

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
CURSO DE FÍSICA LICENCIATURA**

IVAN SCHWICKERT

MEDIDAS DE PROTEÇÃO EM EXPERIÊNCIAS DIDÁTICAS COM ELETRICIDADE

**CERRO LARGO
2024**

IVAN SCHWICKERT

MEDIDAS DE PROTEÇÃO EM EXPERIÊNCIAS DIDÁTICAS COM ELETRICIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em física da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de licenciado em física.

Orientador: Prof. Dr. Thiago de Cacio Luchese

CERRO LARGO

2024

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Schwickert, Ivan

Medidas de proteção em experiências didáticas com
eletricidade / Ivan Schwickert. -- 2024.
48 f.:il.

Orientador: Doutor Thiago de Cacio Luchese

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Licenciatura em Física, Cerro Largo, RS, 2024.

1. Efeitos da eletricidade no corpo humano. 2.
Experimentação didática com eletricidade. 3. Medidas de
proteção. I. Luchese, Thiago de Cacio, orient. II.
Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

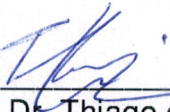
IVAN SCHWICKERT

MEDIDAS DE PROTEÇÃO EM EXPERIÊNCIAS DIDÁTICAS COM ELETRICIDADE

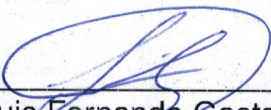
Trabalho de conclusão de curso apresentada ao curso de física licenciatura da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) como requisito para obtenção do grau de licenciado em física

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 11/12/2024

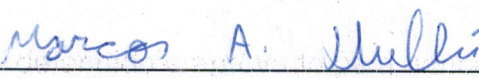
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Thiago de Cacio Iuchese – UFFS
Orientadora



Prof. Dr. Luis Fernando Gastaldo – UFFS
Avaliador



Prof. Dr. Marcos Alexandre Dullius – UFFS
Avaliador

Prof. Dr. Ney Sodre dos Santos – UFFS
Suplente

Dedico este trabalho a todos que acreditaram em meu potencial e me incentivaram a seguir em frente, mesmo nos momentos mais desafiadores. À minha família, pela constante motivação e apoio incondicional, e aos meus professores, que, com sabedoria e dedicação, me orientaram e me ajudaram a crescer. Este trabalho é uma pequena expressão de minha gratidão por tudo o que recebi e aprendi ao longo dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente a todos que me apoiaram nesta jornada de aprendizado e crescimento. Aos meus professores, por compartilharem seu conhecimento e inspiração, aos meus colegas, por seu apoio constante, e à minha família, por sua paciência e confiança. Este trabalho reflete não apenas meu esforço, mas o impacto de todos que contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal. Sou imensamente grato por cada momento, cada desafio e cada aprendizado que me trouxeram até aqui.

O objetivo da educação não é o de encher a mente dos alunos com informações, mas de ajudá-los a aprender a pensar. É criar a curiosidade e o desejo de buscar mais conhecimento. É a busca constante por respostas e, ao mesmo tempo, a habilidade de aceitar que as perguntas podem ser mais importantes do que as respostas. Cada passo dado no processo de aprendizagem é uma transformação pessoal, e a verdadeira educação acontece quando se desperta a capacidade de questionar, refletir e construir. Aquele que ensina está, de fato, aprendendo tanto quanto aquele que aprende, e essa troca, muitas vezes invisível, é a que realmente move a humanidade para frente." – Albert Einstein

RESUMO

O estudo aborda a utilização de experimentos didáticos de eletricidade e magnetismo em ambientes educacionais tendo como objetivo principal dar ênfase aos riscos e medidas de proteção a serem adotadas na realização dos mesmos. O método de investigação foi a descrição conceitual e análise prática de grandezas como tensão, corrente, frequência e tempo de exposição para compreender suas correlações e efeitos sobre o corpo humano. De posse dessas informações são sugeridas medidas práticas para minimizar os riscos do trabalho com eletricidade, tanto em sala de aula quanto em nosso dia a dia. Como aplicação prática do estudo desenvolvido, dá-se atenção especial ao uso didático de bobinas de Tesla, apontando as diferenças entre dois modelos distintos de bobinas e suas características específicas e evidenciando que um equipamento potencialmente perigoso, quando devidamente arquitetado, torna-se inofensivo. Por fim, o trabalho ressalta a importância da adoção de boas práticas, como a regra do uso de uma mão, o emprego de equipamentos de proteção individual e coletiva, e a remodelagem de dispositivos para torná-los menos perigosos; destaca-se a necessidade de integrar esses princípios de proteção na formação docente inicial com a finalidade de capacitar os educadores à realização experimentos com eletricidade de forma segura e eficaz.

Palavras-chave: segurança em experimentos; ensino de eletricidade; bobina de Tesla.

ABSTRACT

The study addresses the use of educational experiments in electricity and magnetism within educational settings, with the primary goal of emphasizing the risks involved and the protective measures to be adopted during their execution. The investigative method involved the conceptual description and practical analysis of variables such as voltage, current, frequency, and exposure time to understand their correlations and effects on the human body. Based on this information, practical measures are suggested to minimize the risks associated with working with electricity, both in classrooms and in everyday life. As a practical application of the developed study, special attention is given to the educational use of Tesla coils, highlighting the differences between two distinct coil models and their specific characteristics, demonstrating that potentially hazardous equipment, when properly designed, can become harmless. Finally, the study underscores the importance of adopting best practices, such as the one-hand rule, the use of personal and collective protective equipment, and the redesign of devices to make them less dangerous. It also highlights the need to integrate these protective principles into initial teacher training programs to equip educators with the skills to safely and effectively conduct electrical experiments.

Keywords: experiment safety; teaching electricity; Tesla coil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Percepção de corrente contínua	18
Figura 02 – Percepção de corrente alternada	20
Figura 03 – Corrente de escape	23
Figura 04 – Percepção de correntes em frequências distintas.....	25
Figura 05 – Sensação de dor (qualitativo) em função da frequência, para uma corrente fixa.....	26
Figura 06 – Ilustração da passagem de corrente elétrica pelo tórax	31
Figura 07 – Apresentação dos valores perceptíveis e nocivos de corrente incidida no corpo humano	32
Figura 08 – Experimento montado com a bobina do laboratório	39
Figura 09 – Experimento montado com a bobina comprada	39
Figura 10 – Frequência do pulso da bobina do laboratório, registrado pelo osciloscópio.....	40
Figura 11 – Frequência do pulso da bobina comprada, registrado pelo osciloscópio	40

LISTA DE SIGLAS

NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
EPI	Equipamento de Proteção Individual
EPC	Equipamento de Proteção Coletiva
DR	Disjuntor Residual

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	SEGURANÇA NO USO DE ELETRICIDADE	14
2.1	O QUE É UM CHOQUE ELÉTRICO	15
2.2	QUAIS AS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS EM UM CHOQUE?.....	16
2.2.1	O tipo de corrente elétrica.....	16
2.2.1.1	<i>A corrente contínua.....</i>	<i>16</i>
2.2.1.2	<i>A corrente alternada</i>	<i>17</i>
2.2.2	A resistência elétrica	19
2.2.3	A tensão elétrica	20
2.2.4	A corrente elétrica	21
2.2.5	A frequência	23
2.2.6	O tempo de exposição.....	25
2.2.6.1	<i>Longo período.....</i>	<i>26</i>
2.2.6.2	<i>Curto período</i>	<i>26</i>
2.3	O QUE SÓ CAUSA DOR E O QUE PODE SER LETAL?.....	27
2.3.1	O que só causa dor?.....	27
2.3.2	O que pode ser letal?.....	28
2.4	QUAIS OS VALORES SEGUROS?	31
2.5	CONCLUSÃO	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
3	ANÁLISE DE EXPERIMENTO	38
3.1	MAS O QUE PODE SER ESTIPULADO A PARTIR DESSES VALORES?	41
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
5	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

O ensino de eletricidade e magnetismo, seja em nível básico ou superior, geralmente traz consigo uma grande carga de abstração. No entanto, apesar de os conceitos teóricos que levam à descrição da fenomenologia eletromagnética serem assim tão abstratos, algumas experiências com eletricidade são chamativas e simples, possibilitando um ambiente de ensino-aprendizagem significativo e interativo em sala de aula.

Desse modo, a abordagem de sistemas elétricos se utilizando de experimentos em sala de aula mostra-se como instrumento de ensino de grande importância para o desenvolvimento das ideias propostas em teoria. Apesar disso, é muito comum o receio de professores em realizar experiências com eletricidade, seja nas salas de aula de escolas ou nos laboratórios das universidades, o que talvez seja associado a uma lacuna na formação desses profissionais e que, naturalmente, os leva a optar pela segurança acima de qualquer ferramenta didática, por mais bem sucedida que ela talvez seja.

Alguns exemplos de proteção excessiva são o pedido para que aqueles que tem marcapasso se ausentem de experiências com o gerador de Van de Graaff ou, então, impedir que um aluno curioso receba a descarga elétrica de uma pequena (tensão de trabalho menor que...) bobina de Tesla. Claro que, na dúvida, é melhor prevenir. Mas quem não se encanta com uma simulação minúscula de um raio? De modo que se faz clara uma deficiência no entendimento dos reais perigos e das precauções a serem tomadas durante o desenvolvimento de atividades práticas envolvendo eletricidade e magnetismo.

Sendo assim, o principal objetivo desse trabalho é suprir algumas informações básicas a um professor de Física quanto às normas de segurança e aos possíveis riscos envolvidos no manuseio prático de sistemas elétricos em sala de aula, para que esse possa se utilizar da curiosidade natural de seus alunos como motivador de aprendizagem sem ter um receio excessivo. A pergunta que guiou o desenvolvimento do trabalho foi: “existe *uma única* grandeza física associada ao grau de periculosidade de um choque?”

A metodologia adotada para alcançar esse objetivo foi a pesquisa por dados e experimentos que justifiquem determinada atitude de segurança na utilização de

alguns experimentos comuns. Também buscamos esclarecer alguns mitos a respeito da periculosidade dessas atividades.

Para facilitar e organizar a exposição dos riscos e medidas de segurança no uso da eletricidade em sala de aula, mostra-se conveniente a separação de algumas grandezas comuns dessas experiências, seus efeitos sobre o corpo humano e como estar seguro de uma exposição indevida a elas: a tensão, a resistência, a corrente, o tempo de exposição e a frequência (em sinais alternados). Espera-se que o trabalho evidencie quando a eletricidade é perigosa e facilite a tomada de decisão quanto às medidas de segurança na realização de experiências didáticas.

Para finalizar o trabalho, apresentamos um equipamento gerador de alta tensão, seu funcionamento e montagem, e sugerimos o seu uso em sala de aula com as medidas de segurança apropriadas.

2 SEGURANÇA NO USO DE ELETRICIDADE

Desde o início do curso de licenciatura em Física sempre foi comum a adoção de algumas práticas de segurança um tanto peculiares (talvez até exageradas) quando se tratava de experimentos que envolvam a eletricidade, tanto durante as práticas de ensino em sala de aula quanto nas práticas em laboratório. Exemplos marcantes dizem respeito ao uso do Gerador de Van de Graaff ou da bobina de Tesla: era solicitado que estudantes com uso de marcapasso se mantivessem afastados do equipamento (uma medida protetiva exagerada) e, além disso, por vezes se utilizava o Gerador de Van de Graaff sem que o estudante estivesse sob o devido isolamento elétrico (um erro conceitual-prático). Talvez por conta da falta de conhecimento prático com relação à real periculosidade desses experimentos foram adotadas medidas exageradas de proteção (o que dá pra entender pois, em se tratando de proteção é melhor errar pelo excesso!) às custas de propagação de medo de eletricidade e perda de uma apresentação envolvente e didática dos conceitos envolvidos.

Por conta do interesse pessoal em eletricidade, após experimentos que envolviam esse tema eu fazia, por conta própria, pesquisas a respeito de possíveis aprimoramentos na realização das mesmas atividades didáticas quando da prática profissional. Citando novamente o Van de Graaff como exemplo, após seu uso em sala de aula aprendi que a pessoa que encosta no gerador para receber a carga e “levantar os cabelos” deve estar devidamente isolada do solo pois, embora a sola dos calçados seja um material isolante para tensões da ordem de centenas de volts, não o é para as dezenas (até centenas) de milhares de volts produzidos pelo gerador. Esse aprendizado foi levado ao laboratório e melhorou significativamente as práticas didáticas com o equipamento.

Essas pesquisas evidenciaram que um dos perigos mais evidentes de experimentos com eletricidade está na possibilidade de choque elétrico, que nada mais é que o estabelecimento de um fluxo (contínuo ou alternado) de cargas através do corpo e que pode ter consequências bastante diversificadas, desde um leve beliscão na região de fluxo até a queimadura de órgãos internos e a eventual fatalidade (o medo de eletricidade não é à toa!). No entanto, o uso de equipamentos de proteção individual (EPI) ou coletiva (EPC) pode mitigar esse perigo, além de que, por vezes, algumas mudanças na arquitetura de um experimento podem, também, torná-lo menos perigoso.

Desse modo, trataremos com um pouco mais de detalhe o choque elétrico e seus riscos e, nesse tratamento, veremos as grandezas a serem consideradas ao optar pelas medidas de segurança durante a aplicação de alguma atividade envolvendo eletricidade.

2.1 O QUE É UM CHOQUE ELÉTRICO

A presença ou não de um sistema nervoso nos seres vivos é tão relevante que acaba, de certa forma, sendo utilizado para classificação desses. A função desse sistema é a captação e processamento de estímulos, externos ou internos ao ser vivo, e a devida devolução em resposta aos mesmos. Todo esse processo de recepção, processamento e resposta se dá por meio de sinais elétricos que percorrem o sistema nervoso, de modo que pode-se entender que o interior de um ser vivo que possui sistema nervoso seja um bom condutor de eletricidade.

Apesar de a eletricidade estar presente e em contínuo uso em cada indivíduo vivo possuidor de um sistema nervoso, com o avanço das civilizações iniciou-se e instaurou-se o uso da eletricidade no cotidiano dos seres humanos. O uso de equipamentos elétricos, de modo geral, tem tornado a vida mais confortável: lâmpadas para iluminação de ambientes, geladeiras para a conservação de alimentos, chuveiro para banho quente, entre muitos e muitos outros. A maioria desses equipamentos é de fácil utilização mas, sendo fácil ou não seu uso, todos são conectados (pelo menos em algum momento) a uma rede de energia que quando apresenta alguma falha de isolamento elétrico pode acarretar em uma fuga de corrente para o corpo do usuário e gerar o chamado choque elétrico (FISH, GUEDES, 2024).

O choque elétrico se refere à passagem de determinada quantidade de corrente elétrica através do corpo do indivíduo, algo que em baixas tensões não é perceptível devido à alta resistência elétrica da pele humana, o que impede o trânsito de elétrons em um potencial diminuto. Contudo, pela própria natureza elétrica do corpo humano, se o mesmo for exposto a tensões mais elevadas como as de uma tomada residencial (cerca de 220 V), a passagem de corrente elétrica passa a ser perceptível pelo nosso sistema nervoso (choque) e ativar involuntariamente o sistema muscular.

Ocorre que todo material isolante possui uma propriedade chamada rigidez dielétrica: a máxima tensão elétrica que o material pode suportar, a cada unidade de comprimento do material, sem que esse venha a se tornar condutor. Sendo a nossa

pele um isolante, ela também tem uma determinada rigidez dielétrica, de modo que, quando submetida a altas tensões, deixa de ser eficaz no isolamento do sistema nervoso em relação ao exterior do corpo e, conseqüentemente, sentimos a passagem de corrente pelo corpo, ou seja: sentimos o choque! (Desde que a corrente seja superior a um certo limiar de sensibilidade.)

Os efeitos dos choques elétricos no corpo humano podem ser muito variados. Em algumas situações correspondem a leves puxões ou beliscões enquanto em outras podem causar a morte por fibrilação ventricular (quando o coração deixa de pulsar de maneira rítmica e começa a trepidar, impedindo assim o fluxo sanguíneo pelo corpo) ou por paralisia nas musculaturas responsáveis pela respiração (gerando morte por asfixia).

Dada essa diversidade de conseqüências de choques elétricos, como quantificar o que é relevante para proteção no uso de eletricidade? Veremos algumas das grandezas envolvidas em um choque elétrico, no que segue, com a finalidade de subsidiar uma resposta adequada e aplicável em sala de aula a essa pergunta.

2.2 QUAIS AS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS EM UM CHOQUE?

Considerando a origem histórica do uso da eletricidade no dia a dia, a batalha das correntes mais apropriadas para transmissão que foi travada entre Thomas Eddison - que afirmava que era a contínua - e Nikola Tesla - que afirmava ser a alternada a melhor alternativa - no início do século XX, começaremos a análise das variáveis envolvidas em um choque elétrico especificando o que são esses dois tipos de corrente. Em seguida abordaremos outras grandezas de interesse para entendimento e proteção contra choques elétricos.

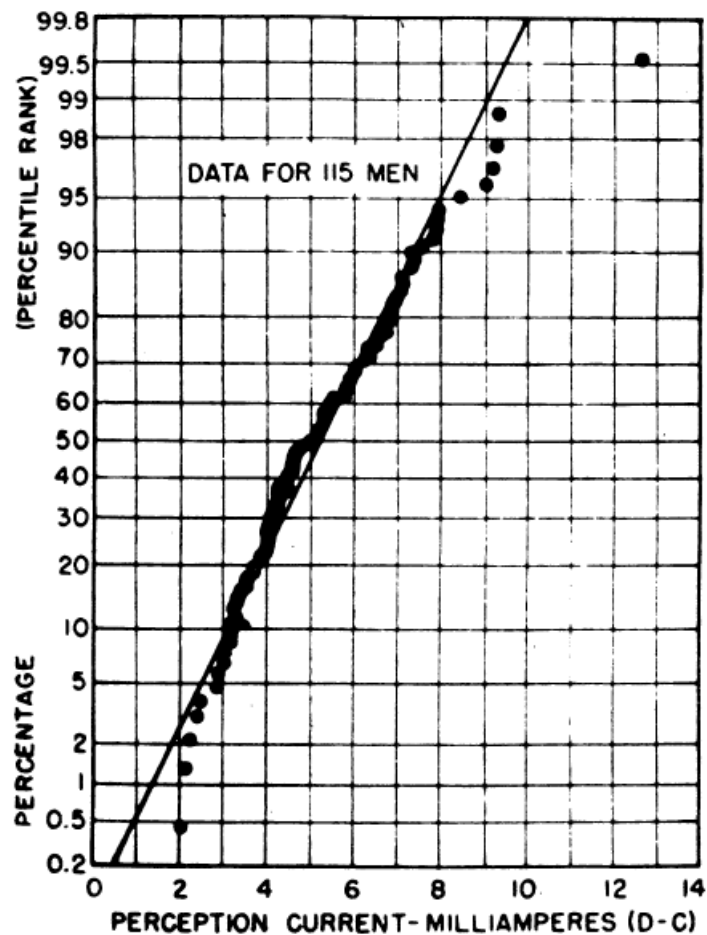
2.2.1 O tipo de corrente elétrica

2.2.1.1 A corrente contínua

A corrente contínua corresponde a um fluxo unidirecional de cargas através de um elemento condutor. Em se tratando do corpo humano sob choque elétrico, esse tipo de corrente gera espasmos musculares fixos, tendo um efeito semelhante ao de uma câimbra. Análises experimentais ministradas por Charles F. Dalziel (DALZIEL, 1956) durante a segunda guerra mundial mostraram que é notada uma menor

sensibilidade do corpo humano ao ser percorrido por correntes dessa natureza. As Figuras 01 e 02 mostram os resultados desse pesquisador que permitem comparar a sensibilidade do corpo humano quando submetido aos diferentes tipos de corrente.

Figura 01: Percepção de corrente contínua



Na vertical temos a porcentagem de percepção da corrente fluindo pelo corpo do indivíduo, na horizontal o respectivo valor da corrente incidida. Nesse caso corrente contínua

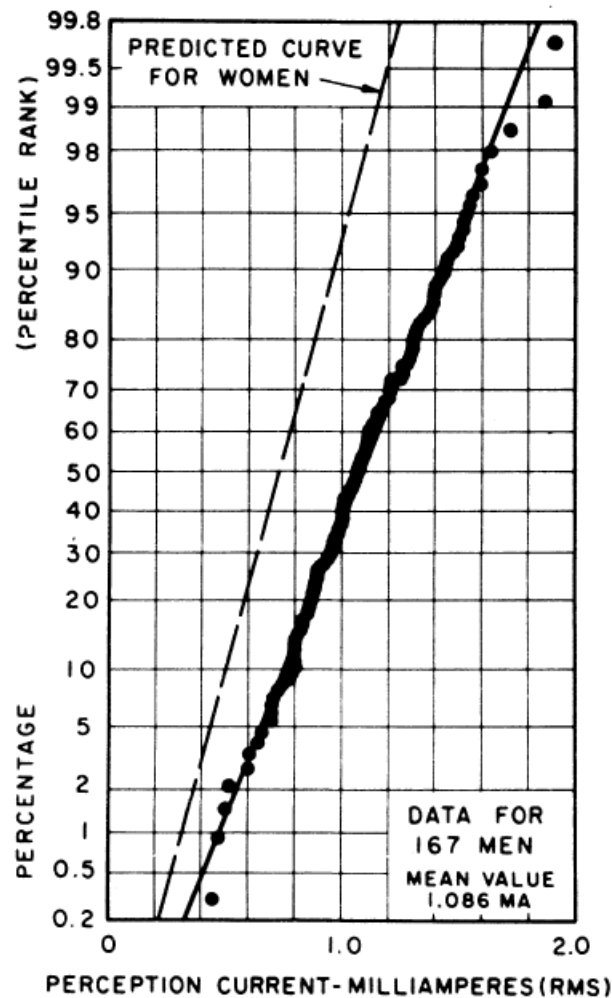
Fonte: Dalziel (1956) página 48

2.2.1.2 A corrente alternada

A corrente alternada corresponde a um fluxo alternado, de “vai-e-vem”, das cargas através de um condutor. A sensibilidade humana ao choque em corrente alternada é ligeiramente diminuída em comparação à corrente contínua, resultando

na necessidade de uma maior intensidade corrente para tornar o choque perceptível ao sistema nervoso. Por se tratar de um fluxo de elétrons que alterna sua direção no decorrer do tempo, costuma apresentar, além de espasmos musculares involuntários, uma sensação de formigamento. A frequência da corrente alternada pode variar muito, desde dezenas até milhões de vezes por segundo. Essas análises realizadas por Charles F. Dalziel (DALZIEL, 1956) com o estudo dos efeitos da corrente alternada foram fundamentais para a proposição de um limite de corrente suportado pelo corpo humano, sendo possível assim tornar os ambientes que possuem circuitos com esse tipo de corrente menos perigosos ao adotar, ao longo do tempo, diferentes métodos que dificultam o contato direto com a eletricidade ao se utilizar qualquer equipamento doméstico.

Figura 02: Percepção de corrente alternada (60 Hz)



O gráfico apresenta na vertical a porcentagem de percepção da corrente fluindo pelo corpo do indivíduo e, na horizontal, o respectivo valor da corrente incidida. Em tracejado temos a previsão de sensibilidade para mulheres.

Fonte: Dalziel (1956) página 48

2.2.2 A resistência elétrica

A resistência elétrica é a variável que dita o quão difícil é a passagem da corrente elétrica por um corpo, ele sendo classificado como um bom (baixa resistência) ou mau condutor (alta resistência) de eletricidade. A resistência elétrica é uma das variáveis que nos leva a quantificar e entender um pouco sobre a possibilidade e intensidade de um choque elétrico ocorrer em uma pessoa. Em se tratando da pele humana, que protege nosso organismo do meio externo, sua

resistência não possui um valor fixo, apresentando dependência com o nível de umidade presente nela. Tanto há áreas da pele que naturalmente possuem uma menor resistência elétrica, como a língua (bastante úmida), quanto na cútis externa que, quando seca, apresenta características isolantes, permitindo a passagem de corrente elétrica apenas quando a tensão for superior à sua rigidez dielétrica (Raymond R. Fish). Outro fator que influencia na resistência da pele é a real área de contato entre a pele e o condutor, algo observável em alguns métodos terapêuticos que se utilizam de eletrodos de determinada área de contato com a pele capaz de tornar possível a passagem de uma corrente diminuta, tornando possível a realização de movimentos involuntários mesmo sem se ter a umidade influenciando na redução da resistência elétrica da pele.

2.2.3 A tensão elétrica

A tensão elétrica consiste na diferença de potencial elétrico entre dois pontos, que representa a energia disponível para impulsionar os elétrons de uma região de maior potencial para outra de menor potencial através de um material (seja ele bom ou mau condutor). É um parâmetro fundamental para se determinar medidas de segurança de alguma operação que envolva a eletricidade, visto que tensões baixas, como as de uma bateria de 12v, não apresentam nenhum efeito perceptível no nosso corpo. Já tensões mais elevadas, como das tomadas (220v) ou das baterias de um carro elétrico (até 650v), já tornam seu manuseio mais perigoso. Nessas tensões e acima delas pode-se ter como resultado, no melhor dos casos, leves espasmos musculares e queimaduras, mesmo que as correntes sejam muito baixas. Especificamente a eletricidade em automóveis foi estudada por (KRZYSZTOF JANKOWSKI, ANDRZEJ ZBROWSKI), uma vez que esse tipo de sistema tem apresentado grande demanda nos últimos anos e apresentam características bastante distintas da alimentação elétrica tradicional em construções.

Em resumo, a corrente elétrica é a grandeza que quantifica o fluxo de cargas em um material, a tensão elétrica é a energia por unidade de carga responsável por produzir essa movimentação de cargas e a resistência elétrica é a dificuldade que o material exibe ao estabelecimento desse movimento em seu interior (lembrando que os elétrons são os constituintes de toda matéria ordinária de nosso dia a dia). Essas

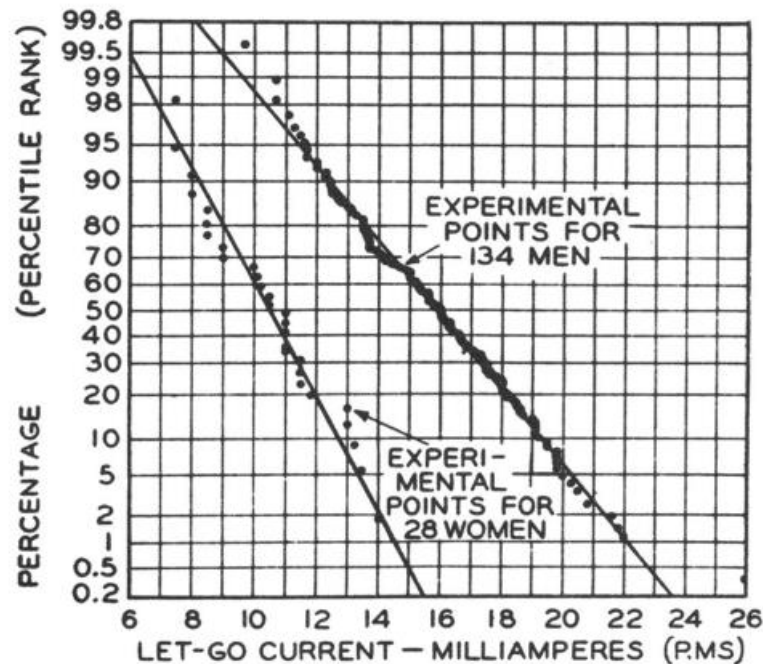
três variáveis (corrente, tensão e resistência) permitem determinar a potência total de descarga energética sobre o corpo.

2.2.4 Os efeitos da corrente elétrica em humanos

De posse dos conceitos de corrente contínua e alternada, resistência e potencial elétrico, é possível voltarmos a tratar dos choques elétricos.

Como nossos sistemas nervoso e muscular funcionam com impulsos elétricos que necessitam de correntes muito baixas, qualquer corrente levemente considerável (da ordem de mA) que chegue a adentrar nosso corpo é capaz de gerar algumas alterações no mesmo. Por exemplo, correntes pouco intensas, da ordem de 1 mA, geram apenas alguns espasmos musculares leves. Já correntes um pouco mais elevadas, da ordem de 20 mA, fazem com que os espasmos musculares sejam tão intensos que impedem o controle dos movimentos na região sob choque (onde está passando a corrente). Chega-se assim à chamada corrente limite de fuga (aquela que impede o movimento voluntário) e onde correntes superiores a esse limite são capazes de imobilizar o indivíduo a ponto de este necessitar de ajuda para conseguir se libertar da situação de choque elétrico. A Figura 03 representa o percentual de controle muscular de homens e mulheres quando submetidos a determinados níveis de corrente alternada de 60Hz. Nota-se que, conforme ocorre o aumento da corrente incidida diminui-se a possibilidade de movimentos voluntários nos músculos afetados.

Figura 03: Corrente de escape



O gráfico apresenta na vertical a possibilidade de movimentação voluntária dos músculos, e na horizontal, a corrente alternada aplicada.

Fonte: Dalziel (1956) página 50

Além das variáveis físicas inerentes ao estabelecimento da corrente no corpo (o choque elétrico) há os agravantes associados ao caminho percorrido pela corrente no corpo.

Caso a região afetada por um choque elétrico englobe o coração (por exemplo, um choque envolvendo as extremidades do tórax), tendo intensidade de corrente da ordem de 100 mA, então pode ocorrer a fibrilação ventricular, que é uma arritmia severa nos ventrículos do coração, impedindo-o de cumprir seu papel de bombear sangue pelo corpo. Caso essa arritmia severa não seja revertida rapidamente pode haver sequelas graves, com danos cerebrais irreversíveis e até mesmo a morte.

Quando a região submetida à passagem de corrente oferece muito baixa resistência pode ocorrer o estabelecimento de uma grande intensidade de corrente (da ordem de alguns Amperes). Nesse caso, além do desconforto muscular devido ao choque, podem ocorrer sérias queimaduras nos órgãos internos devido ao efeito Joule (dissipação da energia elétrica na forma térmica). Se a região sob essas condições englobar o coração, além da fibrilação ventricular e das queimaduras internas, pode ocorrer a paralisia respiratória temporária, o que inviabiliza a oxigenação do corpo e

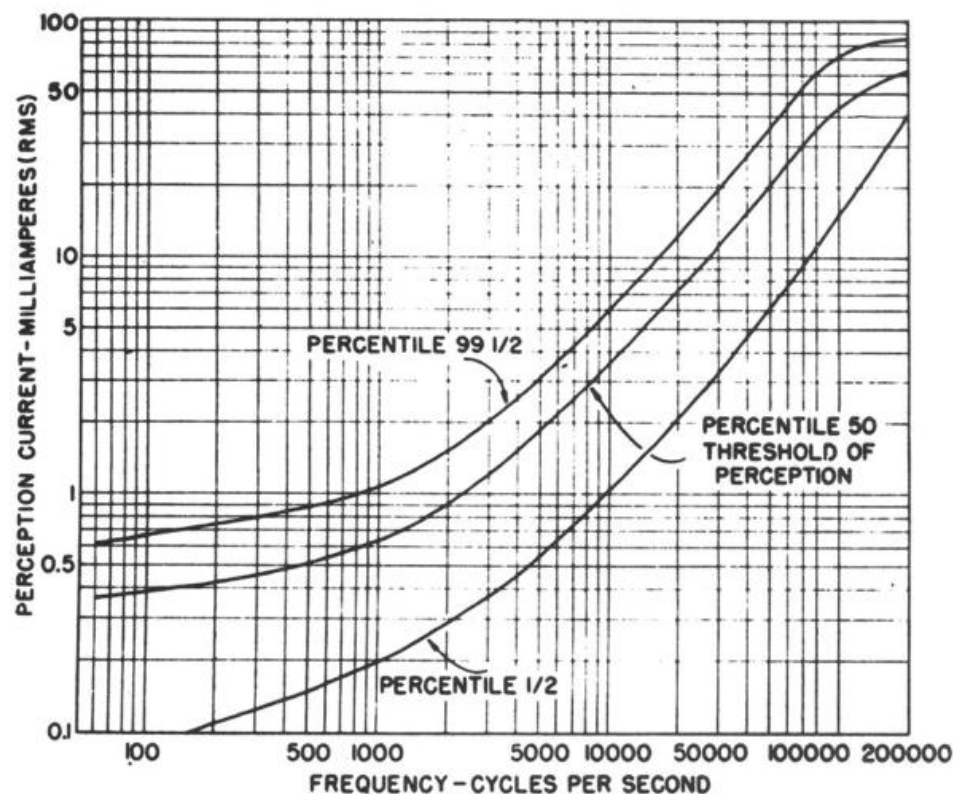
acarreta em sequelas severas (até mesmo a morte) caso a condição persista por alguns minutos. (Vale lembrar que grandes correntes podem significar grandes potências, que, por sua vez, podem significar grandes aquecimentos e grandes queimaduras (MAYERHOFF, 2005). A pele, por ser a parte mais resistente do caminho que está sendo tratado hipoteticamente, muitas vezes é completamente carbonizada nos pontos de entrada e saída da corrente no corpo, sendo o restante das queimaduras internas ao corpo).

2.2.5 A frequência

Em se tratando da corrente alternada, existe outro fator que pode contribuir para a sensibilidade à passagem da eletricidade pelo nosso corpo: a frequência de alternância na tensão elétrica. Em nosso cotidiano essa frequência está entre 50 Hz ou 60 Hz, dependendo do período em que determinado país ou região global teve instalada sua primeira rede de distribuição elétrica. No Brasil a Lei nº 4.454 padroniza a frequência de 60 Hz em todo território nacional.

A sensibilidade ao choque alternado é reduzida à medida que há um aumento na frequência da tensão aplicada. A Figura 04 mostra os resultados obtidos por Dalziel (DALZIEL, 1956) em relação a corrente de percepção como função da frequência e evidencia que frequências mais altas exigem de fato correntes mais intensas para serem perceptíveis ao sistema nervoso.

Figura 04: Percepção de correntes em frequências distintas

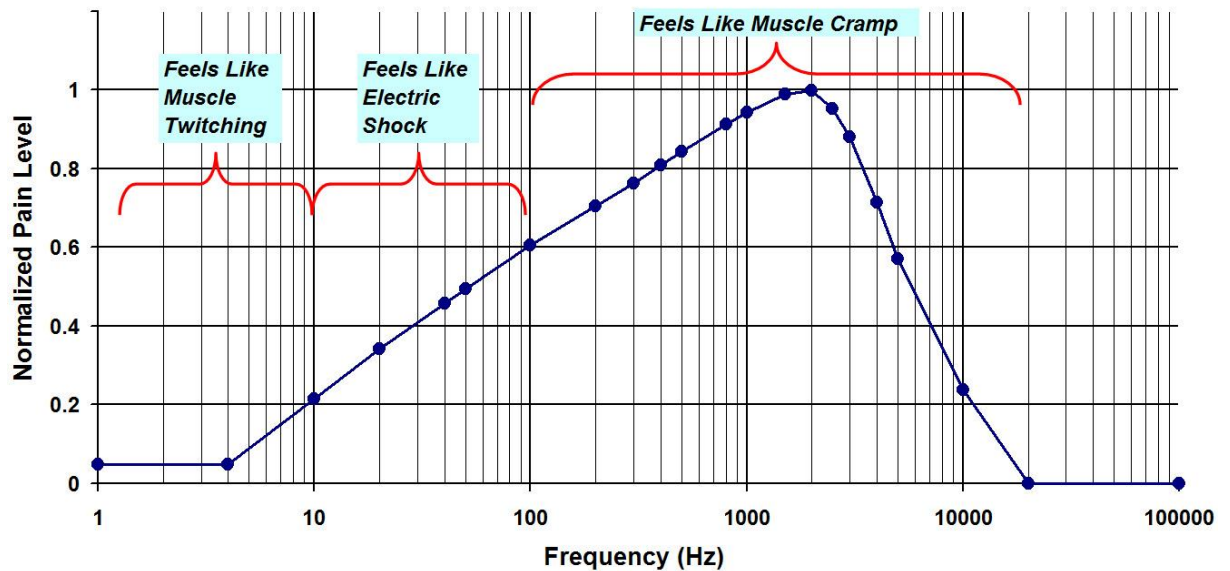


Na vertical temos a corrente de percepção, na horizontal a frequência desse sinal. Correntes essas sendo perceptíveis definitivamente apenas acima da curva dos 99½% de percepção.

Fonte: Dalziel (1956) página 49

Alguns autores de conteúdo para internet afirmam que essa sensibilidade corresponde analogamente à nossa capacidade auditiva (visto que ouvimos uma faixa que engloba desde os 20 Hz até os 20 kHz). Para citar um exemplo, o youtuber do canal Electroboom realizou um experimento intitulado “Dor x Frequência” no qual, utilizando eletrodos em sua língua, foi capaz de gesticular o nível de dor sentida por ele conforme era aumentada a frequência da corrente que era induzida em sua língua. Os resultados dessa experiência semiquantitativa são apresentados na Figura 05. Vale notar que o referido teste foi realizado com uma corrente fixa, ou seja, não levando em consideração a diminuição da sensibilidade do sistema nervoso à corrente elétrica nele incidida.

Figura 05: Sensação de dor (qualitativo) em função da frequência, para uma corrente fixa.



Fonte: www.electroboom.com/?p=688, acesso em 12/12/2024

Outro experimento similar foi realizado durante os anos 50 por Charles F. Dalziel (DALZIEL, 1956) o qual, diferentemente de Electroboom, levou em consideração o aumento da corrente junto do aumento da frequência, o que resultou em dados mais precisos a respeito dessa sensibilidade, como visto na figura 7 do artigo. Com seus dados sobre sensibilidade em função da frequência, é possível notar que alguns experimentos perigosos em baixas frequências podem se tornar menos perigosos se realizados de mesma forma, porém, com um aumento da frequência de seu sinal. Esse fato foi registrado em vídeo pelo youtuber do canal Styropyro que, ao ser atingido por um raio proveniente de uma bobina de Tesla de tamanho médio foi submetido a uma descarga elétrica cuja intensidade de corrente era de 3A em uma tensão (alternada) de centenas de milhares de Volts sem sofrer dano algum, apenas devido ao fato de que sua bobina de Tesla fornecia sua energia com frequência na ordem dos MHz (megahertz) para operar e produzir os belos arcos voltaicos de descargas elétricas (efeito corona).

2.2.6 O tempo de exposição

Ainda outro fator relevante na análise da possível periculosidade da exposição a um choque elétrico é o tempo de exposição ao mesmo, fator esse já comentado

superficialmente. Um choque pode ser classificado, quanto ao tempo real de exposição, em dois grandes grupos:

2.2.6.1 Longo período

Um deles trata de exposições da ordem de segundos, ou dezenas de segundos. Nesses casos, seja a corrente baixa ou mediana, pode acarretar em letalidade. Isso ocorre devido às dificuldades de mobilidade, à possível ocorrência de fibrilação ventricular ou paralisia temporária da respiração, além das possíveis queimaduras internas às quais o indivíduo eletrocutado estará submetido. Com isso, a exposição a elevadas correntes por longos períodos (dezenas de segundos) pode ser fatal. Para prevenir esse tipo de fatalidade, pode-se instalar um disjuntor residual (DR) na central de distribuição de energia das residências ou ambientes de trabalho. Esses disjuntores, ao detectarem uma fuga residual de corrente superior a 30 mA em um circuito, abrem o mesmo (desarme do DR) para evitar possíveis danos aos seus usuários (WEG, 2024).

2.2.6.2 Curto período

Outro trata de exposições ultracurtas, da ordem de microssegundos ou menos. Nesses casos, até mesmo uma exposição a correntes que poderiam ser letais, em casos de longa exposição, passam a ser inofensivas, uma vez que essas exposições pulsadas tem paralelo qualitativo às correntes de altas frequências vistas anteriormente. Essa equivalência ocorre ao comparar o período de uma onda de alta frequência com a exposição a um sinal contínuo de corrente em um período muito curto, similar ao do tempo necessário para completar um ciclo de onda em alta frequência. Alguns youtubers exploram essa situação também, como o do canal Vidduley que, ao medir a corrente gerada por um gerador de Van de Graaff, conseguiu determinar que as correntes ali envolvidas não podem ser consideradas diminutas, visto que, conforme calculadas por ele, excedem a ordem dos amperes. Correntes nessa intensidade geradas por tensões de mais de 200 kV são sem dúvida letais em longos tempos de exposição, porém, ao serem propagadas em pulsos de tempo na casa dos nanossegundos, mesmo tendo potências na ordem dos MW, ainda assim são pouco nocivas, capazes de gerar apenas leves espasmos musculares ou leves queimaduras, nada mais.

As variáveis descritas, isoladamente, não indicam ou representam qualquer risco. Determinadas combinações podem acarretar em uma experiência positiva, como a realização de experimentos didáticos seguros e a adoção de eletricidade como método de tratamento para determinadas enfermidades. Além disso, existem sistemas que impedem a exposição danosa à eletricidade, como disjuntores DR e os EPIs e EPCs.

2.3 O QUE SÓ CAUSA DOR E O QUE PODE SER LETAL?

2.3.1 O que só causa dor?

Com uma análise breve das principais grandezas envolvidas em um choque elétrico, vem à tona a necessidade de explicitar os valores dessas grandezas que oferecem risco real.

No que se refere a uma percepção da presença de uma corrente elétrica no nosso corpo, há certa diferença entre as correntes contínua e alternada, onde a corrente contínua necessita de uma corrente que varia entre 2 e 10 miliamperes para se tornar perceptível, enquanto para a corrente alternada esse valor abrange correntes de 0,1 a 2 miliamperes, significativamente menor. Outra característica marcante da percepção da corrente alternada fluindo pelo corpo é a diferença de sensibilidade entre homens e mulheres. Dalziel (DALZIEL, 1956) estipula que mulheres são sensíveis a 2/3 da corrente que os homens percebem, o que sugere alguma diferença fisiológica entre os sexos na reação à passagem de corrente elétrica.

Esse intervalo no qual a corrente elétrica apenas causa dor se estende até a dita “corrente de escape”, que se refere aos valores nos quais há uma contração muscular involuntária tão intensa, decorrente dessa descarga elétrica, que não mais é possível largar o objeto eletrificado. Por conta disso se estipula um limite, ou limiar, entre apenas dor e a eventual fatalidade possível. Essa corrente de escape também é distinta entre homens e mulheres, onde mulheres já não conseguem “escapar” de correntes na ordem dos 15 miliamperes, já homens conseguem se mover voluntariamente com correntes de até 23 miliamperes percorrendo seus músculos. (valores esses experimentais).

Outra variável importante a ser considerada experimentalmente é a frequência. Visto que no nosso cotidiano estamos expostos raramente a frequências superiores a

60hz, não seria necessário levar em consideração essa variável. Porém, alguns experimentos didáticos que envolvem alta tensão podem ser perigosos se realizados com frequências muito baixas, visto que com tensões mais elevadas, a resistência a passagem da corrente pelo organismo se torna menor, acarretando assim em possíveis letalidades, mesmo lidando com energias pequenas, como alguns watts de potência apenas, que já podem ser fatais.

Algo que também muitas vezes não é considerado é o próprio tempo de exposição a uma diferença de potencial mesmo diminuta, que por se tratar de corrente fluindo por um mau condutor, acarreta na conversão dessa energia elétrica em calor por efeito joule. Esse calor incidido sobre a pele pode produzir desde leves queimaduras a até lesões severas capazes de gerar a necrose da área afetada. Essa necrose consiste na morte das células do tecido que foi submetido à diferença de potencial por um determinado período.

Vale também mencionar a diferença de resistência da pele que pode variar tanto conforme o local atingido, como um choque na pele do braço ou da língua, quanto conforme ao estado de umidade da região atingida, como pele seca ou molhada. Tendo em vista que o descontrole muscular com a pele seca necessita de tensões mais altas, beirando os 100 V, isso é atenuado ao se realizar ou se submeter ao mesmo teste com a pele molhada, onde as tensões perigosas são reduzidas mais da metade daquele feito com a pele seca, beirando os 20 V.

2.3.2 O que pode ser letal?

Com a análise anterior constatamos os valores não letais do possível choque elétrico. Agora, aumentando consideravelmente as correntes incididas no corpo humano, principalmente na região torácica, podemos, a partir dos estudos realizados por Dalziel (DALZIEL, 1956), constatar que:

a) A resistência elétrica da pele for diminuta o suficiente para permitir a passagem de uma maior quantidade de corrente, algo devido principalmente por conta de a pele humana não ser um condutor ideal, ou seja, não “obedecendo” a lei de ohm, se comportando assim como um resistor não ôhmico. Por conta disso e de outros fatores, como a possível chegada ao ponto de quebra da rigidez dielétrica da pele, essa redução de resistência da pele consiste em um dos principais causadores da possível letalidade de uma descarga elétrica (STYROPYRO, 2023).

b) A frequência da senoide que compõe a corrente alternada incidida continua sendo desprezível no cotidiano, porém, no âmbito experimental passa a ser um possível instrumento de mitigação dessa periculosidade envolvendo descargas de maior escala no corpo humano. Isso se dá por conta da necessidade de maiores correntes necessárias para que haja contração muscular em altas frequências, o contrário também se aplica.

c) Agora é a corrente quem dita as regras do jogo, visto que é ela a responsável pela possível penetração e interação fisiológica dos órgãos mais internos do corpo, tornando assim sua presença possivelmente letal, não por conta das possíveis queimaduras que ocorrerão mas, principalmente, pela possibilidade de fibrilação ventricular que pode se dar, inicialmente, com correntes de cerca de 90 miliampères para corrente contínua e 23 miliampères para corrente alternada. Desses valores em diante se passa a ter a possibilidade de alguma fatalidade. Em princípio pode haver uma fibrilação ventricular, que consiste numa mudança de comportamento do coração onde este deixa de pulsar periodicamente e passa a apenas tremer, interrompendo assim o fluxo sanguíneo do indivíduo. Ainda outra possibilidade seria o estabelecimento de uma parada respiratória temporária resultante da incidência de corrente no tórax e imobilizando a musculatura responsável pela respiração, conforme ilustrado na Figura 06.

Figura 06: Ilustração da passagem de corrente elétrica pelo tórax



Fonte: Jellinek (1931)

Em valores mais altos, que podem se aproximar ou até exceder 1 ampere, a variável que dita a letalidade é a duração desse choque. Nos estudos de Dalziel (DALZIEL, 1956) é dito que quando um choque violento ocorre em um intervalo muito curto, como de 0,03 segundos, os valores que acarretam fibrilação ventricular podem chegar à ordem de 1 até 2,6 amperes para que a fatalidade ocorra. Ainda, tais valores só se tornam letais em determinadas fases do ciclo de batimento cardíaco, sendo necessário que o choque ocorra com o coração em determinada posição para que ele seja letal definitivamente. As potências envolvidas nesse risco são consideravelmente baixas, com apenas 13,5 watts já sendo letais. Um compilado dessas informações pode ser encontrado na Figura 07.

Figura 07: Apresentação dos valores perceptíveis e nocivos de corrente incidida no corpo humano

Efeitos quantitativos da corrente elétrica em humanos (em mA)	(DC)		(AC) 60 Hz-rms		(AC) 10.000 Hz-rms	
	Homens	Mulheres	Homens	Mulheres	Homens	Mulheres
Sem sensação na mão	1	0,6	0,4	0,3	7	5
Formigamento leve. Limiar de percepção	5,2	3,5	1,1	0,7	12	8
Choque – não doloroso e sem perda de controle muscular	9	6	1,8	1,2	17	11
Choque doloroso – doloroso, mas sem perda de controle muscular	62	41	9	6	55	37
Choque doloroso – limiar de "soltar"	76	51	16,0	10,5	75	50
Choque doloroso e severo – contrações musculares, dificuldade para respirar	90	60	23	15	94	63
Possível fibrilação ventricular de choques curtos (duração de 0,03 s)	1300	1300	1000	1000	1100	1100
Fibrilação ventricular certa (duração de 3,0 s)	500	500	100	100	500	500
Fibrilação ventricular com morte certa	Multiplique os valores imediatamente acima por 2 ou 3/4. Para ser letal, choques curtos devem ocorrer durante a fase susceptível do ciclo cardíaco.					
Possível fibrilação ventricular a partir de impulsos de choque:						
Descargas curtas de energia em corrente contínua: 27,0 watt-segundos						
Descargas curtas de energia em corrente alternada de baixa frequência: 13,5 watt-segundos						

Fonte: Dalziel (1956) página 60 – Tradução livre

2.4 QUAIS OS VALORES SEGUROS?

Com todos os perigos citados anteriormente, no nosso dia a dia essencialmente não há valores seguros para que um choque elétrico não seja perigoso. No entanto existem casos onde a resistência corporal é grande o suficiente para impedir por completo a passagem de corrente elétrica, evitando qualquer choque. Essa é a situação quando se encosta nos polos de uma bateria de um automóvel com as mãos secas, por exemplo. Essa bateria é capaz de entregar até milhares de amperes de pico a 12 V mas, por conta da alta resistência de nossa pele, o dispositivo se torna inofensivo.

Em nossas casas, qualquer aparelho conectado à rede de distribuição pode ser potencialmente letal. No entanto, existem maneiras de reduzir os perigos na sua utilização, como a vistoria dos chicotes elétricos para corrigir possíveis falhas de isolamento, que podem causar choques. A adoção de equipamentos de proteção residual que, fazendo a análise da passagem de corrente em um circuito fechado e detectando uma pequena variação na entrada ou saída de energia (como uma eventual fuga de corrente decorrente de uma pessoa levando choque, por exemplo), desarma o sistema a fim de evitar possíveis danos à vida. Desse modo, não se tem valores seguros quando se trata de eletricidade no nosso cotidiano, mas é possível mitigar os danos ao limitar a exposição do indivíduo à eletricidade.

Já no uso experimental há algumas formas de driblar os possíveis perigos quando se pensa em experimentos didáticos seguros que envolvam a eletricidade. Um dos mais utilizados é a análise de circuitos em série e paralelo que, por serem de uma natureza já bem simples, não necessitam de muitas alterações. Basta a utilização

de fontes de tensão baixas o suficiente para não apresentarem perigo, como uma bateria de 12 V ao utilizar lâmpadas automotivas ou até baterias de 5 V ao utilizar leds. O uso dessas baterias de baixa tensão podem até tornar a experimentação didática mais lúdica, visto que não há riscos reais na sua execução, apenas um possível curto circuito por conta de uma ligação errada. O curto, por si, pode ser evitado ao utilizar uma lâmpada mais potente para atuar como resistência sempre presente nas montagens e limitando, assim, a máxima corrente disponível à montagem.

Outro experimento interessante e que não oferece risco sob determinadas condições, porém mais elaborado, é a bobina de Tesla. Esta consiste num circuito que se utiliza da frequência de ressonância de uma bobina secundária para gerar uma multiplicação considerável da tensão oferecida no primário que, por sua vez, é alimentado por uma corrente alternada de frequência próxima à ressonância do secundário. As tensões resultantes no secundário são capazes de romper a resistência dielétrica do ar e gerar descargas do tipo corona. Embora esse experimento muitas vezes seja realizado com frequências baixas, na ordem das dezenas de milhares de hertz, o que o torna potencialmente perigoso fornecendo risco a choques com correntes na ordem dos miliamperes, é possível arquitetar bobinas de Tesla que trabalham em frequências muito maiores, na ordem de mega ou até gigahertz, o que faz com que a sensibilidade de nosso sistema nervoso não perceba a passagem de qualquer corrente proveniente de uma descarga direta da bobina. Apesar de não ser perceptível, ainda há, nesse último caso, a necessidade de prestar atenção à exposição prolongada aos raios de descarga muito cativantes, uma vez que esses podem ocasionar leves queimaduras devido ao efeito Joule.

Essa última experiência descrita, com a bobina de Tesla, evidencia que, às vezes, mesmo tendo modificado o circuito para torná-lo não letal, o mesmo não se torna inofensivo, sendo necessárias precauções referentes ao tempo de exposição a fim de não mais gerar qualquer dano ao aluno. Isso nos experimentos propostos não necessariamente geram um dano severo, porém, se realizado com equipamentos de potências muito elevadas, podem gerar problemas bem mais graves se desconsideradas as devidas precauções.

Um exemplo extremo de arquitetura de circuito potencialmente letal e modificada para não haver letalidade se utilizando de bobina de Tesla é apresentado pelo youtuber Styropyro (STYROPYRO, 2023). O youtuber foi submetido a uma

descarga cuja corrente esteve na ordem dos 3 amperes sob cerca de 500 kV de diferença de potencial, algo extremamente perigoso que foi tornado não letal devido à alta frequência de trabalho do sistema. Apesar da não letalidade desse exemplo extremo, essa mesma situação mostra o efeito de leves queimaduras e evidencia a necessidade de atenção aos choques mesmo quando esses não são sensíveis ao sistema nervoso. Afinal, nesse caso, a potência atingida foi da ordem de MW, mesmo que sob um tempo diminuto, pode “cozinhar o indivíduo” vivo se incidir por um longo período.

Vale lembrar que as aplicações seguras da eletricidade não se restringem a experimentação didática, tanto que a eletricidade também é amplamente utilizada na medicina para tratar diversos problemas de saúde, de forma segura e controlada. Existem vários tratamentos clínicos baseados no uso de correntes elétricas ou pulsos para promover alívio de dores, reabilitação muscular, controle de condições neurológicas e até regulação do ritmo cardíaco.

Um dos tratamentos mais conhecidos é a Eletroconvulsoterapia (ECT), utilizada principalmente para tratar depressão grave, transtorno bipolar e esquizofrenia em casos resistentes a medicamentos. Durante a ECT, pequenas correntes elétricas são aplicadas ao cérebro, desencadeando crises epiléticas controladas que ajudam a regular o funcionamento cerebral. Esse procedimento é realizado sob anestesia geral e com relaxantes musculares para garantir conforto e segurança ao paciente.

Outra abordagem importante é a Estimulação Cerebral Profunda (ECP), indicada para doenças como Parkinson, distonia e transtorno obsessivo-compulsivo grave. Nesse procedimento, eletrodos são implantados cirurgicamente em regiões específicas do cérebro, e um dispositivo no tórax emite pulsos elétricos que modulam a atividade neuronal. Isso ajuda a reduzir tremores, rigidez e outros sintomas relacionados.

A Estimulação Elétrica Nervosa Transcutânea (TENS) é amplamente usada na fisioterapia para aliviar dores crônicas, como as causadas pela fibromialgia e pela artrite. Pequenos aparelhos portáteis enviam correntes elétricas de baixa intensidade através de eletrodos colocados na pele, bloqueando os sinais de dor antes que cheguem ao cérebro. De forma semelhante, a Eletroestimulação Muscular (EMS) é utilizada para fortalecer músculos, especialmente após longos períodos de imobilização, como no caso de fraturas, ou para reabilitação e reeducação muscular em atletas.

Para questões cardíacas, dispositivos como o marcapasso e o desfibrilador cardíaco implantável (DCI) desempenham um papel fundamental. Esses aparelhos são implantados no tórax para monitorar e corrigir irregularidades no ritmo cardíaco. O marcapasso regula batimentos cardíacos lentos, enquanto o desfibrilador pode emitir choques elétricos para corrigir ritmos perigosos, como a fibrilação ventricular.

Outro tratamento inovador é a Estimulação Magnética Transcraniana (EMT), que utiliza campos magnéticos para gerar correntes elétricas no cérebro. Essa técnica é aplicada em pacientes com depressão resistente, ansiedade ou em reabilitação após um acidente vascular cerebral, ajudando a modular áreas específicas do cérebro.

Por fim, a fisioterapia também emprega correntes de baixa frequência, como a corrente interferencial e a diadinâmica, para promover analgesia, redução de inflamações e cicatrização de tecidos. Esses métodos são especialmente úteis para lesões ortopédicas e na recuperação pós-operatória.

Esses tratamentos, realizados com equipamentos avançados e sob supervisão de profissionais capacitados, mostram como a eletricidade pode ser uma ferramenta poderosa para melhorar a qualidade de vida e tratar uma ampla gama de condições médicas.

2.5 RECOMENDAÇÕES GERAIS

Ao utilizarmos a eletricidade no cotidiano existem algumas precauções a serem tomadas, sendo a mais simples e eficaz o manuseio de equipamentos eletrificados apenas quando os mesmos estiverem desenergizados, algo que não apenas reduz, mas praticamente elimina o risco de choque elétrico.

Quando não é possível a desenergização do sistema, há diversas outras regras e equipamentos de proteção individual e coletiva a serem utilizados. Começando pelas “regrinhas” básicas, iniciamos com a ideia de nunca trabalhar sozinho. Estar sempre em duplas ou em um grupo maior facilita a possível remoção ou auxílio a alguém sendo submetido a uma descarga elétrica de forma mais rápida e eficaz, tornando menos perigosa a interação com esse meio. Outra regra interessante, a regra de uma mão, é fundamental no manuseio de circuitos energizados e potencialmente letais. Ela torna possível evitar que se esteja preso com as duas mãos, involuntariamente, a um fio ou qualquer estrutura energizada. Essa última situação

acaba tornando praticamente impossível a desconexão do indivíduo sozinho do sistema, acarretando assim na inevitável letalidade nos casos em que o circuito não possui nenhuma proteção contra esse tipo de eventualidade.

Os equipamentos de proteção servem para que, em conjunto das regras citadas anteriormente, se consiga produzir um ambiente seguro para a realização de qualquer manuseio de circuitos energizados. Os principais equipamentos de proteção individual são as luvas (que geram uma camada de isolação mais eficaz nas mãos, para um manuseio mais seguro), os óculos de proteção (que evitam que fagulhas possam queimar os olhos, além de protegê-los contra os raios UV presentes nos arcos elétricos), os tapetes de isolação (para quando se deseja evitar o choque mesmo não tendo luvas com isolação adequada, podendo assim ocorrer a equipotencialização do indivíduo com a rede sem que haja danos, visto que o tapete desconecta a pessoa do solo ou aterramento).

Já os equipamentos de proteção coletiva servem para isolar uma determinada área onde há possibilidade de descarga letal em terceiros que, eventualmente, desconhecem os perigos do local. Esses equipamentos são utilizados por eletricitas trabalhando tanto em baixa tensão (110 ou 220v) quanto em alta tensão (que varia de 13800 V a 200 kV) e que necessitam de equipamentos específicos que são regidos por normas técnicas, como as NBR's. Estas certificam a segurança de determinada atividade, envolvendo não apenas a eletricidade, mas também outras que venham a representar um alto risco ou perigo à saúde do indivíduo (PRASAD, SHARMA, SHARMA, 2010).

Quando se trata de segurança em atividades experimentais a serem realizadas em sala de aula, algumas precauções mais básicas, quando tomadas, podem dispensar o uso de EPI's e tornar a atividade financeiramente mais acessível. Mesmo que os EPI's não sejam tão dispendiosos, quando se pensa em uma turma com 30 ou 40 alunos, o gasto com esse tipo de equipamento pode tornar-se relevante, isso sem contar o custo da própria atividade experimental. Sendo assim, para que os experimentos em sala ou laboratório sejam realizados de uma forma segura e acessível, vale destacar algumas regras básicas no que tange o manuseio dos equipamentos e seu dimensionamento.

De início se deve arquitetar, se possível, os experimentos de modo a esses não utilizarem tensões perigosas, como os 220 V das tomadas. Um exemplo seria a clássica representação real dos circuitos série e paralelo com lâmpadas, a fim de

demonstrar o agrupamento de resistores juntamente com a Lei de Ohm. Nesse experimento, o recomendado seria o uso de tensões baixas, como 12 V, ou mesmo 5 V, utilizando lâmpadas como as de automóveis (no caso dos 12 V) ou LED's (no caso dos 5 V).

Outra regra interessante em sala de aula seria o manuseio do circuito apenas com o mesmo desenergizado, diminuindo o risco de curto circuito. Um curto em tensões baixas como as sugeridas não geraria mais que um susto nos estudantes. Ele também pode ser mitigado com o uso de uma lâmpada de maior potência ligada em série com o sistema a ser estudado. Essa lâmpada atuaria como um fusível indicador de curto-circuito (visto que a lâmpada apenas ligaria em caso de um curto mesmo) e poderia até servir para analisar o efeito de uma lâmpada de maior potência ou menor resistência em um circuito em série.

Na utilização de um gerador de Van de Graaff são necessárias diferentes precauções, visto que se trata de uma fonte de energia não letal, porém causadora de possíveis queimaduras e contrações musculares involuntárias. Para reduzir essas possibilidades, bem como para melhorar a utilização do equipamento de modo eficaz, sugere-se o uso de um tapete (ou banquetas) isolante. Essa ação evita a fuga das cargas estáticas, permitindo a equipotencialização entre a pessoa e o gerador.

Outra opção de gerador de altas tensões possível de ser usado em sala de aula, talvez ainda mais chamativo que o Van de Graaff, é a bobina de Tesla. Não há necessidade do uso de tapete (ou banquetas) isolante durante a atividade, até porque é desaconselhado tocar nos arcos gerados pela bobina. Caso se saiba que a bobina trabalha em frequências elevadas o suficiente para que não haja choque elétrico, então é possível tocar nos arcos. Algumas dicas de segurança, mesmo nos casos em que a bobina é “inofensiva”, são o uso da regra de uma mão só e a lembrar que o tempo de exposição ao arco deve ser diminuto em uma única área da pele, o que impediria possíveis queimaduras leves.

Para garantir a segurança no uso de eletricidade em sala de aula há que se considerar, também, o comportamento dos alunos da turma, recomendando-se cautela adicional em turmas mais descontraídas. O professor precisará reconhecer a necessidade (ou não) de determinadas medidas de segurança, visto que há diversas formas de se realizar o mesmo experimento. Por conta dessas variáveis presentes no ambiente escolar, é necessário que os professores tenham uma mínima noção dos

perigos que a eletricidade pode apresentar no ambiente escolar, assim como em possíveis experimentos a serem realizados lá.

3 ANÁLISE DE EXPERIMENTO

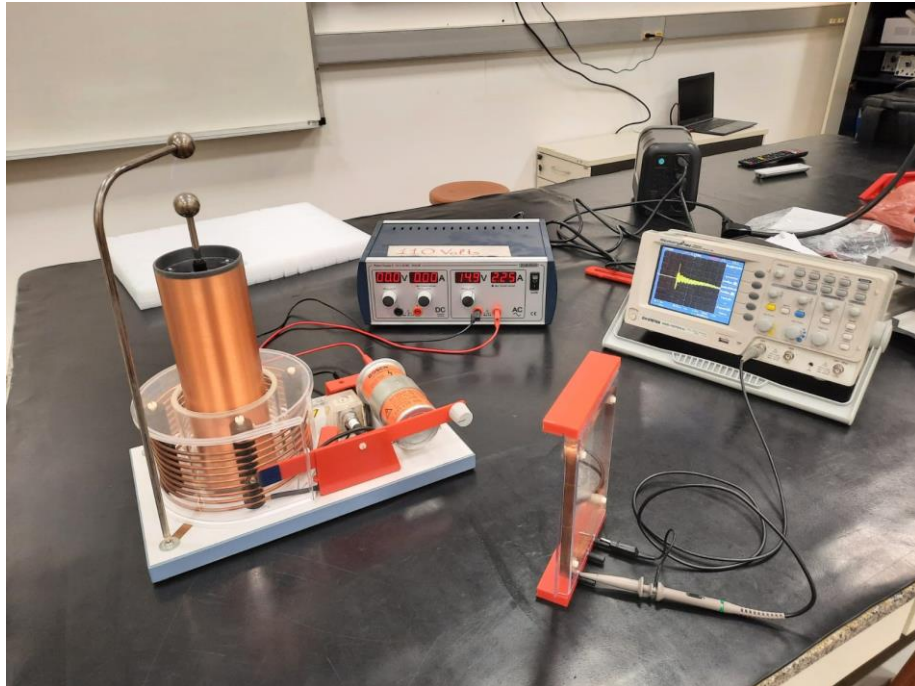
Quanto ao presente trabalho, pretendíamos mensurar a corrente de descarga durante um fagulhamento do gerador de Van de Graaff. Para tal finalidade seriam usados um osciloscópio e um resistor de baixa impedância (0,1 Ohms). No entanto, o mau funcionamento do Van de Graaff inviabilizou a continuidade dessa medida e obrigou a mudar o foco para outra experiência.

Um anúncio encontrado na internet referente a uma bobina de Tesla que, supostamente, não dava choque, chamou a atenção. Era anunciado ser possível tocar no arco elétrico de forma segura e, desse modo, adquirir uma com a finalidade de utilizá-la tanto em sala de aula como neste trabalho. Embora houvesse bobinas de Tesla no laboratório da universidade, uma bobina portátil e segura pode ser utilizada para instigar o interesse dos alunos no fenômeno. E as bobinas do laboratório, apesar de também instigarem interesse, elas não são portáteis e produzem descargas que podem ser realmente perigosas para uso em sala de aula.

Para que se comprovasse a segurança da utilização das bobinas de Tesla adquiridas, seriam necessárias as medidas de tensão, corrente e frequência de trabalho das mesmas. Com essas medidas seria possível comparar a frequência e corrente com o gráfico dos valores estipulados por Dalziel (DALZIEL, 1956), na tabela que se refere ao gráfico corrente x frequência apresentado na Figura 04. Mas, por não termos meios precisos de estipular a corrente do arco de descarga elétrica produzida, nos baseamos apenas na frequência desse arco gerado. Para estimar essa frequência, utilizamos uma antena conectada ao osciloscópio para detectar e observar o padrão de descarga. Apesar de não sabermos as características da antena utilizada, a frequência característica pôde ser determinada a partir do sinal captado pelo osciloscópio. Em uma possível repetição da experiência, o conhecimento das características da antena poderia das estimativas com respeito a intensidade de corrente e tensão produzidas nas descargas.

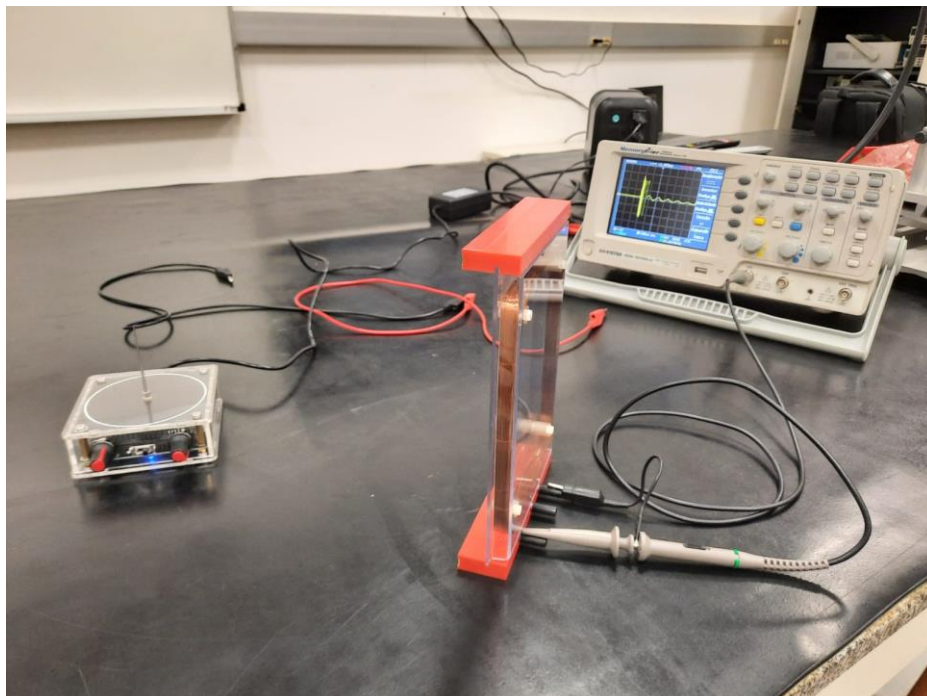
Com a realização do experimento acionando as bobinas de Tesla (tanto do laboratório quanto aquela adquirida, Figuras 08 e 09, respectivamente) e analisando um pulso isolado gerado pelas mesmas, pode-se destacar a presença de altas frequências no pulso, em ambas. Curiosamente, a bobina de Tesla comprada apresentou um sinal com período de 5 microssegundos, como apresentado na figura.

Figura 08: Experimento montado com a bobina do laboratório



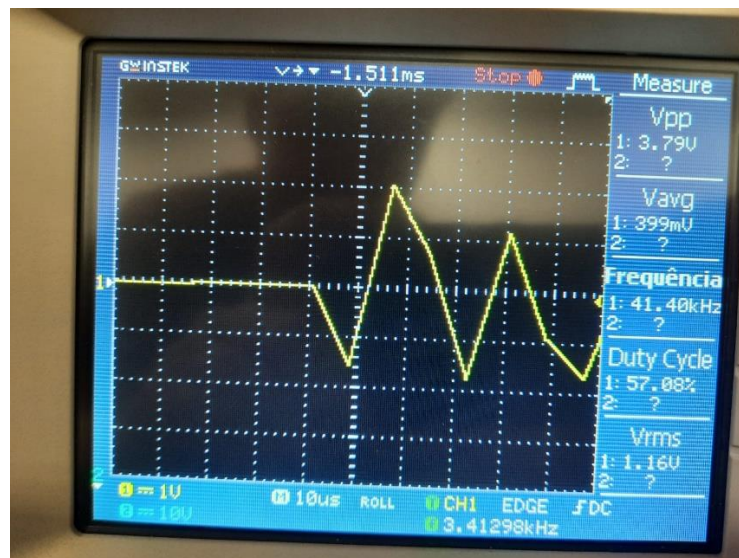
Fonte: Ivan Schwickert (2024)

Figura 09: Experimento montado com a bobina comprada



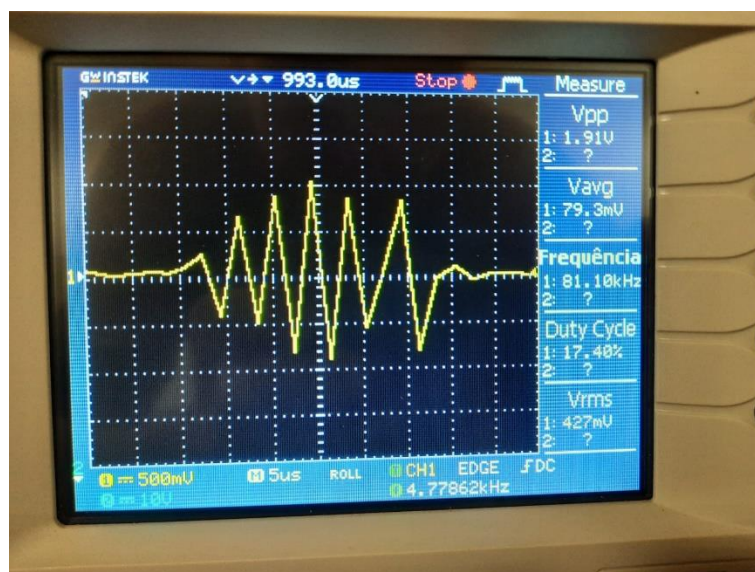
Fonte: Ivan Schwickert (2024)

Figura 10: Frequência do pulso da bobina do laboratório, registrado pelo osciloscópio



Fonte: Ivan Schwickert (2024)

Figura 11: Frequência do pulso da bobina comprada, registrado pelo osciloscópio



Fonte: Ivan Schwickert (2024)

Seja notado que o sinal captado apresenta um comportamento, de fato, periódico, assim como a bobina do laboratório.

Quanto ao sinal da bobina de Tesla do laboratório, para ser gerado, captado e interpretado de acordo com o interesse desse trabalho, precisou que houvesse um local de aterramento próximo à área em que ocorria a formação do arco elétrico para,

com isso, mantê-lo periódico. Foi analisado, com essas descargas, que o período da onda que compunha esse arco era da ordem de 25 microssegundos, algo 5 vezes mais longo em comparação ao experimento realizado com a bobina adquirida.

3.1 MAS O QUE PODE SER ESTIPULADO A PARTIR DESSES VALORES?

Com os períodos referentes aos sinais principais de cada arco das bobinas estudadas e utilizando a identidade $T=1/f$, sendo T o período e f a frequência correspondente, podemos calcular a frequência de cada uma das bobinas. Segue-se que a bobina adquirida tem frequência de 200 kHz enquanto aquela do laboratório tem frequência de 40 kHz.

Om base nos valores de frequência, podemos chegar a alguma conclusão? Sim e não. Vejamos.

Analizando apenas a frequência e comparando com os dados experimentais de Dalziel (DALZIEL, 1956), podemos estipular a corrente mínima necessária para que esse arco elétrico seja perceptível por nosso sistema nervoso, consequentemente, apresentando determinado perigo com relação a sua utilização comum (sem os cuidados necessários).

O gráfico log-log que representa a percepção de correntes em função da frequência (pelo sistema nervoso) podemos afirmar que a bobina de Tesla comprada teria seu arco perceptível em 99 ½% dos casos desde que a corrente atingisse cerca de 80 miliamperes. Porém, tendo em vista que os arcos gerados chegam a 10 cm e a rigidez dielétrica do ar se encontra na casa dos 3000 V por cm, estipula-se que a tensão do arco é de 30 kV. Levando em consideração a potência da fonte de alimentação do circuito, que possui 50 W, podemos estimar a corrente desse arco utilizando $P=V \cdot I$, onde $P=50$ W e $V=30$ kV. Conseguimos, assim, um valor estimado de corrente de 1,7 mA, algo consideravelmente menor do que o indicado como sensível nas experiências de Dalziel (DALZIEL, 1956).

Repetimos a estimativa, agora, com a bobina de Tesla do laboratório. Sabendo que o consumo era de tensão de 14 V e corrente drenada de 4 A, usando $P=V \cdot I$, a potência da fonte era de 56 W. Seja notado que esse valor está bem próximo daquele aferido na outra bobina de Tesla. Pôde-se também observar que o tamanho do arco era de aproximadamente 10 cm. Com esses valores, chegamos a uma corrente de 1,9 miliampere, corrente essa um pouco maior que a vista anteriormente, porém,

analisando novamente o gráfico referente a correntes sensíveis em altas frequências, seria necessária uma corrente de cerca de 8 miliampere para que fosse definitivamente perceptível a presença de tal corrente a 40 kHz.

Com respeito à utilização desses experimentos específicos em determinada aula, algumas precauções são novamente indicadas. Primeiro, cabe lembrar que ambos os experimentos são seguros no quesito interação com o sistema nervoso, isso ao manuseá-lo com pele seca e íntegra. O possível contato do arco com áreas mais sensíveis da pele, como algum corte existente na mão ou até mesmo o manuseio com as mãos levemente molhadas, pode, eventualmente, causar um desconforto. Mas nada que possa ser considerado perigoso. Para que o contato não persista em caso de espasmos involuntários, é recomendado o uso da regra de uma mão só, visto que precauções básicas adicionais não geram nenhuma intromissão no entendimento do experimento.

No que se refere a quais experimentos podem ser realizados com esses aparatos, existem muitas possibilidades. Um exemplo seria em uma referência histórica a respeito da batalha das correntes, com a finalidade de simbolizar uma das inúmeras invenções de Nikola Tesla. Outro seria para exemplificar o conceito de ruptura dielétrica do ar. Indo mais a fundo, pode-se também apresentar o próprio conceito de funcionamento da bobina de Tesla, que se refere à frequência de ressonância de uma bobina (a secundária) que, ao ser incidida por um campo magnético de frequência similar, gera essa enorme multiplicação de tensões, que pode chegar a milhares de vezes a tensão que produziu o campo magnético inicialmente.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para estabelecer um padrão de segurança durante a realização de experimentos que envolvam eletricidade pelos professores, precisa-se inicialmente de uma noção de quais aspectos da eletricidade que a tornam possivelmente letal. Para que se descubra os verdadeiros perigos de cada experimento é necessária uma minuciosa análise a respeito de suas variáveis como a tensão, corrente, frequência dentre outros parâmetros. Para mitigar possíveis perigos envolvendo essas variáveis torna-se necessária uma de duas abordagens.

A primeira seria o uso de equipamentos de proteção e medidas de segurança, algo amplamente realizado durante manutenções cotidianas nas redes elétricas e que possibilita um manuseio mais seguro, porém, com custos adicionais.

A segunda refere-se a algumas medidas comportamentais que podem ser adotadas a fim de reduzir riscos no manuseio de eletricidade, como a regra do uso de apenas uma mão para o manuseio de equipamentos energizados. Outra prática simples seria a montagem de circuitos série-paralelo com o sistema desenergizado, o que mantém a segurança e evita possíveis curto-circuito que, embora não necessariamente letais, podem ser assombrosos em determinadas ocasiões. Ainda outra forma de mitigar os perigos presentes, seria a análise do principal fator de risco na experiência e buscar, com isso, uma mudança na arquitetura do experimento, tanto do equipamento quanto da forma do mesmo; um exemplo disso seria a remodelagem da bobina de Tesla, tornando seu arco elétrico inofensivo, o que torna o próprio aprendizado mais simples e objetivo, sem a necessidade de precauções exageradas.

Os mitos esclarecidos no trabalho estão relacionados a percepções exageradas ou incorretas sobre os riscos de experimentos com eletricidade. Entre os principais mitos abordados, destacam-se:

1. Mito da Periculosidade Absoluta de Equipamentos como a Bobina de Tesla: O trabalho esclarece que bobinas de Tesla podem ser ajustadas para operar em altas frequências, o que reduz significativamente o risco de choques perigosos. No entanto, ainda exigem cuidados, especialmente quanto à possibilidade de queimaduras leves.

2. Excessiva Precaução com Geradores de Van de Graaff: É desmistificado o receio de que todo contato com geradores de Van de Graaff seja perigoso. Com as precauções adequadas, como o uso de isolamento do solo e tapetes isolantes, esses equipamentos podem ser utilizados de forma segura e didática.

3. Exclusão de Indivíduos com Marcapassos de Atividades Didáticas: O trabalho questiona a necessidade de exclusão absoluta de pessoas com marcapassos em experimentos com equipamentos como geradores de Van de Graaff, sugerindo que, em determinados casos, essa exclusão pode ser uma medida exagerada.

4. Sensibilidade Igual às Correntes Elétricas Independente de Parâmetros: É esclarecido que variáveis como frequência, tempo de exposição e intensidade da corrente são determinantes para a percepção e o perigo de choques elétricos, demonstrando que alguns experimentos podem ser seguros mesmo com tensões elevadas.

5. Generalização de que Toda Corrente é Letal: O trabalho demonstra que a letalidade de um choque depende da combinação de fatores como corrente, tensão, resistência da pele e tempo de exposição, desmistificando a ideia de que qualquer contato com corrente elétrica é fatal.

Para aplicar as medidas anteriormente indicadas em uma situação prática foram utilizados dois experimentos fundamentalmente iguais com bobinas de Tesla. O funcionamento de cada uma é distinto, uma sendo fundamentalmente analógica (a do laboratório), porém oferecendo risco de choque devido à baixa frequência de operação, e outra com uma eletrônica mais detalhada (a adquirida), porém mais segura contra choques devido à alta frequência de operação. Ambas foram utilizadas com a finalidade de detectar diferenças a respeito da sensibilidade do usuário ao tocar o arco elétrico delas. A bobina adquirida pôde ser apresentada em sala de aula e exposições da universidade justamente por ser inofensiva.

Durante a pesquisa e a realização dos experimentos alguns desafios foram surgindo, principalmente a falta de textos científicos em língua portuguesa que envolvam o tema e possuam algum fundamento científico. Foi interessante encontrar, entre as referências dos textos analisados, um artigo em inglês de 1956 de Dalziel (DALZIEL, 1956) que, aparentemente, subsidiou a maioria dos posteriores a ele com dados experimentais a respeito da resposta humana ao choque elétrico.

O outro desafio encontrado foi o conhecimento limitado dos pesquisadores com respeito a eletricidade em altas tensões e frequências, algo que inviabilizou a aquisição e análise quantitativa de dados relativos ao objetivo inicial desse trabalho, que era medir a corrente de um pulso de descarga de um gerador de Van de Graaff. Além da limitação de conhecimento, acabamos desestimulados pelo não funcionamento do gerador de Van de Graaff disponível no laboratório. Essa

combinação de eventos levou à mudança de foco do trabalho e à análise das bobinas de Tesla.

Em abordagens futuras, seria interessante a realização das medidas de corrente presentes no gerador de Van de Graaff. Outra abordagem significativa seria a pesquisa e desenvolvimento teórico-prático de alguns experimentos, sejam eles criados pelos professores ou presentes no laboratório, a fim de que sejam analisados seus perigos e adotadas as devidas medidas de segurança. O que viria a tornar ainda mais interessante essa abordagem, seria ajustar a arquitetura desses novos experimentos a fim de torná-los menos perigosos e documentar toda a construção e estudo. Por fim, como perspectiva de contribuição futura, talvez fosse de bom grado a discussão dos possíveis perigos da eletricidade e de como mitigá-los durante as disciplinas do curso, sejam essas práticas de ensino ou de laboratório.

5 REFERÊNCIAS

CARTER, A. O.; MORLEY, R. Electric current flow through human skin at power frequency voltages. *Brit. J. Industr. Med.*, v. 26, p. 217-223, 1969.

DALZIEL, Charles F. Effects of electric shock on man. University of California, Berkeley, California. Disponível em: https://premierpowerinc.com/docs/Effects_of_Electric_Shock_on_Man.pdf. Acesso em: 8 dez. 2024.

DIELECTRIC breakdown of human skin in vivo. *Med. & Biol. Eng. & Comput.*, v. 21, p. 379-381, 1983.

Electric Shock Hazards. Disponível em: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/shock.html#c3>>. Acesso em: 8 dez. 2024.

ELECTROBOOM. **Electricity Pain versus Frequency.** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=MMzU66IHe-k>>. Acesso em: 8 dez. 2024.

FISH, Raymond M.; GEDDES, Leslie A. Conduction of electrical current to and through the human body: a review. *ePlasty*, v. 9, 12 out. 2009. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/reader/2d65e5720dd6d5b76dcb305085e7a9be81f4a1e2>. Acesso em: 8 dez. 2024.

How To Measure Extreme Pulsed Currents (Pulsed Shunts Part 1). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=DASn1Yf44Ao>>. Acesso em: 8 maio. 2024.

Is it the volts or amps that kill? Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=BGD-oSwJv3E>>.

JANKOWSKI, Krzysztof; ZBROWSKI, Andrzej. Electric shock safety in automotive electrical systems. *Technical Transactions. Mechanics*, v. 1-M, 2014.

JELLINEK, Stefan; **Elektroschutz in 132 Bildern.** Alemanha, Wien-Leipzig; Deutscher Verlag für Jugend und Volk. 1931.

MEHDI SADAGHDAR. **Electricity Pain versus Frequency | ElectroBoom**. Disponível em: <<https://www.electroboom.com/?p=688>>.

PRASAD, Dwarka; SHARMA, Ashwani Kumar; SHARMA, H. C. Electric shock and human body. *International Journal of Electrical and Power Engineering*, v. 4, n. 3, p. 177-181, 2010. ISSN 1990-7958.

MAYERHOFF, **Evan; The Electric Shock Questions**. Disponível em: <<https://www.highvoltageconnection.com/articles/ElectricShockQuestions.htm>>. Acesso em: 8 dez. 2024.

WEG. Soluções integradas para instalações elétricas. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hec/h5f/WEG-solucoes-integradas-para-instalacoes-eletricas-50009824-pt.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2024.