo visual que proporcionam. Sob uma perspectiva científica, esses fenômenos atmosféricos são manifestações de descargas elétricas intensas, resultantes do acúmulo de cargas

³ Um microssegundo equivale a um milionésimo de segundo.

⁴ Unidade de medida do SI de intensidade de corrente elétrica.

⁵ Um milissegundo equivale a um milésimo de segundo.

opostas nas nuvens e na superfície terrestre. A compreensão científica dos relâmpagos desempenha um papel crucial na meteorologia, ajudando a prever tempestades e a entender os padrões climáticos. Além disso, estudos sobre a eletricidade atmosférica proporcionam percepções valiosas sobre a dinâmica da atmosfera terrestre e os processos que regem as trocas de energia na natureza.

Como manifestações elétricas na atmosfera, os relâmpagos apresentam uma diversidade de formas e características, possibilitando sua classificação em diferentes tipos, como relâmpago intranuvem ou nuvem-nuvem e nuvem-solo. Cada variante apresenta características distintas, influenciando não apenas a morfologia visual do fenômeno, mas também suas implicações meteorológicas e geofísicas (EXTERKOETTER; MANOEL, 2020).

Os relâmpagos intranuvem ou nuvem-nuvem (Figura 7) são os eventos mais comuns, os quais ocorrem no interior das nuvens Cumulonimbus⁶ e propagam-se entre duas nuvens (nuvem-nuvem) ou mesmo dentro dela própria (intranuvem). Em alguns casos, pode-se haver descarga da nuvem para uma direção qualquer, sendo caracterizados como descargas para o ar. Neste caso, é mais comum o deslocamento das cargas negativas para a região carregada positivamente, mas fazendo-se possível também os relâmpagos inversos (EXTERKOETTER; MANOEL, 2020).

Os relâmpagos intranuvem iniciam-se através de um líder contínuo que se propaga com uma velocidade em torno de 40.000 km/h, em geral de uma região de cargas negativas para uma região de cargas positivas dentro da nuvem, transportando cargas negativas. Sobreposto ao líder, existem pulsos de corrente que resultam do encontro do líder com centros menores de cargas. Estes pulsos são muito similares àqueles que ocorrem durante o período de quebra de rigidez dielétrica do ar⁷, e indicam a presença de movimentos verticais e horizontais dentro da nuvem. Relâmpagos intranuvem não apresentam descargas de retorno ⁸(ELAT, 2019).

⁶ Representam nuvens de tempestades associadas a fenômenos atmosféricos como trovoadas, granizos e aguaceiros.

⁷A rigidez dielétrica do ar é a capacidade do ar de resistir à passagem de corrente elétrica.

⁸ Descargas de contorno" descreve essencialmente algum tipo de movimento, liberação ou fluxo ao longo das margens ou limites de uma área ou objeto específico. Em meteorologia, "descargas de

Figura 7 - Relâmpago nuvem-nuvem



Fonte: ELAT, 2019.

Os relâmpagos nuvem-nuvem envolvem a transferência de cargas elétricas entre diferentes nuvens de tempestades. Esse tipo de descarga cria raios horizontais impressionantes, conectando nuvens carregadas eletricamente. Embora não atinjam diretamente a superfície, esses relâmpagos contribuem para a espetacularidade das tempestades elétricas.

Segundo PINTO JR; PINTO, 2008,

Os relâmpagos intranuvem ou nuvem-nuvem são os relâmpagos mais frequentes que ocorrem no planeta. Representam cerca de 70% da quantidade total de descargas atmosféricas. Essa alta frequência é basicamente relacionada ao fato de a capacidade isolante do ar diminuir com a altura, como também à maior proximidade de centros de carga de polaridades opostas. Porém, essa proporção tende a variar conforme se varia a latitude, ou seja, temos uma maior ocorrência em regiões de baixas latitudes e menor nas regiões de médias latitudes (apud BORTOLIN e GALVANI, 2017, p. 231).

contorno" podem se referir ao movimento do ar ao longo dos contornos geográficos, como montanhas ou corpos d'água, influenciando a circulação atmosférica local e os padrões de vento.

Figura 8 - Relâmpago nuvem-solo



Fonte: Google.

Os relâmpagos nuvem-solo (Figura 8) são caracterizados pela transferência de cargas elétricas entre as nuvens e a superfície da Terra. Essas descargas podem ocorrer verticalmente ou em padrões mais complexos, alcançando objetos na superfície, e por vezes, desencadeando eventos como incêndios florestais. Neste tipo, o sentido da corrente dá-se da nuvem para o solo, transportando carga negativa. Este fenômeno pode ocorrer transferindo cargas positivas, porém é muito mais incomum (EXTERKOETTER; MANOEL, 2020), tendo incidência nos meses que compõem o inverno (NASA, 2002).

De acordo com PINTO JR; PINTO, 2008, conforme citado por BORTOLIN e GALVANI (2017, p. 231),

Este é o mais perigoso e devastador para o homem e suas atividades. Ocorrem em número bem menor do que os relâmpagos entre nuvens e dentro das nuvens. Porém, na relação dos que atingem o solo, 99% são desse tipo, o que torna os relâmpagos solo-nuvem muito raros. Sua duração varia de um décimo de segundo podendo chegar até dois segundos, mantendo uma média de um terço de segundo. A corrente elétrica sofre bastante alteração durante a descarga, mas tem seus máximos, na maior parte dos casos, entre 20.000 a 30.000 ampères. Essa corrente flui por um canal de poucos centímetros de diâmetro e a temperatura pode atingir valores superiores a 30.000 °C⁹.

Na Figura 9, podemos observar de forma mais simplificada através de um desenho esquemático os tipos de relâmpagos que atingem o solo. a) Nuvem-Solo positivo; b) Nuvem-Solo negativo; c) Solo-Nuvem positivo; d) Solo- Nuvem negativo.

⁹ Essa temperatura equivale a cinco vezes a temperatura da superfície do Sol

Figura 9 - Tipos de relâmpagos

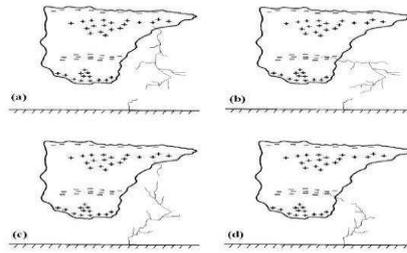


FIGURA 4.3 – Desenho esquemático simplificado dos tipos de relâmpagos que atingem o solo: (a) NS positivo; (b) NS negativo; (c) SN positivo; (d) SN negativo.
 FONTE: Naccarato (2001).

Fonte: Naccarato (2001).

De acordo com a Figura 9, podemos agrupar esses dois tipos de relâmpagos em positivos ou negativos. O que define basicamente se um raio será positivo ou negativo é a polaridade das cargas elétricas que são transferidas efetivamente para o solo. Desse modo:

- I) Positivo: Transfere cargas positivas para o solo;
- II) Negativo: Transfere cargas negativas para o solo.

Apesar de estarem normalmente associados a tempestades com chuvas intensas e ventos, os relâmpagos podem ocorrer em tempestades de neve, tempestades de areia, durante erupções vulcânicas, ou mesmo em nuvens que não sejam de tempestades, embora nesses casos costumem ter extensões e intensidades menores. Quando o relâmpago se conecta ao solo é chamado de raio, podendo ser denominado ascendente, quando inicia no solo e sobe em direção a tempestade, ou descendente, quando inicia na tempestade e desce em direção ao solo (ELAT, 2019).

É importante ressaltar que a classificação de relâmpagos não é uma tarefa simples, pois muitos eventos apresentam características mistas. A pesquisa contínua e o avanço tecnológico em monitoramento são essenciais para aprimorar a compreensão desses fenômenos complexos. Apesar de sua beleza cativante, os relâmpagos também apresentam perigos. Incêndios, danos a estruturas e riscos à segurança são algumas das consequências associadas a tempestades elétricas. A busca por proteção é instintiva quando os céus se iluminam e os trovões retumbam.

Em meio a dualidade entre fascínio e respeito, os relâmpagos e trovões permanecem como uma das manifestações mais impressionantes da natureza, recordando-nos da grandiosidade e da energia latente que permeiam os céus.

4.2 Auroras Boreal e Austral: Dança de Luz no Céu

As auroras, espetáculos luminosos nos céus polares, são causadas por partículas carregadas provenientes do evento solar e os gases atmosféricos. Este fenômeno, além de sua beleza impressionante, fornece percepções valiosas sobre a composição da atmosfera superior e o comportamento do campo elétrico na atmosfera e como esses processos impactam o clima e o ambiente.

O fenômeno da aurora ocorre devido à interação entre partículas carregadas, principalmente, prótons e elétrons, do vento solar e o campo magnético da Terra (Figura 10). Quando essas partículas são lançadas pelo Sol em direção à Terra, são desviadas pelo campo magnético terrestre e direcionadas para as regiões polares. Ao atingirem a atmosfera da Terra, essas partículas colidem com os átomos e moléculas presentes na atmosfera, especialmente, os gases oxigênio e nitrogênio.

Figura 10 - Auroras



Fonte: Google.

Durante essas colisões, os átomos excitados ganham energia e, ao retornarem ao seu estado fundamental, emitem essa energia em forma de luz visível. Essa luz é o que vemos como as auroras, que aparecem como cortinas de cores vibrantes no céu noturno. A cor específica da aurora depende do tipo de átomo ou molécula

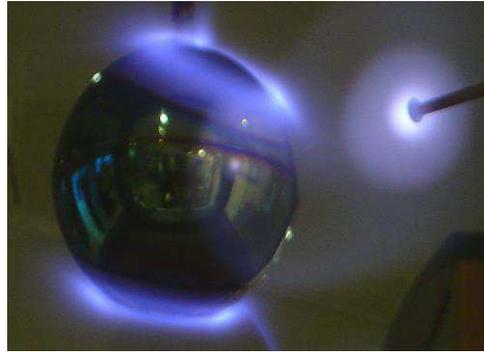
envolvida na colisão e da altitude em que ocorre a interação. Esse espetáculo de luz pode variar em intensidade e duração, dependendo da atividade solar e das condições atmosféricas.

As auroras são classificadas de acordo com sua localização geográfica, as boreais estão situadas em pontos próximos ao polo Norte e as austrais perto do polo Sul. São observadas com mais frequência nos meses de fevereiro, março, abril, setembro e outubro (VIEIRA; COSTA; SILVA, 2016), devido a forma como o campo magnético terrestre direciona as partículas carregadas para as regiões opostas.

As primeiras observações documentadas das auroras boreais remontam a séculos atrás, como relatos de diversas culturas antigas, como povos indígenas do Ártico e os antigos gregos. No entanto, foi apenas no século XIX que cientistas como Kristian Birkeland (1867 – 1917) e Carl Stormer (1874 – 1957) começaram a investigar sistematicamente esses fenômenos. Suas pesquisas pioneiras lançaram as bases para a compreensão moderna das auroras boreais. Desde então, uma variedade de teorias e modelos foram propostos para explicar as auroras boreais. Entre os mais influentes, estão a teoria da interação entre o vento solar e o campo magnético terrestre, formulada por Sydney Chapman (1888 - 1970) e Vincenzo Ferraro (1902-1974), na década de 1930, e o modelo de injeção de plasma de Birkeland, que descreve como as correntes elétricas são induzidas na ionosfera terrestre.

No final do século XIX, o físico norueguês Kristian Birkeland teve a ideia original de disparar raios catódicos sobre uma esfera magnetizada suspensa numa câmara de vácuo. Ele imaginou o cátodo representando o Sol, com os raios catódicos simulando a atmosfera solar, emitindo o vento solar, e a esfera magnetizada suspensa representando a Terra. Ele construiu cerca de quatorze diferentes versões de sua experiência durante o curso de sua vida. Esta experiência é chamada Terrella (Figura 11). Ao reverter as polaridades de seu experimento, Birkeland foi também o primeiro a visualizar as correntes do anel. Os cinturões de radiação associados a estas correntes foram descobertos mais tarde, em 1958, durante os primeiros voos espaciais norte-americanos por James Van Allen, resultado que lhe valeu o prêmio Crafoord em 1989, (PULICI, MELO, 2017).

Figura 11 - Auroras polares obtidas pela Terrella



Fonte: Google.

Os anéis brilhantes à volta de cada polo no experimento representam as ovas auroras. Tal como nas auroras que aparecem nos céus polares, são provocadas por um elevado número de elétrons atingindo os átomos do gás, sendo que as linhas do campo magnético se encontram mais próximas nos polos (PULICI, MELO, 2017).

A formação das auroras é mais comum durante as tempestades solares, momentos em que a Terra é atingida por fortes ventos oriundos do Sol. Porém, se por um lado somos agraciados com um lindo show de luzes no céu, por outro, somos também prejudicados, pois os ventos solares interferem nas telecomunicações e afetam os sinais de televisão, radares, telefonia, satélites e diversos sistemas eletrônicos. Isso acontece porque as partículas solares distorcem o campo magnético ao se aproximarem da Terra gerando deformações ao longo de uma grande região no entorno da Terra (VIEIRA; COSTA; SILVA, 2016).

As auroras boreais também são conhecidas como “luzes do norte”. Esses espetáculos deslumbrantes ocorrem principalmente nas regiões polares da Terra, os quais se apresentam como uma dança cósmica de cores vibrantes, iluminando o céu com tons de verde, vermelho, azul e violeta. De acordo com a NASA (2002), citado por SALLES (2017, p.18), a cor da aurora irá variar de acordo com qual gás, oxigênio ou nitrogênio, será excitado pelos elétrons solares, o quão forte será a energia no momento de suas colisões, e em que altitude se dá esse contato.

Segundo GREFF, 2013 “A cor auroral mais habitual é o verde, podendo variar para uma versão mais amarelada. Tal tonalidade ocorre pela excitação com os átomos de oxigênio presentes em altas camadas atmosféricas, em torno de 200 até 240 quilômetros de altitude” (apud SALLES, 2017, p.18).

De acordo com GREFF, 2013; NASA, 2002; citado por Salles (2017, p 19), para a emissão de luz vermelha, é necessária a interação dos átomos de oxigênio com elétrons de baixa energia que despontam em camadas mais baixas da atmosfera, normalmente, por volta de 100 quilômetros de altitude. Considerada a tonalidade mais rara, as auroras vermelhas escuras dependem de uma intensa atividade solar para acontecer, por isso, são extremamente raras.

Ademais, de acordo com GREFF, 2013; NASA, 2002; citado por Salles (2017, p.19), “as cores originadas pelos átomos de nitrogênio. Quando abaixo de 96 quilômetros de altitude, o nitrogênio emite luz azul, e quando acima de 96 quilômetros de altitude é gerada a cor roxa, que pode variar entre as nuances púrpura, violeta e rosa. O oxigênio e o nitrogênio também emitem luz ultravioleta, que pode ser detectada por câmeras especiais em satélites”.

As auroras boreais e austrais, geralmente, aparecem como faixas ou cortinas de luz ondulantes que se estendem pelo céu, mas também podem assumir formas mais complexas, como arcos (Figura 12), espirais (Figura 13) e raios (Figura 14).

Figura 12 - Aurora boreal – arco



Fonte: Google.

Figura 13 - Aurora boreal – espiral



Fonte: Google.

Figura 14 - Aurora boreal – raios



Fonte: Google.

No decorrer da noite as auroras também podem apresentar outros formatos, e todas as suas formas podem variar em intensidade. À medida que a noite avança, as faixas e os arcos se tornam ondulados e dobrados, eventualmente, rompendo em raios, podendo se tornar uma coroa (Figura 15) (NASA, 2002).

Figura 15 - Aurora boreal – coroa



Fonte: Google.

As auroras boreais ocorrem com mais frequências, no equinócio (instante em que o Sol cruza o plano do equador celeste). Durante toda a história, as luzes do norte tiveram vários nomes. Os povos indígenas do norte da América chamavam este fenômeno de “Dança dos Espíritos”. Na Europa, na Idade Média, as auroras eram interpretadas como um sinal de Deus. Elas ocorrem geograficamente num raio de 2500 km, com centro no polo norte. Esta área denominada de zona aureal estende-se sobre o norte da Fino- Escandinávia, Islândia, Groelândia, norte do Canadá, Alasca e sobre a costa norte da Sibéria. O norte da Fino-Escandinávia é o local onde as auroras boreais ocorrem com mais frequência e pela facilidade de acesso a estas zonas tornou-se o destino mais atrativo para observar este fenômeno (MATIAS, Nino Neto, 2012, p.9).

No Sul, a aurora austral (ou luzes do sul) tem características idênticas à aurora boreal e ocorre, em simultâneo às auroras no Norte. As luzes do Sul são visíveis em latitudes altas na Antártica, América do Sul, Nova Zelândia e Austrália. As auroras não são fenômenos exclusivos do nosso planeta pois também são observáveis noutros planetas do sistema solar como Júpiter, Saturno, Marte e Vênus. Da mesma maneira, o fenômeno não é exclusivo da natureza, sendo também reproduzível artificialmente através de explosões nucleares ou em laboratório (MATIAS, Nino Neto, 2012, p.19). Devido ao campo magnético terrestre, as auroras são vistas nas regiões polares, por esse motivo não é possível contemplar esse fenômeno no Brasil, assim como em todos os países tropicais. As partículas solares são mais atraídas em direção à

superfície terrestre onde se encontram mais intensamente as linhas do campo magnético. E por isso que é nessas regiões que acontecem as auroras.

As observações e o estudo das auroras boreais e austrais são facilitados por diferentes métodos e tecnologias, incluindo observações visuais, fotografia, sondas espaciais e telescópios orbitais. Missões como o Juno da NASA e orbitadores em torno de Marte têm fornecido imagens detalhadas das auroras austrais, enquanto observadores terrestres estudam as auroras boreais.

Além de sua beleza espontânea, as auroras boreais e austrais têm significados científicos profundos. Elas fornecem informações valiosas sobre a atmosfera, a magnetosfera e os processos físicos em outros corpos celestes, ajudando os cientistas a entender melhor a evolução e a habitabilidade desse mundo.

Em suma, as auroras são fenômenos celestiais fascinantes que proporcionam conhecimentos únicos sobre a natureza do sistema solar e além. Embora tenham origens semelhantes, suas características e significados variam de acordo com o corpo celeste em que ocorrem. Ao comparar e contrastar esses fenômenos, os cientistas podem expandir nosso entendimento do Universo e da diversidade de seus processos físicos e atmosféricos.

4.3 Fogo de Santelmo: Luz Misteriosa dos Mastros Marítimos

O fenômeno conhecido como fogo de Santelmo, ou “fogo de São Telmo”, é uma manifestação elétrica que ocorre em mastros de navios e pontas de objetos durante tempestades. Analisaremos a fascinante relação entre a eletricidade atmosférica e essas estruturas, investigando como a ionização do ar cria esse fenômeno luminoso que, ao longo da história, foi muitas vezes interpretado como um sinal divino ou presságio.

O fogo de Santelmo (Figura 16) é causado pela ionização do ar em torno dos mastros e das pontas dos mastros das embarcações durante tempestades elétricas. Quando uma descarga elétrica de alta voltagem passa pelo ar, ela pode ionizar as

moléculas de nitrogênio e oxigênio, criando um campo elétrico intenso. Esse campo elétrico pode fazer com que o ar brilhe com uma luz azulada, dando a impressão de que há chamas nos mastros. Esse fenômeno ocorre quando a atmosfera se torna carregada e um potencial elétrico forte o suficiente para causar uma descarga (plasma¹⁰) é criado entre um objeto e o ar em torno dele. Isso pode acontecer com uma aeronave voando pelo céu pesadamente carregado. O “fogo” é normalmente azulado ou violeta, mas também pode ter uma coloração esverdeada (GIORDANI, 2015)

Figura 16 - Fogo de Santelmo



Fonte: Google.

De acordo com a tradição marítima, o fogo de Santelmo recebe seu nome em homenagem a São Telmo, o santo padroeiro dos marinheiros. Acredita-se que São Telmo, cujo nome real era Pedro González Telmo (1190-1246), tenha sido um bispo espanhol do século XIII. Diz a lenda que, durante uma tempestade particularmente violenta, São Telmo apareceu para os marinheiros como uma luz azulada nos mastros do navio, oferecendo proteção divina contra os perigos do mar (JONES, Jordan, p.157, 2021).

Os marinheiros observam o espetáculo há milhares de anos, mas só no último século e meio (início do século XXI até o presente) é que os cientistas aprenderam o suficiente sobre a estrutura da matéria para compreenderem porque o fenômeno

¹⁰O plasma é conhecido como o quarto estado físico da matéria. Trata-se de um gás ionizado, ou seja, um gás cujas moléculas tiveram seus elétrons arrancados.

ocorre. Não são deuses ou santos que acendem o fogo enigmático, mas um dos cinco estados da matéria (o plasma). Uma compreensão científica desse fenômeno só se tornou possível depois que o químico e físico britânico William Crookes (1832-1919) produziu o que chamou de “matéria radiante” por meio de seu trabalho com tubos de vácuo em 1879. Descobrir que os átomos continham partículas carregadas menores revelou-se essencial para compreender porque é que a matéria de Crookes brilhava, lançando todo um novo campo da física dos plasmas. Os plasmas ocorrem quando o excesso de energia quebra os átomos de um gás neutro para criar um gás carregado (METSUL.COM, 2023).

Durante tempestades elétricas, a separação de cargas na atmosfera cria campos elétricos significativos, que podem induzir a ionização do ar próximo a objetos pontiagudos. Essa ionização resulta na formação de plasma que emite luz visível na faixa do espectro azul ou branco. Durante uma tempestade, o atrito acumula elétrons extras em certas partes das nuvens, gerando poderosos campos elétricos que atingem o solo. Um campo forte o suficiente pode teoricamente gerar plasmas em qualquer lugar, mas na prática, pontas afiadas (como o mastro de um navio ou o “bico” de um avião) tendem a concentrar o campo, retirando elétrons dos átomos para deixar para trás íons carregados em números especialmente elevados perto de pontos afiados. Depois que o ar ao redor de um mastro se transforma parcialmente em plasma, o fogo de Santelmo brilha por meio de um processo chamado descarga corona. À medida que o campo elétrico espalha os elétrons, eles batem nas partículas neutras e agitam essas partículas neutras para um estado mais energético (METSUL.COM, 2023).

Ao longo da história, o fogo de São Telmo foi interpretado de várias maneiras. Para os marinheiros da era das grandes navegações (séculos XV e XVI), era visto como um sinal de proteção divina em meio às tempestades do oceano. No entanto, também era temido como um presságio de tragédias iminentes. Hoje, o fenômeno é entendido como o efeito natural da eletricidade atmosférica, mas ainda mantém seu lugar no folclore marítimo como um símbolo de esperança e superação (JONES, Jordan, p.157, 2021).

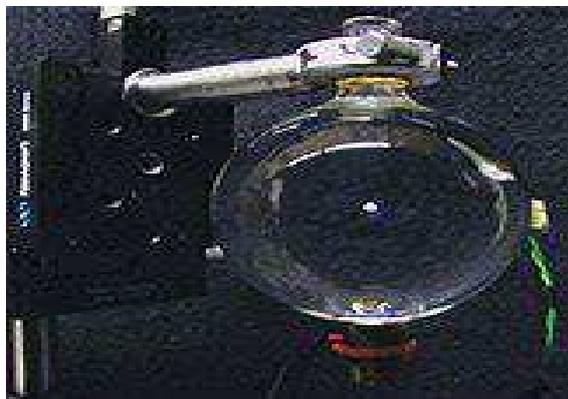
Portanto, o fogo de Santelmo é caracterizado pela aparição de uma luz azulada ao redor de pontos aguçados em meio às condições atmosféricas turbulentas. Esta luz é acompanhada de um leve zumbido ou chiado, e pode se manifestar de forma intermitente ou contínua, dependendo das condições do ambiente. A intensidade e duração do fenômeno variam de acordo com a magnitude do campo elétrico presente e a geometria dos objetos envolvidos.

Apesar dos avanços na compreensão científica do fogo de Santelmo, ele ainda é um fenômeno raro e espetacular de se testemunhar. Com o advento da fotografia e do vídeo, os relatos visuais do fogo de Santelmo se tornaram mais comuns, permitindo que as pessoas ao redor do mundo apreciem sua beleza única. No entanto, mesmo com toda nossa tecnologia moderna, o fogo de Santelmo continua a inspirar reverência e admiração, lembrando-nos da imprevisibilidade e da majestade dos elementos naturais.

4.4 Sonoluminescência: Luz nas Profundezas do Mistério

A sonoluminescência (Figura 17) é um fenômeno físico fascinante que envolve a conversão de energia sonora em energia luminosa que acontece em bolhas de gás em líquidos submetidos a ultrassom. Então, vamos explorar os mecanismos subjacentes e as implicações desse fenômeno elétrico.

Figura 17 - Fenômeno da sonoluminescência observado em laboratório



Fonte: Google.

Esse fenômeno complexo ocorre em escalas microscópicas. Quando uma bolha de gás em um líquido é submetida a ondas sonoras intensas, resultando em uma rápida concentração e expansão da bolha. Esse processo cria condições extremas dentro da bolha, incluindo temperaturas e pressões elevadas. A energia acumulada durante a compressão é liberada na forma de luz quando a bolha colapsa. De acordo com Aaron Levinson, citado por Abreu (2002, p.2) “a sonoluminescência foi descoberta em 1934 por dois físicos alemães, H. Frenzel e H. Schultes, na Universidade de Colônia”. Eles colocaram um transdutor ¹¹ de ultrassom em um tanque com revelador de fotografia. Eles esperavam acelerar o processo de revelação, em vez disso, eles notaram minúsculos pontos luminosos na película e perceberam que a luz era proveniente das bolhas que se formam no fluido quando ultrassom estava ligado. Atribuíram os resultados à luminescência do campo sonoro. Assim o fenômeno foi chamado de sonoluminescência. Foi muito difícil analisar este efeito nessas experiências pioneiras devido à dificuldade de se acompanhar a formação de um grande número de bolhas que se desfaziam rapidamente no tanque de revelação.

Segundo Abreu (2002, p.2) “o modo de sonoluminescência descoberto envolvia múltiplas bolhas em um meio (que no caso era a água), foi chamado de sonoluminescência de múltiplas bolhas (multi-bubbles sonoluminescence)”. Os mecanismos envolvidos na sonoluminescência de múltiplas bolhas são pouco entendidos pois estão associados ao crescimento e ao colapso aleatório de várias bolhas. Até recentemente, o estudo da sonoluminescência estava limitado a uma análise em que os resultados eram médias temporais das medidas dos efeitos da sonoluminescência de múltiplas bolhas.

De acordo com Jin Yamamoto, citado por Abreu (2002, p.2), “em 1988, um importante avanço no estudo da sonoluminescência aconteceu quando D. F. Gaitan, na época trabalhando na Universidade do Mississippi, descobriu as condições para a sonoluminescência de uma única bolha na água”. Este modo de sonoluminescência

¹¹ O transdutor é um dispositivo que transforma um tipo de energia em outro.

foi batizado de sonoluminescência de bolha única (single-bubble sonoluminescence) em oposição a sonoluminescência de múltiplas bolhas. A descoberta da sonoluminescência de uma única bolha permitiu um exame mais detalhado e consistente da física envolvida no fenômeno. Contudo, uma explicação completa do fenômeno de sonoluminescência ainda está por ser encontrada.

Vários processos físicos estão envolvidos na sonoluminescência, incluindo a cavitação acústica, onde as bolhas de gás são formadas e submetidas a pressões sonoras intensas. Durante o colapso da bolha, a temperatura e a pressão aumentam rapidamente, criando condições favoráveis para a emissão de luz.

De acordo com Abreu (2002, p.5), “A sonoluminescência exhibe uma física inacreditável”, onde o mesmo descreve alguns números associados ao fenômeno citados por outros autores:

Segundo S. J. Putterman (1995), citado por Abreu (2002, p.5):

- Cada pulso de luz dura menos que 50 picosegundos (5×10^{-11} s). Como referência, neste tempo a luz atravessa uma distância de 1,5 cm. Para estabelecer este limite superior, cientistas da Universidade da Califórnia (UCLA) utilizaram as mais rápidas fotomultiplicadoras disponíveis.
- Os pulsos de luz emitidos são extremamente regulares. O tempo entre dois flashes consecutivos, que é de 40 μ s para uma frequência de excitação de 25 kHz, não apresenta variação maior do que 40 ps. Este nível de precisão e estabilidade excede em muito a precisão do gerador de sinal utilizando. Por exemplo, se cada pulso de luz tivesse duração de 1 segundo um pulso seria emitido a cada 800.000 s ou 9 dias, com uma variação de apenas 1 segundo; isto é, cada pulso seria emitido a um intervalo de tempo que poderia variar entre 799.999 e 800.001 s.
- Gases nobres exibem um efeito significativo sobre o fenômeno de sonoluminescência. Por exemplo, a intensidade luminosa emitida por uma bolha formada de nitrogênio puro (N_2) é muito menor que aquela emitida por uma bolha com ar, que contém cerca de 1% de argônio dissolvido. Porém, a adição de 1% de argônio (Ar) na bolha de N_2 faz com que a intensidade da luz emitida seja comparável com aquela emitida por uma bolha de ar. Resultados similares foram obtidos com He e Xe, e cada tipo de gás apresenta um espectro diferente. Ainda não se sabe porque a adição do gás nobre afeta significativamente a sonoluminescência.

De acordo com Robert Hiller et al. (1992) e Bradley P. Barber et al. (1994), citado por Abreu (2002, p.5):

- A temperatura da água utilizada também apresenta um efeito significativo na intensidade da luz emitida. Quando a temperatura da água diminui de 40°C para 1°C, a intensidade das emissões aumenta de um fator 200. A 1°C a intensidade da luz é tão forte que pode ser vista mesmo na presença de iluminação externa. Contudo, a 40°C é bastante difícil ver a luz, mesmo em um quarto escuro.

Ademais, segundo Thomas J. Matias et al. (1995), citado por Abreu (2002, p.5):

- O espectro da "single-bubble sonoluminescence" é bastante suave, diferente do apresentado por "multi-bubbles sonoluminescence", que contém linhas espectrais bem definidas que são características do líquido em que o processo ocorre.
- O espectro de "single-bubble sonoluminescence" é bem ajustado por uma curva de corpo negro. A temperatura estimada pelo ajuste chega a 30.000 K. O espectro indica também, a maior parte da luz emitida está na região do ultravioleta. Como a água em volta da bolha absorve fótons com energias maiores que 6 eV (que correspondem ao comprimento de onda do ultravioleta, ou seja, 200 nm), o espectro completo da sonoluminescência não pode ser determinado.

Existem várias teorias que buscam explicar o processo da luz emitida durante o processo de sonoluminescência (luz emitida durante a cavitação¹² de bolhas em líquidos sujeitos a ultrassom). Uma delas é a hipótese da compressão adiabática, que sugere que a rápida compressão e aquecimento da bolha durante a cavitação resulta em temperaturas e pressões extremamente altas, levando a emissão da luz.

Outra teoria é a formação de plasmas transientes dentro da bolha colapsada. Durante o colapso da bolha, os elétrons podem ser arrancados dos átomos, formando um plasma altamente energético que emite luz ao recombinar-se. Além disso, a teoria da radiação de bremsstrahlung¹³ postula que os elétrons acelerados dentro da bolha em colapso emitem radiação eletromagnética devido à desaceleração abrupta, resultante na emissão de luz visível.

Segundo S. J. Putterman (1995) e Aaron Levison, citado por Abreu (2002, p.7):

¹² Cavitação é dado ao fenômeno físico de vaporização de um líquido e que consiste na formação de bolhas de vapor pela redução da pressão durante seu movimento.

¹³ O bremsstrahlung é a radiação eletromagnética produzida pela aceleração ou desaceleração de uma partícula carregada quando desviada por campos magnéticos ou outra partícula carregada.

- Quando a bolha colapsa devido ao bombardeamento da onda sonora, ondas de choque esféricas são criadas. A temperatura, de aproximadamente 1.000.000°C, e pressão resultantes, maior que milhares de vezes a pressão atmosférica, fazem com que o gás no interior das bolhas se transforme em um plasma, que emite luz. Esta teoria é proposta por um grupo de pesquisa da Universidade da Califórnia (UCLA) liderado por Seth J. Putterman.

De acordo com Aaron Levinson, citado por Abreu (2002, p.7):

- As ondas de choque, formadas com o colapso da bolha, induzem colisões entre as moléculas neutras do gás contido em seu interior, produzindo luz e atingindo temperaturas entre 10.000°C e 20.000°C. Esta teoria é sugerida por Lothar Frommhold da Universidade do Texas e Anthony Atchley da Naval Postgraduate School.
- Ao invés de ondas de choque, as oscilações da bolha injetam pequenos jatos de líquido eletricamente carregados em seu interior, produzindo luz. Esta teoria é sugerida por Theiry Lepoint e sua equipe do Instituto Meurice em Bruxelas, Bélgica.
- A alta pressão dentro da bolha faz com que a água ao seu redor congele, e a luz é produzida quando o gelo se quebra. Esta teoria foi proposta por Robert Hichling da Universidade do Mississippi.

Ademais, segundo Claudia Eberlein, (1996), citado por Abreu (2002, p.8):

- A teoria quântica de campos prevê (efeito Unruh) a conversão de “fótons virtuais” no vácuo em fótons reais (que apresentam uma distribuição de energias de um corpo negro) quando um espelho é acelerado no vácuo. A diferença no índice de refração entre a água e a superfície da bolha age como um espelho, convertendo fótons virtuais em fótons reais, quando se move devido a contração e expansão da bolha. Esta teoria é proposta por Claudia Eberlein, da Universidade de Illinois, e Urbana-Champaign da Universidade de Cambridge.

Embora a sonoluminescência seja um fenômeno intrigante, suas aplicações práticas ainda estão em estágio inicial. No entanto, ela possui potencial em áreas como a física do plasma, a síntese de materiais avançados e a medicina. No entanto, apesar dessas teorias, o mecanismo exato por trás da sonoluminescência ainda não foi totalmente compreendido, e pesquisas contínuas são necessárias para elucidar completamente esse fenômeno intrigante.

A sonoluminescência é um fenômeno elétrico fascinante que continua a desafiar nossa compreensão. Seu estudo não apenas amplia nosso conhecimento

sobre os princípios fundamentais da física, mas também oferece perspectivas emocionantes para o desenvolvimento de novas tecnologias e aplicações.

4.5 Triboluminescências: Luz a partir do Atrito Terrestre

A triboluminescência nos levará a explorar como o simples ato de quebrar materiais pode gerar luz. Este fenômeno, observado em materiais como cristais e açúcares, revela as propriedades luminescentes que surgem durante processos de ruptura molecular. Vamos explorar as bases científicas por trás desse intrigante espetáculo de luz gerado pelo simples ato de quebrar estruturas materiais.

De acordo com Echeverrigaray (2018, p18):

A triboluminescência é definida pela emissão de radiação eletromagnética (luz) devido ao atrito de dois sólidos. Durante o processo de atrito, várias espécies energéticas podem ser emitidas das superfícies em contato, dentre elas encontram-se elétrons, íons positivos e negativos, fótons, radicais e moléculas.

Esse fenômeno tem sido observado em uma variedade de materiais, incluindo cristais de açúcar, quartzos, diamantes e alguns polímeros. A compreensão desse fenômeno remonta a séculos, mas sua explicação detalhada só foi possível com os avanços na ciência dos materiais e na investigação de fenômenos físicos em escalas microscópicas. A Figura 18 apresenta o fenômeno de triboluminescência em diamantes, que ao esfregá-lo ou cortá-lo podemos produzir luz.

Figura 18 - Triboluminescência em diamantes



Fonte: Google.

O processo de triboluminescência envolve a geração de cargas elétricas através da quebra de ligações químicas durante a deformação do material. Quando as ligações são rompidas, os elétrons são liberados e, ao recombinarem-se, emitem luz visível. Além disso, a fricção entre as superfícies pode gerar calor, o que também contribui para a emissão de luz.

Segundo Andrew DeMiglio, citado por Cruz (2017, p.1):

Este fenômeno foi observado pela primeira vez no Colorado, EUA, por tribos indígenas durante os seus rituais de dança, quando da utilização de maracas – instrumento musical – feitas de pele de búfalo com cristais de quartzo no seu interior. Estes cristais emitiam luz ao serem friccionados uns contra os outros.

No século XVII, o cientista inglês Francis Bacon (1561-1626), documentou sistematicamente esse fenômeno, quando ao moer açúcar observou a radiação.

O espectro de luz produzido pela triboluminescência do açúcar é o mesmo dos relâmpagos. Em ambos os casos, a energia elétrica reage com moléculas de nitrogênio no ar. Ao esfregar os cristais de açúcar, cargas positivas e negativas se acumulam, o que acaba fazendo com que elétrons sejam liberados à medida que cristais se quebram e excitam os elétrons nas moléculas de nitrogênio (KAULEN, Maria, 2014).

A triboluminescência apresenta várias características distintas que a tornam um fenômeno único e digno de estudo. Uma dessas características é sua dependência da natureza do material em questão. Nem todos os materiais exibem triboluminescência e, mesmo entre aqueles que o fazem, as propriedades da luz emitida podem variar significativamente. Alguns materiais emitem luz visível, enquanto outros emitem luz ultravioleta ou mesmo infravermelha.

Outra característica importante desse fenômeno é sua sensibilidade a diferentes condições ambientais, como temperatura e pressão. Variações nessas condições podem afetar a intensidade e a duração da emissão de luz, que sugere a existência de mecanismos complexos por trás do fenômeno.

Apesar de não ser completamente compreendida, a triboluminescência é amplamente atribuída a um processo conhecido como “excitação mecânica”. Quando um material é submetido a tensões mecânicas, como fricção, compressão ou quebra, ocorrem rearranjos na estrutura molecular do material. Esses rearranjos resultam na separação de cargas elétricas, gerando um campo elétrico temporário (YOUR PHYSICIST, 2024).

Vários mecanismos foram propostos para explicar a ocorrência desse fenômeno, e é provável que múltiplos processos estejam envolvidos, dependendo do material e das condições específicas. Entre os mecanismos mais estudados estão:

- **Separação de cargas:** A fricção ou compressão de certos materiais pode levar à separação de cargas elétricas, criando regiões com excesso de elétrons e regiões com deficiência de elétrons. Quando essas cargas são recombinadas, ocorre a emissão de luz.
- **Formação de centros emissores:** Durante o processo de deformação do material, podem ser formados centros emissores de luz, como defeitos estruturais ou imperfeições na rede cristalina. Esses centros podem ser ativados pela energia mecânica aplicada, resultando na emissão de luz.
- **Reações químicas:** Em alguns casos a fricção entre os materiais pode induzir reações químicas que levam, a emissão de luz. Essas reações podem envolver a quebra de ligações químicas e a formação de espécies excitadas que emitem fótons ao retornar a seu estado fundamental.

Embora esse fenômeno tenha sido objeto de estudo por muitos anos, suas aplicações práticas ainda estão sendo exploradas. No entanto, algumas áreas onde o fenômeno pode ter potencial aplicação incluem:

- **Detecção de falhas:** a capacidade da triboluminescência de detectar microfraturas e defeitos estruturais em materiais pode ser explorada

para aplicações em controle de qualidade e manutenção de equipamentos.

- Sinalização e iluminação: A triboluminescência pode ser utilizada em sistemas de sinalização e iluminação de emergência, especialmente, em ambientes onde a presença de eletricidade não é viável.
- Sensores de pressão: Sensores baseados nesse fenômeno podem ser desenvolvidos para medir variações de pressão em diversas aplicações, como em dispositivos médicos e sistemas de segurança.

Em suma, a triboluminescência é um fenômeno elétrico intrigante que continua a despertar interesse e curiosidade na comunidade científica. Embora muito tenha sido descoberto sobre suas características e mecanismos subjacentes, ainda há muito a ser explorado em termos de suas aplicações potenciais e implicações para diversas áreas da ciência e da tecnologia. O estudo contínuo desse fenômeno pode levar a avanços significativos em campos como a ciência dos materiais, física e engenharia.

4.6 Raios Cósmicos visuais: Mensageiros Luminosos do Universo.

Raios cósmicos visuais são partículas de alta energia que colidem com a atmosfera terrestre, criando exibições luminosas no céu noturno. Investigaremos como esses raios cósmicos interagem com os gases atmosféricos, gerando luz visível e expandindo nosso entendimento sobre a interconexão entre o Cosmos e a Terra.

Os raios cósmicos visuais (Figura 19) são flashes de luz extremamente rápidos e intensos que ocorrem na atmosfera superior da Terra, resultantes da interação de partículas de alta energia com moléculas de ar. Esses eventos, também conhecidos como “flashes ópticos de raios cósmicos”, foram observados pela primeira vez por acaso por astronautas e pilotos de aeronaves.

Figura 19 - Raios cósmicos



Fonte: Google.

De acordo com CABRAL, Raphaella Bahia Soares et al. (2022, p.2),

Os raios cósmicos são compostos 90% por prótons, 9% por partículas alfa, constituídas de dois prótons e dois nêutrons, que formam um núcleo de hélio (4He), e 1% por núcleos de elementos pesados que produzem novas partículas subatômicas ao interagirem com a atmosfera. Após a descoberta desses raios, foi constatado que eles se movem com velocidade, aproximadamente, igual à velocidade da luz, percorrem trajetórias aleatórias e são detectados com energia da ordem de 10^{20} eV.

Segundo OLIVEIRA, A. G.; ROCKENBACH, M.; PACINI, A. A (2014, p.2), “a descoberta dos raios cósmicos é atribuída a Victor Hess (1883 – 1964) que, por meio de experimentos com balões, notou que o fluxo de radiação ionizante, até então associada a radiatividade ambiente do solo, se intensificava com o aumento da altitude”. Ele esperava encontrar uma diminuição na radiação conforme a altitude aumentasse, devido à absorção pelos gases atmosféricos. Essa descoberta contradizia as expectativas da época (século XX), e levou Hess a concluir que a fonte da radiação ionizante não estava na Terra, mas sim no espaço sideral.

Segundo DAL LAGO, Alisson; SCHUCH, Nelson Jorge (p.27), os raios cósmicos podem ser divididos em duas categorias principais com base em sua origem e energia:

I. Raios cósmicos primários: São as partículas de alta energia, advindas de supernovas, estrelas de nêutrons e de buracos negros. Essas partículas sofrem a modulação heliosférica, podendo ser originadas em três locais diferentes: no centro da galáxia, no Sol e na heliosfera através da interação de partículas neutras do gás interestelar com o vento solar. Essas partículas incluem prótons, neutrinos, elétrons, pósitrons e núcleos atômicos pesados.

II. Raios cósmicos secundários: São partículas resultantes da interação dos raios cósmicos primários com a atmosfera terrestre. Essas interações produzem uma cascata de partículas secundárias, como mésons, neutrinos, múons e elétrons, que também contribuem para a radiação cósmica que atinge a superfície da Terra.

De acordo com DAL LAGO, Alisson; SCHUCH, Nelson Jorge (p.28), os raios cósmicos primários se subdividem:

- Raios Cósmicos Galácticos (Galactic Cosmic Rays, GCR) são oriundos de fora do sistema solar, mas geralmente de dentro da Via Láctea. Os GCRs são núcleos atômicos dos quais os elétrons circunvizinhos foram acelerados durante a passagem em alta velocidade pela galáxia. Aproximadamente 90% dos raios cósmicos são núcleos de hidrogênio (prótons), 9% é composto por núcleos de hélio (partículas α) e apenas 1% de outros elementos mais pesados.
- Raios Cósmicos Solares (Solar Cosmic Rays, SCR) são originários do Sol, algumas vezes bastante intensos, associados às explosões solares (Flares). A intensidade dos raios cósmicos retorna ao seu nível normal dentro de dezenas de minutos até alguns dias. Os SCR possuem aproximadamente a mesma composição que os GCR: aproximadamente 89% de prótons, 10% de partículas alfa e 1% de elementos mais pesados, mas com uma energia variando de algumas centenas de MeV até alguns GeV.
- Raios Cósmicos Anômalos (Anomalous Cosmic Rays, ACR) são originários do espaço interestelar além da Heliopausa. Diferem dos RCG por apresentarem em sua composição uma porcentagem superior de hélio (partículas Alfa).

Segundo PADILHA, Luana Natalie et al., “os raios cósmicos são partículas carregadas com velocidades próximas à da luz, produzidas em fenômenos de escalas cósmicas em objetos astronômicos, que podem ser galácticos ou extragalácticos”. Os raios cósmicos galácticos são originários da Via Láctea, enquanto os raios cósmicos extragalácticos têm origem em outras galáxias. Ambos consistem, principalmente, em núcleos atômicos, mas os extragalácticos tendem a ter energias ainda mais altas do que os galácticos.

Os raios cósmicos desempenham um papel significativo em processos geofísicos, incluindo a formação de nuvens, a produção de radiação de fundo, e a indução de correntes elétricas na atmosfera e na superfície terrestre. Além disso, eles são responsáveis pela produção de isótopos radioativos na atmosfera, que podem ser utilizados em datação geológica e estudos climáticos.

Em suma, os raios cósmicos representam um fenómeno elétrico complexo, cujo estudo é essencial para entender a física de alta energia, a astrofísica e os processos geofísicos. Avanços contínuos na detecção e análise de raios cósmicos prometem fornecer conhecimentos valiosos sobre a natureza do Universo e seu impacto na Terra.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, exploramos a fascinante jornada da eletricidade, através de alguns dos principais marcos e pensadores que moldaram a compreensão e aplicação da eletricidade ao longo dos séculos, desde os primórdios das observações de cargas estáticas até as aplicações modernas em tecnologias avançadas. Ao compreender os marcos históricos, os principais cientistas e as descobertas fundamentais, podemos apreciar como a eletricidade moldou o mundo e continuará a desempenhar um papel crucial no futuro da civilização. Este estudo nos leva a refletir sobre a importância do conhecimento científico e da inovação tecnológica para impulsionar o progresso humano. Ao final deste trabalho, podemos concluir que fenômenos elétricos são uma parte essencial para nossa compreensão do mundo natural e têm aplicações não só na física, mas em diversos campos. No decorrer do trabalho, exploramos os princípios fundamentais por trás de alguns fenômenos elétricos, desde seu conceito até a eletricidade dinâmica por trás de cada fenômeno. Ao encerrar este trabalho, reconhecemos a complexidade e a beleza dos fenômenos elétricos estudados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAGÃO, José Maria Sacadura. **História da Física**. Rio de Janeiro-ed: Interciência, 2006.

ABREU, N. P. de. **Projeto de F809 Sonoluminescência: Relatório final**. Disponível em: https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2002/992264-relatoriofinal1.pdf. Acesso em: 01/03/2024

ASSIS, A. K. T. **Os fundamentos experimentais e históricos da eletricidade** Apeiron Montreal, 2010.

ANDRADE, M. M. **Introdução à metodologia do trabalho científico: elaboração de trabalhos na graduação**. São Paulo, SP: Atlas, 2010.

BORTOLIN, E.; GALVANI, E. **DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E O OLHAR GEOGRÁFICO: ESTUDO DE CASO DAS OCORRÊNCIAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (SÃO PAULO) E IMPLICAÇÕES NA SOCIEDADE**. Entre-Lugar, Dourados, MS, v.8, n.16, 2017 - ISSN 2176-9559 227.

CABRAL, R. B. S. et al. A câmara de nuvens como estratégia pedagógica para o ensino de raios cósmicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, p. e20210397, 2022.

CRUZ, M. F. T. de Eloy. **Desenvolvimento de uma fonte de raios-X baseada no princípio da triboluminescência**. 2017. Disponível em: Cruz_2017.pdf (unl.pt). Acesso em: 03/03/2024.

DAL LAGO, A.; SCHUCH, N. J. Estudo de estruturas interplanetárias utilizando observações de satélites e observações de raios cósmicos.

DATHEIN, R. Inovação e Revoluções Industriais: uma apresentação das mudanças tecnológicas determinantes nos séculos XVIII e XIX. **Publicações DECON Textos Didáticos**, v. 2/ 2003, DECON/UFRGS, Porto Alegre, fevereiro 2003.

ECHEVERRIGARAY, F. G. **INTERAÇÕES DE VAN DER WAALS NA SUPERLUBRICIDADE DE FILMES NANOESTRUTURADOS E HIDROGENADOS**. Tese de doutorado. Caxias do sul, 2018. Disponível em: Tese Fernando Graniero Echeverrigaray.pdf (ucs.br).

EXTERKOETTER, G., MANOEL, J. A. **Análise de desempenho de uma linha de transmissão frente a descargas atmosféricas**. Tubarão, 2020.

ELAT- **Grupo de Eletricidade Atmosférica- INEP**. Disponível em: <https://www.bing.com/search?q=rel%c3%a2mpagos+ascendentes+e+descendentes&FORM=AWRE#>. Acesso em:13/02/2024

GIORDANI. **Fogo de Santelmo**. CAVOK: Assas da informação; 2015. Disponível em: Fogo de Santelmo (cavok.com.br). Acesso em: 29/02/2024.

IZERROUGENE, B. **Inovação tecnológica e ciclo econômico em perspectiva histórica**. 2013. REVISTA Soc. Bras. Economia Política, São Paulo, nº 35, p. 71-92, junho 2013. Disponível em: <https://revistasep.org.br/index.php/SEP/article/view/11/68>. Acesso em: 25/12/2023.

JONES, J. **Chamas reveladoras: O fogo de Santelmo e outros fenômenos naturais na literatura portuguesa de viagens**. E-LETRAS COM VIDA — N.º 7 JULHO/DEZEMBRO DE 2021: pp. 156-168.

KAULEN, M. **Tribolumescência**. 2014 Disponível em: <https://www.por.talastronomico.com/author/mkaulen/>. Acesso em: 03/03/2024.

MACGORMAN, D. R.; RUST, W. D. **Electrical Nature of Storms**. New York, USA: Oxford University Press, 1998.

MEDEIROS, D. da S. F.; SOUSA, P. V. S.; SABA, M. M. F. **A física dos relâmpagos – Uma sequência didática referenciada na aprendizagem significativa de Ausubel**, Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 13, No. 1, março 2019.

MATIAS, N. N. **Aurora Borealis arctic observatory ARCH medium student competitions**. Tese de Doutorado. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.6/2363>.

METSUL.COM. **Pilotos registram fogo de Santelmo antes do furacão Idália**. Disponível em: <https://metsul.com/pilotos-registram-fogo-de-santelmo-antes-do-furacao-idalia-veja-video/>. Acesso em: 29/02/2024.

NACCARATO, K. P. **Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do Sistema de Localização de Tempestades**. 2001. 165p. (INPE-8380- TDI/770). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2001. Disponível na biblioteca digital URLib: <http://mtc-m05.sid.inpe.br:80/rep-/dpi.inpe.br/lise/2002/03.28.19.09>. Acesso em: 13/01/ 2024.

NACCARATO, K. P. **Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil**, INPE São José dos Campos 2006.

NASA-Global Hydrology and Climate Center (GHCG). Disponível em: <http://thunder.msfc.nasa.gov/>. Acesso em: 25/01/2024.

OLIVEIRA, A. G.; ROCKENBACH, M.; PACINI, A. A. Raios cósmicos e a heliosfera. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, p. 1-13, 2014.

PULICI, A. R.; MELO, M. de. **Terrella**. REVISTA UNIFERV ciências & tecnologias. v.2 N.2 (2017).

PADILHA, L. N. et al. **Objeto central compacto como fonte de raios cósmicos**. 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

ROBORTELLA, Avelino Edson. Mecânica. Vol.1, ed. Ática, 1984.

ROCHA, J. F. M. Origem e evolução do eletromagnetismo. In: ROCHA, J. F.M. **Origens e evolução das ideias da Física**. Salvador: Edufba, 2002. p. 185-280

SILVA, C. C.; PIMENTEL, A. C. Uma análise da história da eletricidade presente em livros didáticos: o caso de Benjamin Franklin. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 25, n. 1, p. 141-159, 2008.

SOUZA, R. Raios, relâmpagos e trovões. **Universidade Federal do Pará**, 2010.

SALLES, A. C. R. A aurora boreal como atrativo turístico: o processo de apropriação turística de fenômenos naturais. SGT. Trabalhos de conclusão de curso – Niterói. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/13565>. Acesso em: 25/02/2024.

VIEIRA, K. D. F.; COSTA, L. S.; SILVA, A. F. da. **A ação dos ventos solares na formação das auroras boreais e austrais**. 2016.

YOUR PHYSICIST. **Como funciona a triboluminescência**, 2024. Disponível em: Como funciona a triboluminescência (your-physicist.com). Acesso em:04/03/2024.