

2023 IEEE ESW BRAZIL

ELECTRICAL SAFETY WORKSHOP BRAZIL (ESW BRAZIL)

17 A 19 DE OUTUBRO DE 2023 – São Paulo - SP – BRASIL



**XII ESW
BRASIL 2025**



2023 IEEE ESW Brazil

Electrical Safety Workshop Brazil

(ESW Brazil)

PREFÁCIO – ESW BRASIL 2023

A 11ª edição do **ESW Brasil – Electrical Safety Workshop**, versão brasileira de um dos mais tradicionais eventos de segurança elétrica do mundo, chega em 2023 marcada por uma conquista inédita: pela primeira vez, o encontro será realizado nas dependências da **Universidade de São Paulo (USP)**, no **Instituto de Energia e Ambiente (IEE)**. Inspirado no modelo norte-americano, que é realizado há mais de 30 anos nos EUA e há 22 anos no Brasil, de forma bienal, o evento se consolida como um dos mais relevantes fóruns técnico-científicos dedicados à promoção da cultura de segurança elétrica no país.

Ao longo de três dias de intenso conteúdo, participantes tiveram acesso a apresentações de alto nível, incluindo cases de sucesso de grandes empresas, como Vale, Petrobras, Cemig, Celesc, entre outras referências do setor. O ESW Brasil é reconhecido por sua atmosfera colaborativa, que estimula a troca de experiências e o diálogo entre especialistas, profissionais da área elétrica, pesquisadores, fabricantes e usuários. Além da programação principal, o evento contou com um dia exclusivo de tutoriais, com minicursos ministrados por especialistas renomados, ampliando ainda mais as oportunidades de aprendizado e capacitação.

A realização do ESW Brasil é uma iniciativa do **IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos**, a maior entidade técnica profissional do mundo, por meio da Seção Sul Brasil e do Capítulo *IAS – Industry Applications Society*. A edição conta ainda com a parceria da **ABRACOPEL – Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade** e o apoio de importantes empresas do setor, como Wextex by Milliken, Leal Equipamentos de Proteção, Ideal Work, Etap e Santista.

O evento reafirma sua relevância ao promover discussões fundamentais sobre normas de segurança, arco elétrico, EPIs, práticas de manutenção segura, gestão de riscos e inovações tecnológicas, contribuindo diretamente para a evolução das normas brasileiras, como a ABNT NBR 16384, e para a redução de acidentes elétricos no ambiente de trabalho.

As edições anteriores já haviam demonstrado a força do encontro ao reunir profissionais de todo o país em torno de um objetivo comum: transformar a cultura de segurança elétrica no Brasil. Com a presença de especialistas internacionais, trabalhos técnicos e debates aprofundados sobre prevenção, o ESW Brasil consolidou-se como um espaço essencial para compartilhamento de conhecimento e desenvolvimento profissional e, a partir desta edição com a parceria da USP por meio de seu renomado Instituto de Energia e Ambiente – IEE, o evento se consolida pela sua importância no cenário nacional.

Em síntese, o ESW Brasil é muito mais do que um workshop: é um movimento contínuo de **inovação, cooperação e compromisso com a vida**, promovendo a segurança elétrica como pilar fundamental para a sustentabilidade e a evolução do setor.

Vejam os trabalhos apresentados:

TUTORIAIS

- Manhã Cálculo manual de energia incidente incluindo considerações práticas
- Tarde Seleção, uso e cuidados com o EPI para Arco Elétrico – o novo cenário de certificação de EPI no Brasil a partir de 2023

CONGRESSO ESW BRASIL 2023

18/10/2023

Acidentes por choque elétrico – os dados e as ações; Acidente de origem elétrica em atividades rurais; Riscos elétricos em espaços públicos recreativos; Procedimento para avaliação de instalações elétricas residenciais; Boas práticas industriais aplicadas ao projeto de geração de energia fotovoltaica na Usina Sol do Cerrado (761 KWp) em Jaíba, MG; Implementação de ensaio de isolação elétrica com alta tensão em andaimes isolados de acordo com a Norma ASTM F 711; Estudo dinâmico de energia incidente considerando contribuições de curto-circuito com decremento CA de máquinas rotativas; Determinação do ATPV utilizando calorímetro óptico; Medição termográfica de energia incidente dos arcos elétricos com validação através do Guia IEEE Std 1584-2018 e do ARCPRO software; Simulação computacional de arcos elétricos trifásicos para estimativa de energia incidente com base na Teoria Magneto-hidrodinâmica; Implementação de ensaios de tipo para vestimentas condutivas classe 2 segundo a IC 60895:2019

André Luis Costa França, Eletronorte; Desenvolvimento de solução para realização de manobras elétricas remotas de inserção e extração em disjuntores e contatores em subestações; A expectativa e a realidade dos resultados nos ensaios de caracterização de materiais para EPI contra arco elétrico; Demonstração de ensaios de vestimentas no Laboratório de Ensaio de Vestimentas – LEVe; Simulação de melhorias na segurança do trabalho através da gestão de EPI's: IEE/USP; Soluções implementadas na Vale para redução da exposição de pessoas aos riscos elétricos em instalações industriais.

19/10/2023

Captadores E.S.E. frente a legislação brasileira; Projeto de redes de distribuição seguras para a população; A influência do decaimento de curva da corrente de curto-círcuito no cálculo e determinação da energia incidente; Segurança elétrica em canteiro de obras; Proteção de terra em sistemas elétricos industriais – estudo de caso; Tuliclear – limpeza de tulipas de painéis de alta tensão; Uma abordagem estatística da qualidade dos cabos elétricos de baixa tensão e as suas contribuições com os incêndios de origem elétrica; Emenda de cabo – operação segura; Segurança elétrica em canteiro de obras; Gerenciamento do SPDA em instalações industriais; Linha de vida e proteção contra descargas atmosféricas; Principais perigos nas proximidades do canal de descarga atmosférica: tensões de passo, toque e líderes ascendentes não conectantes; Aplicação de medida de controle de engenharia para redução dos níveis de energia incidente em uma planta de mineração – estudo de caso real; Supressores de arcos elétricos.

SEÇÃO DE POSTER

O papel do laboratório de ensaios e equipamentos de proteção na garantia da segurança e da saúde dos empregados da Elebrobras/Eletronorte
Conforto térmico em calçados para eletricistas

Supervisão de corrente de fuga e falhas de isolamento: aumento da segurança elétrica preditiva e redução de acidentes

Proposta de monitoramento remoto da integridade da comunicação: GOOSE utilizada em esquema de seletividade lógica

Auditória sistêmica de NR-10

Intertravamento Kirk para manobras manuais seguras em subestações

Equipamentos elétricos e segurança

Acidente zero em parada para manutenção programada em subestações elétricas de 88/13,2 kV e 13,2 kV/380 V

A Comissão Organizadora do X ESW Brasil foi composta por:



MARCIO BOTTARO (*Coordenador Geral*)

Doutor em Tecnologia Nuclear pelo Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares da USP. Concentra suas atividades em pesquisas de segurança e desempenho de equipamentos e materiais elétricos.



EDSON MARTINHO (*Coordenador financeiro*)

Fundador e Diretor Executivo da Abracopel, Sócio-diretor do Grupo Lambda. Presidente da AEAS – Associação de Engenheiros e Arquitetos de Salto-SP. Engenheiro Eletricista e de Segurança do Trabalho, é especialista em Qualidade da Energia Elétrica e Segurança em sistemas de baixa tensão.



HELIO EIJI SUETA (*Coordenador de Infraestrutura*)

Fundador e Diretor Executivo da Abracopel, Sócio-diretor do Grupo Lambda. Presidente da AEAS – Associação de Engenheiros e Arquitetos de Salto-SP. Engenheiro Eletricista e de Segurança do Trabalho, é especialista em Qualidade da Energia Elétrica e Segurança em sistemas de baixa tensão.

**DANILO FERREIRA SOUZA** (*Coordenador Técnico*)

Doutor em energia (Summa Cum Laude) pelo IEE – Instituto de Energia e Ambiente/USP e professor adjunto da UFMT. Atualmente é Presidente da Abracopel e membro do CENDAT/USP – Centro de Estudos em Descargas Atmosféricas e Alta Pressão.

**SERGIO ROBERTO SANTOS** (*Comissão Organizadora*)

Mestre em Tecnologia da Energia pelo IEE – Instituto de Energia e Ambiente/USP. Sócio da Lambda Consultoria, Consultor da Embrastec, Colunista da Revista Eletricidade Moderna e Membro da Comissão de Estudo do COBEI/ABNT.



Agradecimentos

A Comissão Organizadora agradece profundamente a todos os patrocinadores e apoiadores que tornaram esta edição do IEEE ESW Brasil possível. A parceria e o compromisso dessas organizações com a segurança elétrica, a inovação tecnológica e a formação contínua de profissionais foram essenciais para a realização deste encontro. O suporte institucional e técnico oferecido por cada empresa e entidade reforça a importância da cooperação entre academia, indústria e sociedade para promover ambientes de trabalho mais seguros e conscientes. Somos sinceramente gratos por cada contribuição, que não apenas viabiliza o evento, mas fortalece nossa missão de difundir conhecimento, aprimorar práticas e salvar vidas por meio da educação e da prevenção.



INDUSTRY
APPLICATIONS
SOCIETY



SUMÁRIO

<i>Paper 1 - HIPOTESE DOS CAPTORES ESE FRENTE A LEGISLAÇÃO BRASILEIRA.....</i>	12
<i>Anderson Konescki Fernandes, Aureoaldo Barros Junior</i>	
<i>Paper 2 - IMPLEMENTAÇÃO DE ENSAIOS DE TIPO PARA VESTIMENTAS CONDUTIVAS CLASSE 2 SEGUNDO A IEC 60895:2020.....</i>	15
<i>André Luis Costa França, Marcelo Melo da Costa, Thiago Brito Pereira da Silva</i>	
<i>Paper 3 - AUDITORIA INTERNA DE BARREIRAS DE SEGURANÇA DE PROCESSOS.....</i>	20
<i>André Reis</i>	
<i>Paper 4 - INSTALAÇÕES E ACIDENTES DE ORIGEM ELÉTRICAS EM ESTABELECIMENTOS RURAIS: DIAGNÓSTICO EM PEQUENAS PROPRIEDADES</i>	26
<i>Caroline Daiane Raduns</i>	
<i>Paper 5 - UMA ABORDAGEM ESTATÍSTICA DA QUALIDADE DOS CABOS ELÉTRICOS DE BAIXA TENSÃO, E AS SUAS CONTRIBUIÇÕES COM OS INCÊNDIOS DE ORIGEM ELÉTRICA.....</i>	32
<i>Danilo Ferreira de Souza, Walter Aguiar Martins Jr., Edson Martinho</i>	
<i>Paper 6 - SOLUÇÕES IMPLEMENTADAS NA VALE PARA REDUÇÃO DA EXPOSIÇÃO DE PESSOAS AOS RISCOS ELÉTRICOS EM INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS.....</i>	38
<i>Edmilson José de Castro, Márcio Azevedo dos Santos, Marcos Tadeu Pereira, Leonardo Elias Moschen Chisté, Junio César Cunha Viana</i>	
<i>Anderson Fernandes da Silva, Wendel Rosado Baldon</i>	
<i>Paper 7 - ESTUDO DINÂMICO DE ENERGIA INCIDENTE CONSIDERANDO CONTRIBUIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO COM DECREMENTO CA DE MÁQUINAS ROTATIVAS</i>	36
<i>Edson Fernando Machado Sato, José Maria de Carvalho Filho</i>	
<i>Paper 8 - PROJETO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO SEGURAS PARA A POPULAÇÃO.....</i>	46
<i>Estellito Rangel Jr.</i>	
<i>Paper 9 - EPI Conforto Térmico em Calçados para Eletricistas.....</i>	53
<i>Fábio Rafaelli, Danieli Tartas, Fábio Leonardo Ramos Salvador</i>	
<i>Paper 10 - Procedimento para Emenda de Condutores em Redes de Distribuição.....</i>	58
<i>Francis Nascimento, Henrique Couto, Helvécio Teixeira, Fábio Rafaelli, Josué Bastos</i>	
<i>Paper 11 - Supervisão de corrente de fuga e falhas de isolamento: Aumento da segurança elétrica preditiva e redução de acidentes</i>	74
<i>Felipe Marin Gomes, Kassio Pereira, Caroline Alves Henrique Bender Rodrigues</i>	

SUMÁRIO

<i>Paper 12 - Determinação do ATPV utilizando calorímetro baseado em sensor óptico</i>	83
<i>Fernanda C. Salvador Soares, Márcio Bottaro, Josemir Coelho Santos, Paulo Futoshi Obsase, Rogério Massaro</i>	
<i>Paper 13 - Proteção de Terra em Sistemas Elétricos Industriais - Estudo de Caso</i>	90
<i>Filipe Barcelos Resende, Gabriel Figueiredo, Helberth Gonçalves</i>	
<i>Paper 14 - LINHAS DE VIDA E A PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</i>	96
<i>H.E. Sueta - L.E. Caires - R. Zilles, Jobson Modena, J. Barbosa de Oliveira</i>	
<i>Paper 15 - Aplicação de Medida de Controle de Engenharia para a Redução dos Níveis de Energia Incidente em uma Planta de Mineração – Estudo de Caso Real.....</i>	104
<i>Henrique Fantoni Primo, Filipe Barcelos Resende, Israel Resende Rodrigues, Giuliano de Oliveira Carnevali</i>	
<i>Paper 16 - SEGURANÇA ELÉTRICA EM CANTEIRO DE OBRAS</i>	110
<i>João Gilberto Cunha</i>	
<i>Paper 17 - Riscos elétricos em espaços públicos recreativos</i>	114
<i>José Carlos Martinez Melero, Elvo Calixto Burini Jr., Emerson R. Santos</i>	
<i>Paper 18 - DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÃO PARA REALIZAÇÃO DE MANOBRAS ELÉTRICAS REMOTAS DE INSERÇÃO E EXTRAÇÃO EM DISJUNTORES E CONTATORES EM SUBESTAÇÕES</i>	121
<i>Leonardo Elias Moschen Chisté, Edmilson José de Castro, Rafael Araújo Bornachi, Márcio Azevedo dos Santos, Marcos Tadeu Pereira, Valter Clá Diaz</i>	
<i>Paper 19 - EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E SEGURANÇA.....</i>	125
<i>Manuel Maria Polainas Bolotinha</i>	
<i>Paper 20 - Implementação de Ensaio de Isolação Elétrica com Alta Tensão em Andaimes Isolantes de Acordo com a Norma ASTM F711.....</i>	129
<i>André L. C. França, Marcelo M. Costa, Thiago B. P. Souza</i>	
<i>Paper 21 - O PAPEL DO LABORATÓRIO DE ENSAIOS EM EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO NA GARANTIA DA SEGURANÇA E DA SAÚDE DOS EMPREGADOS DA ELETROBRAS ELETRONORTE</i>	133
<i>André Luis Costa França, Marcelo Melo da Costa, Thiago Brito Pereira da Silva</i>	
<i>Paper 22 - A expectativa e a realidade dos resultados nos ensaios de caracterização de materiais para EPI contra arco elétrico</i>	136
<i>Márcio Bottaro, Luis Eduardo Caires, Paulo Futoshi Obase, Hédio Tatizawa</i>	

Paper 23 - PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO SEGURA DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS RESIDENCIAIS 145

Mauro Fonseca Rodrigues, Caroline Daiane Radüns, Silvana Zauza

Paper 24 - Principais perigos nas proximidades do canal da descarga atmosférica: tensões de passo, toque e líderes ascendentes não-conectivos 152

Miltom Shigihara, Hélio E. Sueta, Danilo F. de Souza

Paper 25 - Boas práticas industriais aplicadas ao projeto de geração de energia fotovoltaica na usina Sol do Cerrado (766 KWp) em Jaíba MG 159

Paulo Henrique V. Soares, Anderson Gomes, Luiz Arantes, Renee Vilarino, Estevao Franco Figueiredo, Felipe Fialho G. Souza

Paper 26 - MEDIDAÇÃO TERMOGRÁFICA DA ENERGIA INCIDENTE DOS ARCOS ELÉTRICOS COM VALIDAÇÃO ATRAVÉS DO GUIA IEEE STD 1584-2018 E DO ARCPROMT 4 167

Pedro de Oliveira Bacin, Marina Camponogara, Mateus Franco Fava, Tiago Bandeira Marchesan, Rafael Concatto Beltrame,

Vitor Cristiano Bender, Daniel Pinheiro Bernardon, Lucas Melo de Chiara, Fernando Cesar Pepe

Paper 27 - SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ARCOS ELÉTRICOS TRIFÁSICOS PARA ESTIMAÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE COM BASE NA TEORIA MAGNETO-HIDRODINÂMICA 177

Mateus Franco Fava, Pedro de Oliveira Bacin, Rodolfo Pilar Londero, Tiago Bandeira Marchesan, Rafael Contato Beltrame

Vitor Cristiano Bender, Daniel Pinheiro Bernardon, Lucas Melo de Chiara, Lucas Melo de Chiara

Paper 28 - ELETRICÔMETRO 187

Rafael Eloi, Thiago Henrique Pereira, Helberth Gonçalves, Geovane Souza, Usama Asrieh, Eduarda Gomes, Tiago Alves Borges,

Wender Pinheiro, Rafael Souza

Paper 29 - AUDITORIA SISTEMICA DE NR10 193

Rosinildo Honorato da Silva

Paper 30 - SUPRESSORES DE ARCOS ELÉTRICOS 197

Sergio Roberto Santos

Paper 31 - DANOS POR RAIOS EM INVERSORES DE PLANTAS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL INSTALADOS SEM ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO E DE EQUIPOTENCIALIZAÇÃO 201

Me. Swytz J. S. Tavares, Esp. Satyro L. S. Tavares, Me. José Batista S. Filho

Paper 32 - SIMULAÇÃO DE MELHORIAS NA SEGURANÇA DO TRABALHO ATRAVÉS DA GESTÃO DE EPI's: IEE/USP 209

Tadeu Osano de Oliveira, Alan Takashi Tutumi, Leandro Sousa Freitas

Paper 33 - Intertravamento Kirk para manobras manuais seguras em subestações 218

Eng. Vivaldo Mendes de Souza, Eng. Allan de Souza Fernandes da Silva



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

HIPÓTESE DOS CAPTORES ESE FRENTE A LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

Anderson Konescki Fernandes
KFEL
andersonkf@gmail.com

Aureovaldo Barros Junior
Barros Engenharia
aureovaldo@gmail.com

RESUMO

Os E.S.E. e congêneres são baseados em hipóteses que demandam de comprovação. Testes e ensaios de campo indicam que este tipo de tecnologia não consegue garantir os critérios mínimos de segurança.

A Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein explica o que acontece em campos gravitacionais fortes e a curvatura dos raios de luz devida à gravidade. Assim, é uma teoria melhor. Mas continua ser mais fácil usar a teoria de Newton, se quisermos verificar a trajetória da bola de basebol.

"The Little Book of Science", por John Gribbin

1.0 – INTRODUÇÃO

No campo da pesquisa científica a jornada desde uma ideia até uma teoria científica, ou, uma lei científica.

- Hipótese,
- Achado,
- Modelo,
- Teoria,
- Lei.

Hipótese,

O que temos como teoria!

Uma teoria é uma ideia que começou por ser uma hipótese, mas que foi testada pela experiência e pela observação do mundo real, e passou por todos os testes a que foi sujeita. Logo que uma teoria falha em um teste experimental ou observacional falando estritamente, tem de ser substituída por uma teoria melhor, mais completa. Mas a velha teoria ainda pode ser útil numa área restrita, uma vez conhecidas as suas limitações.

O melhor exemplo é a gravitação. A teoria da gravitação de Isaac Newton pode ser usada para explicar coisas como a órbita da Lua em volta da Terra, ou prever a trajetória de uma bola de basebol batida por um jogador. Não pode explicar propriamente o que se passa em campos gravitacionais muito fortes ou como a luz é curvada pelo Sol.

Hipótese do E.S.E.,

Uma boa teoria deve satisfazer dois requisitos:

- 1 - Precisa descrever com precisão um número razoável de observações, com base em um modelo que contenha poucos elementos arbitrários;
- 2 - E deve prever com boa margem de definição resultados de observações futuras.

O primeiro líder ascendente não garante a conexão da descarga descendente em uma tempestade de raios. A formação do líder ascendente é uma resposta eletrodinâmica a uma descarga atmosférica ar terra. A formação da conexão é aleatória para a qualquer evidência até o presente momento apresentada.

Um dos maiores argumentos dos E.S.E. é que ele emite justamente o primeiro líder, porém, comprovado em testes, esse mesmo líder tem pouca velocidade, bem abaixo dos líderes naturais e o pior, de um comprimento muito curto.

2.0 – NON SEQUITUR

A confirmação da hipótese dos E.S.E. e congêneres não pode se apoiar simplesmente no fato de premissas estipuladas antes da realização dos experimentos.

A conclusão não é uma simples dedução de afirmações postuladas. Não sendo resultado das premissas.

A emissão de líderes ascendente não garante que ocorre a conexão da descarga atmosféricas com estes líderes ascendentes.

2.1 – PESQUISAS EM ILHA SOLTEIRA

Nas experiências realizadas pelo professor Duílio Moreira Leite com o próprio captor de E.S.E. foi constatada que a descarga atmosférica atingiu a base do lançado foguetes. Mesmo como um Captor E.S.E. instalado na base de lançamento o líder descendente conectou com a estrutura metálica que compõe a base que sustenta o dispositivo construído conforme a hipótese do ESSE.

Nas experiências, conduzidas pelo Físico e Professor Marcelo Sana, do INPE, ficou evidenciado que a emissão de líderes ascendentes e os líderes descendentes não precisam ter suas conexões diretas. Tudo ficou muito bem evidenciado em suas experiências, onde foram utilizadas câmeras ultrarrápidas, com todas as possibilidades de observação

As experimentações conduzidas pelo Físico e Professor Marcelo Sana no INPE, apontam que com a utilização de suas câmeras ultrarrápidas ~~O experimento~~ foi coletados todos os dados referentes da conexão dos líderes ascendentes com os líderes descendentes em uma tempestade de raios.

Mesmo com os líderes ascendentes, em sistema convencionais de captação, não é possível prever, e, a condução de uma descarga atmosférica. ~~Este~~ No experimento foi possível verificar a conexão de um raio diretamente com as ferragens estruturais de uma edificação.

2.3 – NORMAS NACIONAIS & NORMAS INTERNACIONAIS APlicáveis

Os captadores baseados na hipótese que os E.S.E. não são previstos em nenhuma normativa nacional. Tão pouco, normas internacionais que normatizam esta área de engenharia. Nem na norma da IEC 60364, esse elemento hipotético é contemplado e aceito.

Salientamos que as normas francesas, normas espanholas, e, normas portuguesas são normas estrangeiras. Neste caso, não tendo validade junto ao Brasil, ao Código do Consumidor, Código Civil, Escola Nacional de Inspetores do Trabalho, e, Ministério Público do Trabalho. o do trabalho aparecerá também no cabeçalho da página dois em diante.

Nota: Portugal, Espanha e França são países que quase não cai raios, seus índices são baixíssimos

CÓDIGO DO CONSUMIDOR – CDC

Lei Federal Nº 8078 de 1990

Aqui o desrespeito a lei do CDC é muito gritante.
Art. 39

É vedado ao fornecedor de produto ou serviços, dentre outras práticas abusivas:

VIII – Colocar no mercado de consumo, qualquer produto ou serviço em desacordo com as normas expedidas pelos órgãos competentes ou, se normas específicas não existirem, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas ou outra entidade credenciada pelo Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (CONMETRO);

CONFEA / CREA

Código de Ética Profissional

Das condutas vedadas

Artigo 10

No exercício da profissão são condutas vedadas ao profissional

V) ante o meio

a) prestar de má-fé orientação, proposta, prescrição técnica ou qualquer ato profissional que possa resultar em dano ao ambiente natural, à saúde humana ou ao patrimônio cultural.

Ainda temos:

Resolução Nº 1134-21 29/10/2021

Art. 2º Constituem princípios da fiscalização do Sistema Confea/Crea:

I – Risco Social e Proteção à Vida, segundo o qual as situações ou os **empreendimentos que possam gerar riscos à sociedade e ao meio ambiente** devem ser **fiscalizados de forma prioritária** mediante **ações preventivas voltadas a minimizar a ocorrência de sinistros ou desastres**.

4.0 – FIGURAS E TABELAS

Os distribuidores de soluções baseadas na hipótese que os E.S.E. funcionam apresentam inúmeros laudos, porém não são laudos mas simples declarações de que foram instalados, normalmente declarações fornecidos por seus clientes e, certificações de laboratórios, tipo UL (underwriters laboratories – testes de segurança em qualquer tipo de produto) para a certificação de parte dos componentes para a construção, e, construídos dos E.S.E. Mas baseados na simples hipótese dos E.S.E. não a certifica que tem efetiva, e, eficiente funcionalidade como captadores e muito menos comprova a sua hipótese. Apenas a padronização da produção.

Cabe ressaltar que um PDA (NBR 5419) é um sistema de proteção, e, o fato de um dos componentes receber uma "certificação isolada", de um laboratório

2/3

de produtos, jamais vai significar que um sistema projetado e construído na hipótese que os E.S.E. quaisquer proteções desejada.

5.0 – RADIOEMISSÃO

Os captores baseados na hipótese que os E.S.E e similares, são emissores de radiofrequência, colocando todos os equipamentos diretamente na alçada da ANATEL.

Além de atender as regulações nacionais de emissão de radiofrequência é necessário realizar estudos sobre a exposição humana a radiação não ionizante emitida por Captores E.S.E., e, similares.

Na hipótese de que os Captores E.S.E. sejam efetivamente ativos, temos que lembrar da navegação aérea, onde com os equipamentos aviônicos, seja em aviões e helicópteros comerciais militares.

Estes equipamentos utilizam dispositivos e sistemas equipamentos de aviônica e aeronavegabilidade que trabalham sobre requisitos de segurança e compatibilidade eletromagnética muito rígidos. Envolvendo órgãos de organizações nacionais e internacionais como ANAC, Ministro da Defesa, FCC, FAA, OACI.

Lembrando que a interferência dos Captores E.S.E., e, similares podem interferir na emissão de sinal de sistemas de TV, Rádio, Radiocomunicação, tanto civil como o uso das forças de segurança e militares.

A emissão gerada pelos Captores E.S.E., e, similares podem causar interferências vôo de aviões, helicópteros, e, drones. Havendo a possibilidade de falhas catastróficas envolvendo aviação civil, e, militar.

As próprias normas que tratam dos Captores E.S.E., e, análogos não prescrevem as precauções para instalações próximas aos aérodromos, e, aerovias.

Dentro da Emissão Eletromagnética não é explicado, ou, apresentado qualquer informação sobre equipamentos biomédicos. O exemplo mais gritante são os marca passos de uso por cardiopatas.

6.0 – CONCLUSÕES

A comprovação efetiva do funcionamento da hipótese dos captores de emissão de um líder ascendentes depende de comprovação científica, séria e não de textos aleatórios (fake News) como os fabricantes têm espalhados pelo Brasil.

Primeiro que é possível captar os raios em experimentos de campo. Conduzidos nas condições dos climáticos do Brasil. Dentro de critérios técnicos científicos que possam produzir as evidências necessárias. Com a repetibilidade necessária para aferir que não se trata de evidência anedótica ou milagrosa. Toda comprovação de hipótese deve ser repetível, e, verificável.

Some-se a isto a comprovação da repetibilidade do fenômeno. Pois, através de seguidas experimentações será possível verificar o funcionamento efetivo da hipótese dos captores de

emissão de líder ascendentes (E.S.E. e Congêneres). Lembrando que experiências conduzidas nos laboratórios de campo da NFPA demonstraram apenas evidência anedótica da hipótese dos captores de emissão de líder ascendentes (E.S.E. e Congêneres).

As experimentações conduzidas pelo Físico Professor Marcelo Saba junto ao INPE apontam através da utilização de câmeras ultrarrápidas que estamos mais do que certos ao condenarmos esse tal de ESE e similares.

Salienta-se que não é explicada pelos fabricantes de ESE como os reduzem as tensões de Passo, e, Tensão de Toque geradas durante uma Descarga Atmosférica.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] *Manual de auxílio na interpretação e aplicação da nova NR-10*. Joaquim Gomes Pereira e João José Barrico de Souza. Editora LTr, 2005, Rio de Janeiro, RJ.

[2] Konescki, Anderson; Alves, Normando; Santos, Sergio Os Perigos Causados pela Utilização de Sistemas Não Convencionais de Captação de Descargas Atmosféricas. Rangel Jr., Estellito “Mayor seguridad en los trabajos de mantenimiento eléctrico”. *NFPA Journal Latinoamericano*, vol 1, no. 16, setembro 2002, NFPA International, pg. 38 - 39.

[3] Saba, Marcelo M. F. UPWARD LEADERS AND LIGHTNING ATTACHMENT PROCESS IN COMMON BUILDINGS

[4] Silva, José Claudio de, STUDY OF A LARGE-SCALE EXPERIMENT TO PROVE OR DISPROVE THE ALLEGEDSUPERIOR PERFORMANCE OF ESE AIR TERMINALS

[5] Alves, Normando, Almeida, Gabriel S.A., Dantas, João Belisário, ARE THERE ADVANTAGES IN USING EARLY STREAMER EMISSION AIR TERMINALS INSTEAD OF AFRANKLIN ROD CONSIDERING THE UPWARD POSITIVE LEADER PROPAGATION SPEED?



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo – SP

IMPLEMENTAÇÃO DE ENSAIOS DE TIPO PARA VESTIMENTAS CONDUTIVAS CLASSE 2 SEGUNDO A IEC 60895:2020

IMPLEMENTAÇÃO DE ENSAIOS DE TIPO PARA VESTIMENTAS CONDUTIVAS CLASSE 2 SEGUNDO A IEC 60895:2020

André Luis Costa França
Eletrobras Eletronorte

andre.franca@eletronorte.com.br

Marcelo Melo da Costa
Eletrobras Eletronorte

marcelo.melo@eletronorte.com.br

Thiago Brito Pereira da Silva
Eletrobras Eletronorte

thiago.brito@eletronorte.com.br

RESUMO

O presente artigo mostra as diferenças entre a normatização brasileira e a internacional para certificação de vestimentas condutivas de uso em trabalho ao potencial, bem como o processo de implantação do ensaio para vestimentas classe 2 no Centro de Tecnologia e Inovação da Eletrobras Eletronorte. Tal processo envolve, além de características técnicas das vestimentas, a adequação de métodos de ensaios utilizados na normatização brasileira e na internacional, a fim de derrubar barreira técnico-legal para comercialização e uso de vestimentas condutivas classe 2 (classificação existente apenas em norma internacional), adequadas à execução de atividades em linhas de transmissão energizadas em tensões superiores à 800 kV AC / 600 kV DC existentes no Brasil.

1.0 – INTRODUÇÃO

Vestimentas condutivas têm por função proteger o trabalhador, fornecendo uma blindagem eletromagnética quando este exerce atividades ao potencial em linhas de transmissão energizadas. Por se tratar de um Equipamento de Proteção Individual (EPI), este deve ter seu uso aprovado pelo Ministério do Trabalho, através da solicitação e da emissão de um Certificado de Aprovação (CA), sem o qual não é permitida a sua comercialização em território nacional. Para emissão do CA, o modelo de EPI deve passar por testes que comprovem sua adequação ao uso pretendido, em concordância com o previsto no item 6.9 da Norma Regulamentadora 06 [2]. Estes testes são os chamados ensaios de tipo. No Brasil, o Centro de Tecnologia e Inovação da Eletrobras

Eletronorte tem sido historicamente o laboratório que é demandado para realização destes ensaios elétricos para os fabricantes e importadores de vestimentas condutivas, cujo relatório de ensaio compõe o processo de pedido de CA destas vestimentas.

Para vestimentas condutivas, tais ensaios são realizados em conformidade com a norma ABNT NBR 16135:2012, que regulamenta vestimentas condutivas para uso em linhas com tensões nominais até 800 kV AC e ± 600 kV DC. Entretanto, no Brasil, existem linhas de transmissão que possuem tensões superiores a estes valores, como por exemplo a Linha de Transmissão CC ±800 kV Xingu / Estreito com extensão de 2.086 km que atravessa quatro estados – Pará, Tocantins, Goiás e Minas Gerais [1].

A ausência de normatização de vestimentas condutivas para uso em níveis de tensão superiores aos previstos na ABNT NBR 16135:2012, somada ao fato de até então não existir no Brasil nenhuma vestimenta com CA para trabalhos em linhas de tensão acima de 800 kV AC e ± 600 kV DC, configura uma barreira técnica para o exercício regular de atividades com estas linhas energizadas.

Diante desta dificuldade, no 2º semestre de 2021, foi solicitado ao Laboratório de Ensaios em Equipamentos de Segurança do Centro de Tecnologia e Inovação da Eletrobras Eletronorte realizar ensaios de tipo em um modelo de vestimenta condutiva classificada como classe 2, segundo a IEC 60895:2020: Live Working – Conductive Clothing. Esta norma classifica as vestimentas condutivas quanto à máxima tensão da linha para qual elas foram projetadas, sendo as de classe 1 até 800 kV AC e ± 600 kV DC e a classe 2 1.000 kV AC e ± 800 kV DC.

IMPLEMENTAÇÃO DE ENSAIOS DE TIPO PARA VESTIMENTAS CONDUTIVAS CLASSE 2 SEGUNDO A IEC 60895:2020

Entretanto, apesar da ABNT NBR 16135:2012 ser baseada na versão IEC 60895:2002 (portanto versão anterior a norma de 2020 vigente, que prevê a vestimenta classe 2), a norma brasileira apresenta algumas modificações nos métodos de ensaio da norma internacional de 2002, e o Laboratório aplica estas alterações nacionais nos seus métodos de ensaio.

Neste contexto, o presente artigo descreve os métodos previstos na IEC 60895:2020 e suas adaptações para a realidade de procedimentos e estrutura existentes no Laboratório da Eletrobras Eletronorte, que atendem os requisitos da ABNT NBR 16135:2012, a fim de atestar a conformidade de vestimentas condutivas com os critérios da classe 2 previstas na IEC 60895:2020 e consequente solicitação de CA para este EPI, derrubando a barreira técnica de uso para trabalho ao potencial nestes níveis de tensão. Tais estudos podem servir de base para a uma eventual atualização da ABNT NBR 16135:2012, visando a adequação à versão mais recente da IEC 60895, e aplicando as adaptações necessárias para viabilizar a execução nacional destes ensaios de tipo em vestimentas condutivas.

2.0 – As normas ABNT e IEC para vestimentas condutivas

Para o entendimento das diferenças e posterior análise dos impactos dos métodos nos resultados dos ensaios, faz-se necessário conhecer os métodos previstos na norma nacional e internacional para vestimentas condutivas. O item 2.1 tratará dos métodos e requisitos previstos na ABNT NBR 16135:2012. O Item 2.2 tratará dos constantes na IEC 60895:2020. No item 2.3 será feito um comparativo entre os métodos e requisitos das duas normas, e por fim no item 2.4 será mostrada a implementação do ensaio de vestimenta condutiva no Centro de Tecnologia e Inovação da Eletrobras Eletronorte.

2.1 - A ABNT NBR 16135:2012:

A norma brasileira que trata sobre vestimenta condutiva é a ABNT NBR 16135:2012 – Trabalhos em linha viva - Vestimenta condutiva para uso em tensão nominal até 800kV c.a. e \pm 600kV d.c (IEC 60895:2002, MOD). Pelo título, é possível notar que ela foi baseada na versão da IEC 60985 publicada em 2002 (que já foi atualizada para a versão 2020, e terá seu conteúdo explorado no item 3 deste artigo), além de incluir modificações que serão destacadas mais adiante.

Além de requisitos técnicos para a construção destas roupas, a norma também estabelece métodos de ensaio, com critérios de aceitação para cada um destes, para a aprovação

do uso da vestimenta nos níveis de tensão especificados.

Os ensaios previstos podem ser de rotina ou de tipo. Para emissão de CA, os ensaios de tipo devem ser realizados. A norma prevê a execução de ensaios em:

- Material condutivo, ou seja, o tecido do qual a vestimenta é fabricada;
- Peças da vestimenta condutiva, como por exemplo, calça, camisa etc.;
- Partes componentes condutivas, como meias e luvas;
- Vestimenta completa;

Cada um destes itens tem uma lista de ensaios que devem ser realizados, conforme consta no anexo B da referida norma. O Centro de Tecnologia e Inovação da Eletrobras Eletronorte realiza apenas os ensaios elétricos nestes itens, e dentre estes os ensaios de maior relevância são os realizados na vestimenta completa (previstos no item 7 da norma), com destaque ao ensaio de eficiência de blindagem (item 7.2 da norma).

Nestes ensaios, deve-se utilizar um manequim coberto com uma camada de fita condutora (simulando o um corpo humano), coberta por uma outra camada de material isolante (fita PVC ou um traje isolante). O EPI completo deve ser vestido no manequim como se fosse ser utilizado em campo, inclusive garantindo que o contato entre as partes componentes da vestimenta esteja adequado. Após esse preparo, são realizados os ensaios descritos a seguir.

2.1.1 – Ensaio de resistência elétrica de contato

Neste ensaio são verificadas as resistências de contato entre as partes integrantes da vestimenta. Resumidamente, aplica-se uma corrente de 200 mA por 1 minuto e mede-se a queda de tensão no contato com um voltímetro. Com estes dados, calcula-se a resistência de contato entre as partes. Estas resistências devem ser inferiores à 100 ohms.

2.1.2 – Ensaios de eficiência de blindagem

Este ensaio possui 2 métodos previstos na norma: um método principal (previsto na IEC 60958:2002) e um método alternativo previsto apenas na ABNT NBR 16135:2012. Em ambos os métodos são medidas duas correntes:

- A corrente total I_1 fluindo entre o manequim e a vestimenta;
- A corrente I_2 fluindo apenas no manequim;

É importante ressaltar que, para que seja possível medir a corrente, o amperímetro fica ao potencial, e deve ser protegido por uma gaiola de cobre, sendo necessária a utilização de um medidor portátil à bateria / pilhas.

IMPLEMENTAÇÃO DE ENSAIOS DE TIPO PARA VESTIMENTAS CONDUTIVAS CLASSE 2 SEGUNDO A IEC 60895:2020

De posse dos valores de corrente medidos, calcula-se a eficiência de blindagem para os dois métodos da mesma maneira. Esta deve atender o critério da equação 01 abaixo:

$$\frac{I_1}{(I_1+I_2)} \times 100 \geq 99\% \quad \text{equação 01}$$

A diferença entre o método principal e o alternativo é que a tensão de ensaios no método principal a tensão de ensaios é de 462 kV AC (equivalente à maior tensão fase-terra para qual a roupa é usada), sendo necessário uma fonte e instalações físicas adequadas para este nível de tensão. No método alternativo, são aplicados níveis de tensão de 10 kV, 20 kV, 30 kV, 40 kV e 50 kV, onde a eficiência de blindagem é calculada para cada nível de tensão, e verifica-se se a média das eficiências de blindagem atendem o critério acima.

2.2 – A IEC 60895:2020:

A versão de 2020 desta IEC trouxe como novidade a diferenciação das vestimentas em duas classes. A classe 1 é para tensões de até 800 kV AC e ± 600 kV DC, já prevista nas versões anterior e na norma brasileira, e a classe 2 para tensões de até 1000 kV AC e ± 800 kV DC, com principal característica construtiva a obrigatoriedade de uma proteção facial (*face screen*) para proteção da face do trabalhador, bem como melhora na eficiência de blindagem [3] - [5].

Dentre várias diferenças nos ensaios elétricos, as de maior impacto foram nos testes de eficiência de blindagem. A inclusão de um método alternativo que é diferente do previsto na norma brasileira e a mudança no cálculo da eficiência de blindagem. Assim, a IEC 60895:2020 prevê dois métodos, sendo que em caso de discordância, o primeiro método é considerado como de referência.

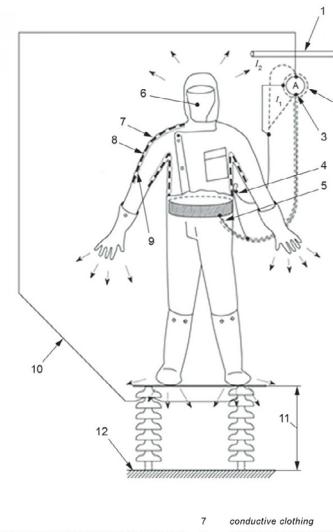
2.2.1 – Eficiência de blindagem pelo primeiro método, ou método principal

Esse método, que é semelhante ao método principal previsto na norma nacional, consiste na aplicação da máxima tensão fase-terra para qual a roupa foi projetada, que são de 462 kV AC para vestimentas classe 1 e 578 kV AC para vestimentas classe 2. Este método também exige equipamentos e infraestrutura adequada para ensaios neste nível de tensão. A figura 01 mostra a configuração para realização do ensaio por este método.

A maior mudança foi na forma de cálculo da eficiência de blindagem, agora denominada e *ECC* – *Efficiency of conductive clothing*, que passa a ser calculada em decibéis conforme a equação

02, e tem como critério de aceitação 40 dB para classe 1 e 50 dB para classe 2.

$$ECC = 20 \log_{10} \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \quad \text{equação 02}$$



Key	
1	potential
2	screened micro-ammeter (suspended from the neck of the mannequin, the screening is connected electrically to the conductive clothing)
3	contact: banana-type plug
4	connecting terminal on suit
5	connecting terminal on mannequin (through a belt made of conductive clothing worn next to the mannequin – 10 cm wide)
6	conductive face screen or any other means to protect the face
7	conductive clothing
8	insulating overall (total mannequin)
9	conductive mannequin's surface (total mannequin)
10	equipotential connection from "potential" to the insulated platform by which the mannequin is supported, to by-pass any leakage current through the insulation.
11	insulation between the two terminals
12	earth (electrical ground)
I_1	total current flowing between the live electrode and the conductive clothing connected to its conductive belt
I_2	current flowing between the live electrode and the conductive belt

NOTE: The insulation between the two terminals is checked before and after every test.

Figura 01 – Esquema sugerido para método principal de ensaio de eficiência de blindagem

2.2.2 – Eficiência de blindagem pelo segundo método, ou método alternativo

Este método alternativo especifica que o manequim com a vestimenta condutiva seja submetido a um campo elétrico homogêneo com amplitude de 100 kV/m. Para tal, a IEC sugere que seja posicionado um condutor energizado a aproximadamente 300 mm do manequim, e a uma altura de aproximadamente 200 mm abaixo da linha dos ombros.

Tanto para a vestimenta classe 1 quanto para a vestimenta classe 2, a tensão aplicada no condutor energizado é de 30 kV. São medidas duas correntes: a corrente que passa pela roupa ($I_{clothing}$) e a corrente que passa pelo manequim (I_{body}), conforme esquema da figura 02.

Uma das vantagens deste método é que, diferente dos demais vistos anteriormente, o instrumento de medição de corrente não fica ao potencial, permitindo o uso de instrumentos de bancada para realizar a medição.

Para melhor visualização, a figura 02 foi extraída da IEC 60895:2020

IMPLEMENTAÇÃO DE ENSAIOS DE TIPO PARA VESTIMENTAS CONDUTIVAS CLASSE 2 SEGUNDO A IEC 60895:2020

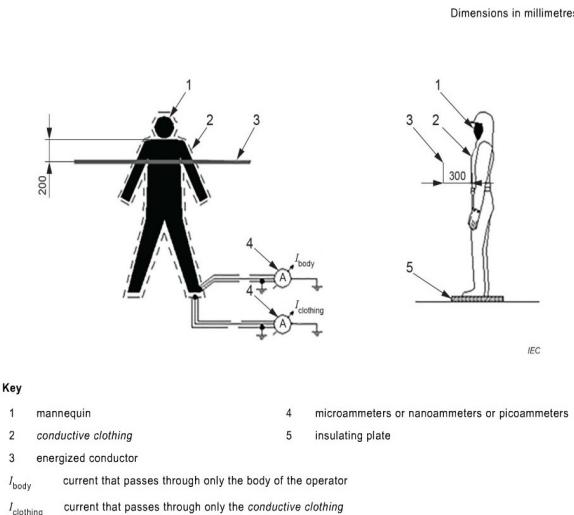


Figura 02 – Esquema sugerido para método alternativo de ensaio de eficiência de blindagem

Diferente do método principal, o *ECC* aqui é calculado pela equação 03:

$$ECC = 20 \log_{10} \left(\frac{I_{clothing} + I_{body}}{I_{body}} \right) \quad \text{equação 03}$$

2.3 – COMPARANDO O MÉTODO DA ABNT NBR 16135:2012 COM O MÉTODO DA IEC 60895:2020:

Assim, é notório que entre as duas normas existem atualmente 3 métodos de realização dos ensaios de vestimenta condutiva, sendo que um desses métodos tem critérios de aceitação diferente entre si.

Assim, pode-se citar as semelhanças entre os métodos principais da norma brasileira e da norma internacional:

- uso da máxima tensão fase terra no ensaio;
- o amperímetro fica ao potencial.

Quanto as diferenças, destaca-se:

- Critério de aceitação: 99% para a ABNT e para IEC 40 dB (classe 1) e 50dB (classe 2), com formas de cálculo diferentes.

Considerando os métodos alternativos previstos nas duas normas, a semelhanças é apenas a forma de cálculo da eficiência de blindagem. Quanto as diferenças, essas são várias em função da considerável diferença do método de execução dos ensaios. São elas:

- Nível de tensão aplicada: 10 kV, 20 kV, 30 kV, 40 kV e 50 kV para a ABNT, e para a IEC apenas 30 kV;
- Ponto de aplicação da tensão: Diretamente no conjunto manequim / vestimenta para a ABNT, para a IEC em condutor sem

contato direto com o conjunto manequim / vestimenta;

- Critério de aceitação: 99% para a ABNT e para IEC 40 dB (classe 1) e 50dB (classe 2);

2.4 – A IMPLEMENTAÇÃO DO ENSAIO SEGUNDO A IEC 60895:2020:

O Centro de Tecnologia e Inovação sempre utilizou o método alternativo da ABNT NBR 16135:2012 para realização dos ensaios em vestimenta condutiva, seja para ensaios de rotina, seja para ensaios de tipo. Com a demanda para realização de ensaios para uma vestimenta classe 2 de acordo com a IEC 60895, fez-se necessário a adaptação do laboratório para realização seguindo um procedimento diferente. A elevada tensão de ensaios prevista no método principal desta norma levou a escolha do uso do método alternativo para execução dos ensaios, que poderia ser realizado com equipamentos já existentes no laboratório, com apenas algumas adaptações, como o suporte para o manequim, e outro para o condutor energizado. Foi utilizado também um multímetro de bancada calibrado que era usado em ensaios de outros equipamentos.

As fotos abaixo mostram como tradicionalmente são feitos os ensaios de vestimenta (figura 03) e como a implementação dos ensaios da vestimenta classe 2 (figura 04), com destaque para a diferença construtiva quando comparadas às vestimentas classe 1: a exigência do *face screen* (figura 05).



Figura 03 – Ensaio de vestimentas condutivas usualmente executado no Centro de Tecnologia e Inovação da Eletrobras Eletronorte

IMPLEMENTAÇÃO DE ENSAIOS DE TIPO PARA VESTIMENTAS CONDUTIVAS CLASSE 2 SEGUNDO A IEC 60895:2020



Figura 04 – Ensaios de vestimentas condutivas segundo método alternativo da IEC 60985, com a presença do condutor energizado



Figura 05 – Vestimenta classe 2, com destaque para o *face screen* obrigatório.

3.0 – CONCLUSÕES

O primeiro ponto a ser discutido, que tem o viés da legalidade dos ensaios deste EPI, é a necessidade de atualização da ABNT NBR 16135:2012 para previsão da vestimenta classe 2. Em reuniões ocorridas com o Ministério do Trabalho, a ausência da normatização brasileira para esta classe de vestimenta foi tema tratado durante a elaboração da portaria Nº 672 de 08/11/2021, que dentre outras, regulamenta procedimentos de avaliação de equipamentos de proteção individual, previstos na Norma Regulamentadora nº 6 (NR 06), caso o qual se enquadra a vestimenta condutiva, na qual foi incluída de maneira excepcional a IEC 60895, em função de ausência de previsão em norma nacional para casos de vestimentas classe 2. Do ponto de vista da execução técnica dos ensaios, quando comparados, os métodos alternativos das duas normas têm execução

consideravelmente diferentes, mas tem formas de cálculo da eficiência de blindagem muito semelhantes. Em função disso, o Centro de Tecnologia e Inovação da Eletrobras Eletronorte, para fins de estudos, realizou os ensaios das vestimentas classe 2 também pelo método alternativo previsto ABNT NBR 16135:2012. Estes resultados podem fomentar o comitê técnico da ABNT para elaborar a revisão com atualização da norma nacional, visando a adequação com a versão da IEC 60985:2020, e quem sabe a adoção do método alternativo previsto na atual norma nacional. Para tal, seria necessário a validação deste método em comparação aos métodos já previstos na IEC. Entretanto os resultados atuais ainda são poucos para que tal validação seja confiável, uma vez que apenas 2 vestimentas diferentes passaram até o presente momento por estes ensaios. Dessa maneira, é oportuno que à medida em que novas vestimentas classe 2 forem ensaiadas, que sejam realizados os testes nos 2 métodos, a fim de fornecer ao comitê responsável pela revisão e atualização da norma dados suficientes para uma eventual inclusão de método na norma nacional, como já foi feita na versão atualmente vigente.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *Primeiro bipolo de transmissão de ±800 kV UHVDC entra em operação com dois meses de antecedência.* Acessado em 28/06/2023. Disponível em <https://www.bmte.com.br/primeiro-bipolo-de-transmissao-de-%c2%b1800-kv-uhvdc-entra-em-operacao-com-dois-meses-de-antecedencia/>.
- [2] Pantaleão, Sérgio. *EPI - Equipamento de proteção individual - não basta fornecer, É preciso fiscalizar.* Acessado em 28/06/2023. Disponível em <https://www.guiatrabalhista.com.br/tematicas/epi.htm>.
- [3] Gábor Göcsei, Bálint Németh, István Berta, *Inspection of the efficiency of conductive clothing examination*, Journal of Electrostatics, Volume 88, 2017, Pages 121-126,
- [4] R. Malgesini et al., "Conductive clothing for live line working," 2014 11th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM), Budapest, Hungary, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICOLIM.2014.6934340.
- [5] L. Barbieri et al., "A comprehensive analysis of facial screens: Sensitivity analysis and construction technologies," 2017 12th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM), Strasbourg, France, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICOLIM.2017.796413



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

AUDITORIA INTERNA DE BARREIRAS DE SEGURANÇA DE PROCESSOS

André Reis
Vale S.A.
andre.reis@vale.com

RESUMO

A auditoria interna de barreiras, é utilizada pelas empresas como meio de identificar se os procedimentos internos, políticas, sistemas contábeis e controles internos estão sendo efetivamente seguidos. Ela é aplicável durante todo o ciclo de vida de segurança, mas, principalmente, durante a etapa de operação das instalações, levando em consideração requisitos ligados à legislação, à regulação e, também, corporativos. Sua frequência varia, dependendo de diversos fatores, dentre eles, o nível de maturidade de implantação do sistema de gerenciamento da RBPS e a experiência baseada no desempenho do PSM e resultados de auditorias anteriores.

Os resultados do trabalho da Auditoria, além de se constituírem em algo precioso para a apoiar os gestores, fornecem recomendações corretivas e preventivas à exposição da empresa, face aos riscos empresariais que podem ser de natureza sistêmica, operacional, financeira, tecnologia da informação, recursos humanos, mercadológicas e de fatores externos que podem impactar os resultados e estratégias da empresa.

O trabalho eficaz da auditoria interna de barreiras, libera os gestores para a condução e o gerenciamento dos negócios, permitindo-lhes exercer com segurança o processo decisório sobre as importantes transações empresariais.

1.0 – INTRODUÇÃO

Uma auditoria interna de barreiras é uma revisão sistemática e independente para verificar a conformidade com as diretrizes ou normas estabelecidas. Emprega um processo de revisão bem definido para garantir consistência e permitir que o auditor chegue a conclusões defensáveis.

A função básica da auditoria é elaborar diagnósticos que permitem visualizar e avaliar a

situação da empresa ou setor auditados, de acordo com o desempenho identificado.

O auditor interno é um funcionário da empresa, e dentro da organização ele não deve estar subordinado àqueles cujo trabalho examina. Para que não haja interferência, o auditor interno não deve desenvolver atividades que possa vir um dia a examinar.

Uma Auditoria de PSM, entende-se por um conjunto de métodos formais de avaliação de desempenho dos sistemas de gerenciamento da RBPS, abrangendo o planejamento, execução e documentação, ocorrendo periodicamente e provendo o gerenciamento das ações relativas às recomendações e observações.

Os principais resultados esperados de uma auditoria de barreiras são:

- Análise de lacunas identificadas para cada elemento;
- Comunicação de resultados e feedbacks;
- Medição de desempenho;
- Monitoramento da melhoria contínua do programa PSM;
- Redução do risco de segurança do processo;
- Formação de Auditores;
- Compartilhamento de práticas bem-sucedidas ou recomendadas;

Auditorias internas de barreiras, devem ser realizadas com periodicidade definida, para verificar se os padrões e práticas estão adequados e se estão sendo seguidos. Elas devem ser conduzidas por, no mínimo, um profissional com conhecimento no assunto da barreira a ser auditada.

Um relatório referente às auditorias de conformidade deve ser emitido, incluindo todo o escopo e evolução da inspeção, além de um plano de ação com ações de correção ou de recomendações.

A Organização deve manter os relatórios de auditoria arquivados para futuras auditorias e consultas.

2.0 – AUDITORIAS INTERNAS DE BARREIRAS DE SEGURANÇA DE PROCESSOS

Para a realização das auditorias internas de barreiras, utilizamos como critérios técnicos algumas normas e documentos conhecidos mundialmente e alguns documentos e normas internas das empresas.

2.1 – RPBS (SEGURANÇA DE PROCESSOS BASEADO EM RISCO)

O RBPS [1] tem por objetivo ajudar as organizações a projetar e implantar sistemas mais efetivos de gestão de segurança de processo. A estrutura se baseia nas ideias de gestão de segurança de processo publicadas pelo CCPS ao final da década de 1980, integra as lições aprendidas ao longo dos anos, aplica os princípios do sistema de gestão de “Planejar, Fazer, Verificar, Agir”, e os organiza de uma maneira que serão úteis para todas as organizações ao longo do ciclo de vida de um processo ou operação.

A estrutura do RBPS é composta por 4 pilares e 20 elementos conforme a figura 1.



Figura 1: Pilares e elementos do RBPS.

A figura 2 é outra forma de representar os pilares e elementos do CCPS como um PDCA:



Figura 2: Pilares e elementos do CCPS.

2.2 – ISO-31000

A ISO-31000 [2] é uma norma internacional que fornece as diretrizes para gerenciar os riscos

enfrentados pelas organizações ao longo do ciclo de vida. Essa norma estabelece que o gerenciamento dos riscos se baseia nos princípios, estrutura e processos conforme a figura 3 abaixo.

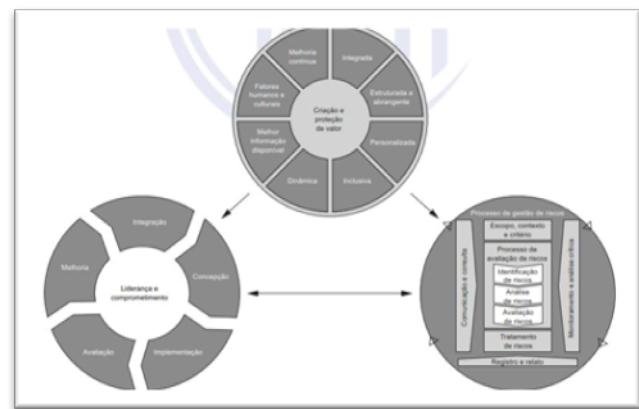


Figura 3 – Princípios, estrutura e processo da ISO-31000

2.3 – CCM (GESTÃO DE CONTROLE CRÍTICO)

O CCM [3] da ICMM, é um guia para:

- Identificar controles críticos;
- Avaliar sua adequação;
- Atribuir responsabilidades para sua implementação;
- Verificar sua eficácia na prática;

Ele consiste em 9 etapas das quais 6 são requeridas para planejar o programa de CCM antes de implantá-lo nas 3 últimas etapas, conforme a figura 4.

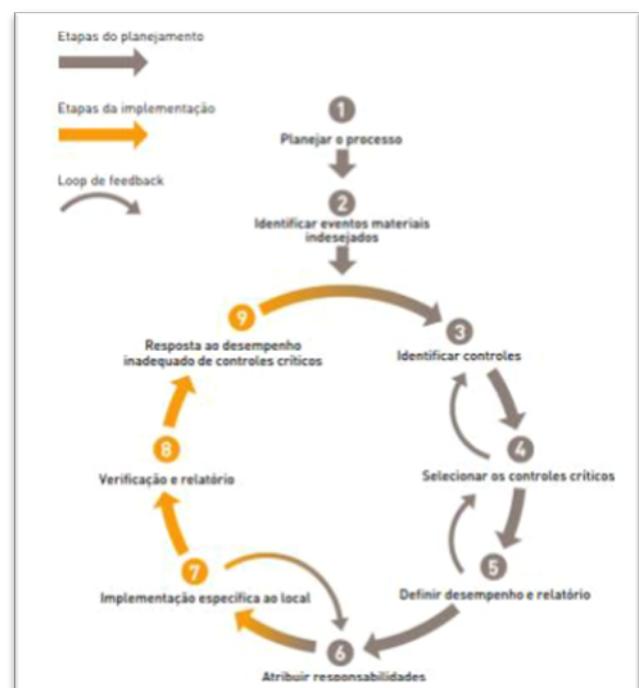


Figura 4 – O processo de gestão de controles críticos

Esse artigo aborda somente a etapa 8 e 9, mas cabe destacar que todas as etapas são de extrema importância para a implantação e gerenciamento dos controles críticos.

A etapa 8 (verificação e relatório), refere-se à implementação das atividades de verificação e relato do status de cada controle.

A etapa 9 (resposta ao desempenho inadequado do controle) refere-se a endereçar o desempenho do controle. O dono do controle e dono do risco devem estar cientes do desempenho do controle. Se houver um incidente ou em um teste, o controle crítico não estiver funcionando, deve-se investigar e tomar ações para melhorar o desempenho, alterar o status ou até mesmo remover o controle. Lições aprendidas, dados e informações da investigação devem ser usados para melhorar continuamente o gerenciamento do controle.

A ausência de acidentes não deve ser considerada evidência de que os controles estão funcionando adequadamente. Onde há mais de um controle, um controle pode falhar sem qualquer incidente devido à redundância nos controles. Por esse motivo é necessário a verificação e teste, para detectar controles que estão com baixo desempenho de acordo com os requisitos especificados.

A falha do controle crítico pode levar a uma revisão do projeto do controle para verificar o atendimento aos objetivos documentados e requisitos de desempenho.

3.0 – PROCEDIMENTO / ORIENTAÇÕES PARA A REALIZAÇÃO DAS AUDITORIAS INTERNAS DE BARREIRAS DE SEGURANÇA DE PROCESSOS

Na etapa de identificação dos riscos são definidos os controles críticos e elaborado o documento “one pager”, que é um sumário com informações sobre o controle.

Inicialmente, o one pager é o documento base para definição dos ativos críticos associados ao controle crítico. O time de engenharia recebe os one pager dos controles críticos e classifica os itens no sistema informatizado de manutenção.

Para controles avaliados como complexos pela equipe multidisciplinar é necessário detalhar o one pager em documentos específicos, com os passos, recursos, frequências e responsabilidades, para realização do teste do controle.

A abrangência de riscos, controles críticos, one pager e detalhamento do teste do controle crítico, deve ser avaliada por equipe multidisciplinar. As adequações para atender aos requisitos específicos de cada unidade/área/equipamento devem ser gerenciadas via gestão de mudanças.

O dono do risco nomeia o dono do controle, conforme definição de critérios detalhados no item

6, que utiliza o one pager e o documento detalhado para realizar a verificação e teste do controle conforme frequência estabelecida na avaliação do risco.

A figura 5, mostra um exemplo de one pager de um controle:

Figura 5 – One pager do controle

4.0 – VERIFICAÇÃO E TESTE DAS BARREIRAS DE SEGURANÇA DE PROCESSOS EM CONTROLES CRÍTICOS

As verificações dos controles críticos devem ser feitas pelo dono do controle na frequência estabelecida no one pager e cadastrada no BWise.

O one pager é o documento detalhado para a realização dos testes. Após a conclusão, o resultado com as devidas evidências precisa ser registrado no BWise.

A saúde dos controles críticos é acompanhada através do BWise, dashboards, FMDS das áreas, reuniões e comitês.

4.1 – SE FOREM IDENTIFICADAS ANOMALIAS E OU DEFICIÊNCIAS NO CONTROLE

O dono do controle ou dono do risco, deve mudar imediatamente o status do controle em situações de risco grave e iminente e comunicar conforme NOR-0003-G e informar ao ponto focal de risco ou especialista de risco da unidade.

4.2 – CONTINGÊNCIAS

A resposta imediata ao desempenho inadequado de um controle crítico é iniciada quando o seu desempenho atinge um limite definido pelo seu one pager. A resposta pode incluir a suspensão ou o encerramento de parte de uma operação, desvio de materiais ou redução da taxa de produção, enquanto as medidas necessárias são tomadas.

A equipe multidisciplinar deve consultar/avaliar o bowtie para verificar outros controles críticos que atuam de barreira na mesma causa no bowtie até que o controle volte a funcionar.

Se não existirem outros controles, é necessário definir contingências que devem ser revisadas e aprovadas conforme o nível do risco.

As áreas envolvidas/impactadas devem ser comunicadas e/ou treinadas nas contingências.

Deve-se comunicar os stakeholders (ex.: dono do risco, gerente, gerente executivo, COI, manutenção, engenharia, órgão ambiental etc.) sobre as contingências e prazos. O método de comunicação deve ser definido na etapa de gerenciamento de mudanças.

4.3 – AUDITORIA INTERNA E INSPEÇÃO DE DEFESA

Auditorias e Inspeções de defesas podem ser realizadas por toda equipe e garantir a participação de todas as linhas de defesa da empresa.

As frequências e cronogramas de auditoria são definidos por cada área e a operação e a manutenção devem suportar as auditorias.

Diretrizes detalhadas de auditoria envolvendo as linhas de defesa deverão ser consideradas conforme PNR-000112 Gerenciamento de controles críticos [7].

4.5 – PAPEIS E RESPONSABILIDADES

Os papéis e responsabilidades da gestão de riscos estão estabelecidos na POL-0009 [9] e NOR-003-G [5].

Adicionalmente, abaixo estão listadas responsabilidades do principais stakeholders:

4.5.1 – DONO DO RISCO

- Indicar donos de controles para os controles críticos dos riscos sob sua responsabilidade;
- Prover recursos para viabilizar o teste de controle pelos donos de controle;
- Acompanhar a saúde dos controles críticos dos riscos sob sua responsabilidade (FMDS, BWise);
- Suportar a implementação de planos e ações para mudar o status do controle crítico para “funciona”;
- Suportar a implementação dessa governança na área sob sua responsabilidade;
- Aprovar a mudança do status do controle (Gerenciamento de mudanças);
- Indicar backup para o dono do controle;

4.5.2 – DONO DO CONTROLE

- Elaborar e revisar o one pager dos controles sob sua responsabilidade;
- Planejar o(s) teste(s) do(s) controle(s) sob sua responsabilidade;
- Realizar o(s) teste(s) do(s) controle(s) sob sua responsabilidade;
- Reportar o status do controle;
- Iniciar o procedimento descrito na seção 5.2 da governança, envolvendo o coordenador de riscos (focal point) ou especialista de risco da unidade quando identificar situações que impactam o status do controle;
- Informar ao dono do risco a necessidade de treinamento e recursos para realizar o teste do controle;
- Seguir o PRO-027234 e seus anexos para reportar situações que envolvem controles críticos no BWise;
- Iniciar o Gerenciamento de mudanças para alterar o status do controle;
- Iniciar o processo de investigação quando o controle tiver seu status alterado para não funciona;

4.5.3 – COORDENADOR DE RISCOS DA UNIDADE

- Suportar o dono do controle e dono do risco no acompanhamento da saúde dos controles críticos dos riscos da unidade;
- Convocar o especialista de riscos (2^a camada da 1^aLINHA DE DEFESA) e a engenharia (2^a camada da 1^aLINHA DE DEFESA) para avaliarem situações de mudança do status dos controles críticos;
- Suportar o dono do controle para realizar apontamentos no controle crítico no BWise;
- Participar ativamente do grupo de trabalho;
- Revisar o Gerenciamento de mudanças para alterar o status do controle.

4.5.4 – ESPECIALISTA DE RISCOS DA UNIDADE

- Suportar a unidade na avaliação do status do controle crítico;
- Avaliar impacto no risco, devido a mudança de status do controle crítico;
- Revisar com a 2^a linha de defesa, os planos para mudar o status controle crítico para “funciona” e contingências. Obter aprovação, se necessário;
- Liderar o grupo de trabalho;
- Acompanhar a saúde dos controles críticos das unidades sob sua responsabilidade.
- Participar/liderar o comitê de controles críticos.

- Realizar inspeções de defesa.

4.5.5 – ANALISTA DE RISCOS E/OU PMO DE RISCOS

- Coletar dados do BWise para o acompanhamento da saúde dos controles críticos;
- Atualizar o dashboard (BI) gerencial semanalmente;
- Participar do grupo de trabalho.

4.5.6 – ENGENHARIAS

- Supor tar a unidade na avaliação do status do controle crítico;
- Supor tar as unidades na definição dos planos e contingências para mudar o status do controle crítico para funciona;
- Participar ativamente do grupo de trabalho;
- Acompanhar a saúde dos controles críticos das unidades;
- Elaborar os documentos complementares aos one pagers dos controles críticos, se aplicável;
- Garantir que os componentes dos controles críticos e os planos de manutenção estejam cadastrados e ativos no sistema informatizado de manutenção.
- Realizar inspeções de defesa.

4.5.7 – GERENTE DE ÁREA DE RISCOS

- Acompanhar a saúde dos controles críticos dos riscos;
- Supor tar a implementação de planos e ações para mudar o status do controle crítico para “funciona”;
- Supor tar a implementação dessa governança na diretoria;
- Aprovar a mudança do status do controle (Gerenciamento de mudanças).

4.5.8 – 2^a LINHA DE DEFESA ESPECIALISTA

- Supor tar a 1^a linha de defesa na definição/aprovação de planos e contingências para controles críticos de riscos.

5.0 – Exemplos de inspeção de defesa

5.1 – Registro de inspeção de defesa “controle funciona”

This screenshot shows a registration form for an inspection. The top section displays basic information: Código (TST-0004768), Data de Registro (2021/06/22), and Status (Finalizado). The 'Papel de Trabalho' (Workshop Paper) section includes fields for Área Executora (1ª Linha de Defesa - 2ª Camada), Critério de Seleção da Amostra Utilizado (Para a audição do controle, foi realizada uma visita em campo em dia 08/06/2021, analisado os projetos, o sistema informatizado de manutenção - SAP e ativos via Thins para busca de evidências), Descrição da Conclusão (Completa), Descrição do Controle (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) para os 22 autorreferenciadores principais de aeronavegação Nova Linha 6 e VGR), and Desenho correto? (Sim). The 'Resultado do Teste / Test Result' section shows 'O controle é eficaz?' with the answer 'Funciona' highlighted in red.

Figura 6 – Tela de registro de inspeção de defesa

5.2 – Registro de inspeção de defesa “controle não funciona”

This screenshot shows a registration form for an inspection. The top section displays basic information: Código (TST-00047013), Data de Registro (2021/Dez/11), and Status (Finalizado). The 'Papel de Trabalho' section includes fields for Área Executora (1ª Linha de Defesa - 2ª Camada), Critério de Seleção da Amostra Utilizado (OM de inspeção sensível trimestral com relatório em anexo), Descrição da Conclusão (Bacia de contenção de óleo SE-02 Fábrica), and Desenho correto? (Não). The 'Resultado do Teste / Test Result' section shows 'O controle é eficaz?' with the answer 'Não Funciona' highlighted in red.

Figura 7 – Tela de registro de inspeção de defesa

5.3 – Apontamentos e plano de ações “controle não funciona”

This screenshot shows a dashboard for managing findings and actions. The left side shows a table for 'APONTAMENTOS' (Findings) with columns for APON..., ELEM..., HIERO..., RESPO..., SITUA..., and a delete icon. One entry is visible: 'Adequar bacia de conten...' with responsible person MARLON REIS... and status 'Finalizado'. The right side shows a table for 'PLANOS DE AÇÃO' (Action Plans) with columns for PLANO DE A..., INserir dispositivo de supressão de..., Aprovar verba para implantação..., and Realizar visita em campo para.... Several action items are listed.

Figura 8 – Tela de registro de apontamentos e ações

6.0 – CONCLUSÕES

A auditoria interna de barreiras, ou inspeção de defesa, é uma importante ferramenta, ela é considerada como um duplo check de controles, uma vez que essas inspeções não são realizadas pelos responsáveis dos controles e sim por equipe independente. Os resultados das inspeções de defesa são muito importantes para a tomada de decisão e antecipação de possíveis

ocorrências de risco. É aplicada durante todo o ciclo de vida do processo, porém é mais efetiva durante as operações das unidades. Através dos resultados é possível antecipar tomadas de decisões, restrições e ou até paralisação evitando a materialização dos eventos materiais indesejáveis.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CCPS (Center of Chemical Process Safety).

Acessado em 08/05/2023 de:

https://www.aiche.org/ccps?gclid=EA1alQobChMI_u2Mj4X1_wIV9irUAR3CNQYvEAAYASAAEgLnNPDBwE

[2] ABNT NBR ISO 31000 - Gestão de riscos – Diretrizes, 2018.

[3] ICMM (International Council on Mining and Metals)

Acessado em 11/05/2023 de:

<https://www.icmm.com/>

[4] CCM (GESTÃO DE CONTROLE CRÍTICO

[5] NOR-0003-G – Gestão Riscos, Rev_00, 2022.

[6] POL-0009-G – Política de Gestão de Riscos, Rev_06, 2021.

[7] PNR-000112 – Gerenciamento de Controles Críticos, Rev_01, 2022.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

INSTALAÇÕES E ACIDENTES DE ORIGEM ELÉTRICAS EM ESTABELECIMENTOS RURAIS: DIAGNÓSTICO EM PEQUENAS PROPRIEDADES

Caroline Daiane Raduns

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUI –
caroline.raduns@gmail.com

RESUMO

A agricultura brasileira é reconhecida como altamente competitiva e geradora de empregos e de riqueza para o Brasil e para outros países. É um dos setores que mais contribui para o crescimento do PIB nacional e que responde por 21% da soma de todas as riquezas produzidas, um quinto de todos os empregos e 43,2% das exportações brasileiras [1]. Isso demonstra a importância do segmento. Neste sentido, manter a segurança e saúde do trabalhador rural, assim como nas demais áreas, é de vital importância, tanto sob aspecto social, econômico e ambiental. Com o objetivo de aprofundar o estudo, com ênfase em instalações e acidentes de origem, se promoveu uma pesquisa com agricultores do norte e noroeste do estado do Rio Grande do Sul. Entre os anos de 2021 e 2022 foram analisadas 122 propriedades rurais de pequeno porte (agricultura familiar), com desenvolvimento de atividades econômicas relacionadas a suinocultura, avicultura e produção de leite. Durante as visitas foram verificadas as instalações elétricas e informações sobre acidentes originados do uso da eletricidade. Dentre as propriedades visitadas, foram verificadas a presença de Dispositivo de Proteção a Corrente Diferencial-Residual (Dispositivo DR) de alta sensibilidade em 19 propriedades, representando 16%. Os dispositivos estavam instalados de forma a atender parcialmente a instalação da propriedade rural. Em nenhuma das instalações havia dispositivo DR na área residencial da propriedade. Outro dado verificado foi o número de acidentes de origem elétrica. Dentre as propriedades visitadas, houve morte por choque elétrico em 4 delas. Conforme relato, os choques ocorreram no momento do desenvolvimento das atividades laborais. O número de acidente com morte demonstra a necessidade de um olhar para a área da agricultura de pequeno porte, com atenção para

os acidentes de origem elétrica, em especial, para o choque elétrico. Trazer para a discussão os acidentes de origem elétrica na agricultura e discutir sobre soluções, tanto a nível, regional como a nível nacional é

1.0 – INTRODUÇÃO

Garantir a saúde e segurança dos trabalhadores é um compromisso dos diversos setores da sociedade. Nesse sentido, os estudos, pesquisa e discussões sobre o tema, são ferramentas na busca por contribuir na evolução do conhecimento e da técnica para melhorar a qualidade no desenvolvimento das atividades laborais e na preservação de vidas. Nesse sentido, este estudo, traz para o debate a segurança dos trabalhadores rurais de pequenas propriedades, classificadas como agricultura familiar, tendo como linha de abordagem, as instalações e acidentes de origem elétrica. A agricultura familiar é um sistema produtivo agropecuário em que o núcleo familiar centraliza a gestão da propriedade e a maior parte da mão de obra [5]. A Norma Regulamentadora 31 – Segurança e Saúde no Trabalho na Agricultura, Pecuária, Silvicultura, Exploração Florestal e Aquicultura, tem por objetivo estabelecer os preceitos a serem observados na organização e no ambiente de trabalho rural, de forma a tornar compatível o planejamento e o desenvolvimento das atividades do setor com a prevenção de acidentes e doenças relacionadas ao trabalho rural [3]. Dando ênfase aos riscos de origem elétrica, o que vai ao encontro do tema desta pesquisa, o item 31.10.1 da NR 31, indica que todas as partes das instalações elétricas devem ser projetadas, construídas, operadas e mantidas de modo que seja possível prevenir, por meios seguros, os perigos de choque elétrico e outros tipos de acidentes. Com o intuito de analisar como esse item está sendo colocado em prática, este trabalho tem o objetivo de apresentar um estudo, com foco

no diagnóstico das propriedades rurais de pequeno porte. Cabe destacar que a agricultura familiar concentra o maior número de unidades produtivas do Brasil e de pessoas ocupadas em atividades agropecuárias [2]. Portanto, uma pesquisa contemplando o segmento traz ao debate um setor representativo da economia e da população trabalhadora.

2.0 – REFERENCIAL TEÓRICO

A agricultura brasileira é reconhecida como altamente competitiva e geradora de empregos e de riqueza para o Brasil e para outros países. É um dos setores que mais contribui para o crescimento do PIB nacional e que responde por 21% da soma de todas as riquezas produzidas, um quinto de todos os empregos e 43,2% das exportações brasileiras [2]. O setor da agricultura é dividido em pequenos, médios e grandes produtores rurais. No setor de pequenos produtores, há um segmento denominado agricultura familiar, que é um sistema produtivo agropecuário em que o núcleo familiar centraliza a gestão da propriedade e a maior parte da mão de obra [2]. A agricultura familiar possui 3.897.408 estabelecimentos agropecuários e aquicultores, o que representa 76,8% dos estabelecimentos brasileiros [5]. Com relação à produção da pecuária, os dados do Censo Agropecuário 2016-2017 mostram que 31% do número de cabeças de bovinos, 45,5% das aves, 51,4% dos suínos, e 70,2% de caprinos pertencem à agricultura familiar. Além disso, este segmento foi responsável por 64,2% da produção de leite no período de referência do Censo [5].

De acordo com os dados do Censo Agropecuário 2017 [5], o número de cabeças de suínos no País, no ano analisado, era de 39,3 milhões. Mais da metade desse total estava na Região Sul, onde registrou-se 21,1 milhões cabeças, das quais 8,4 milhões estavam no Estado de Santa Catarina, 6,4 milhões no Estado do Rio Grande do Sul, representando o segundo maior produtor do Brasil. Cabe ressaltar que a agricultura familiar é preponderante na atividade de suinocultura na região sul. A avicultura, outro ramo de atividade contemplado na pesquisa, de acordo com os dados do Censo Agropecuário 2017, o País possuía 1,4 bilhão de cabeças de galináceos (galinhas, galos, frangas, frangos e pintos), no ano analisado, das quais 154,8 milhões estavam no Estado do Rio Grande do Sul, representando a quarta posição de produção no Brasil. Por fim, a produção de leite também é destaque na região sul.

Nesse sentido, o setor da agricultura familiar, com destaque para a produção de suínos, aves e leite, na região sul do país, abrange um número considerável de trabalhadores, o que requer um olhar especial para os riscos laborais. A NR 31 é um documento que tem o objetivo de

estabelecer os preceitos a serem observados na organização e no ambiente de trabalho rural, de forma a tornar compatível o planejamento e o desenvolvimento das atividades do setor com a prevenção de acidentes e doenças relacionadas ao trabalho rural [3].

Cabe ressaltar que as normas regulamentadoras são conhecidas de forma adequada e na íntegra em estabelecimentos de maior porte, onde há uma equipe técnica responsável pela segurança dos trabalhados. Quando trata-se de locais onde o número de trabalhadores é reduzido ou apenas familiar, nem sempre todos os riscos e as medidas de proteção são conhecidas, o que pode acarretar em um número maior de acidentes de trabalho. Um dos itens que a NR 31 aborda é o risco elétrico, e o item 31.10.1 indica que todas as partes das instalações elétricas devem ser projetadas, construídas, operadas e mantidas de modo que seja possível prevenir, por meios seguros, os perigos de choque elétrico e outros tipos de acidentes [3].

O Anuário Estatístico de Acidentes de Origem Elétrica 2023, da Associação Brasileira De Conscientização para os Perigos da Eletricidade – ABRACOPEL, informa que no Brasil, em 2022, ocorreu a morte de 592 pessoas devido o choque elétrico. Uma das formas de mitigar os riscos e reduzir os acidentes de origem elétrica é a adoção das medidas propostas pelas normas técnicas [4].

Conforme a Norma Brasileira que trata sobre instalações elétricas de baixa tensão, a NBR 5410] [1], as pessoas e os animais devem ser protegidos contra choques elétricos, seja o risco associado a contato acidental com parte viva perigosa, seja a falhas que possam colocar uma massa acidentalmente sob tensão. O princípio que fundamenta as medidas de proteção contra choques segue duas premissas, sendo elas:

- Partes vivas perigosas não devem ser acessíveis;
- Massas ou partes condutivas acessíveis não devem oferecer perigo, seja em condições normais, seja, em particular, em caso de alguma falha que as tornem acidentalmente vivas.

Para contemplar e seguir as premissas de proteção contra choque, a NBR 5410 propõe três tipos de medidas [1]:

- **Proteção básica:** Meio destinado a impedir contato com partes vivas perigosas em condições normais. Exemplos deste tipo de proteção são: isolamento básico ou separação básica, uso de barreira ou invólucro e limitação da tensão.
- **Proteção supletiva:** Meio destinado a suprir a proteção contra choques elétricos quando massas ou partes condutivas acessíveis tornam-se acidentalmente vivas. Exemplos deste tipo de proteção são: equipotencialização e seccionamento automático da alimentação, isolamento suplementar e separação elétrica.

- Proteção adicional: Meio destinado a garantir a proteção contra choques elétricos em situações de maior risco de perda ou anulação das medidas normalmente aplicáveis, de dificuldade no atendimento pleno. Exemplos deste tipo de proteção são: equipotencialização suplementar, uso de dispositivo diferencial-residual de alta sensibilidade

Se verifica que existe um aparato de documentos que propõe medidas de proteção para evitar o choque e consequente perdas de vida. Porém, existe uma lacuna entre os documentos e a efetiva execução de instalações elétrica que cumpram com os requisitos de segurança. Nesse sentido, buscou-se mapear as condições instalações elétricas de propriedade rurais, de pequeno porte, no que diz respeito a medidas de proteção contra choque.

3.0 – METODOLOGIA

A metodologia para contemplar a proposta de organização está baseada no Ciclo da Pesquisa de Minayo [6]. Para a autora, o Ciclo da Pesquisa tem sua origem no problema ou pergunta, e sua finalização em um “produto provisório”, com capacidade de provocar novas indagações, em um processo que é dividido em três grandes fases: a Fase 1, que é a etapa exploratória da pesquisa; a Fase 2, que inclui o trabalho de campo; e a Fase 3, que se refere ao tratamento do material.

Para Minayo [6], a Fase 1, que é a etapa exploratória da pesquisa, busca organizar os objetos, os pressupostos, as teorias pertinentes, a metodologia apropriada e as questões operacionais, visando a atingir as metas e, consequentemente, direcionando para a finalização da pesquisa. Nesta pesquisa, esta etapa tem por objetivo criar uma base de sustentação a partir do referencial teórico, baseado em normas regulamentadoras, normas técnicas e estudos na área. O resultado desta fase está descrito no Capítulo 2 deste artigo, sendo o referencial teórico.

O trabalho de campo centrou-se em um estudo de caso, através da aplicação de um questionário, pertencente ao mundo da pesquisa qualitativa. O questionário foi aplicado a um grupo de 122 propriedades de agricultores familiares da região norte e noroeste do estado do Rio Grande do Sul - RS, os quais desenvolvem atividades relacionadas a suinocultura, avicultura e produção de leite. O questionário incluiu seis perguntas:

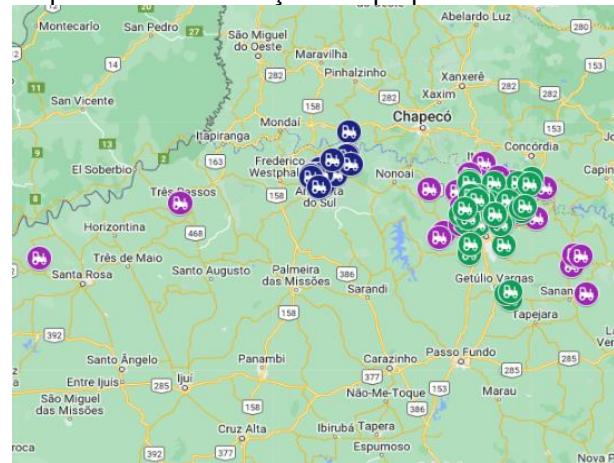
1. Qual a localização da propriedade?
2. Quais as principais atividades econômicas desenvolvidas na propriedade rural?
3. São visualizados condutores ou outros sistemas elétricos sem isolamento ou proteção (por exemplo, barreira)? Se sim, em qual material/sistema?

4. Há aterramento na instalação elétrica? Se sim, qual tipo?
5. Há DR de alta sensibilidade instalado? Se sim, onde?
6. Alguém já sofreu choque elétrico durante as atividades laborais? Se sim, houve perda de vida?

A partir das respostas ao questionário, foram analisadas as informações. Tanto os resultados da pesquisa quanto as análises, estão apresentados no capítulo 4.

4.0 – RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados do estudo de caso. A primeira questão buscou localizar as propriedades rurais visitadas. A Figura 1 apresenta a localização das propriedades.



áreas internas, sendo que em 13 propriedades encontrou-se emenda de condutor de cobre com condutor de multiplexado de alumínio de forma direta, sem o uso de conector.

- Em 37 propriedades foram observadas tomadas ou interruptores sem proteção adequada das partes vivas.

- Em 29 propriedades encontrou-se disjuntores instalados diretamente na parede ou outras estruturas (por exemplo, poste).

- Em 41 propriedades, identificou-se quadros de distribuição danificados, sem proteção adequada ou sem tampa.

As fotos da Figuras 2 a 5 apresentam exemplos das situações acima mencionadas.



Figura 2 – Interruptor danificado



Figura 3 – Condutor multiplex utilizado em área interna, com emenda direta ao condutor de cobre



Figura 4 – Disjuntor instalado em poste de madeira



Figura 5 – Quadro de distribuição sem tampa

A quarta questão tem como resultado os seguintes dados:

- Em nenhuma instalação foi identificado o sistema de aterramento atendendo todas as cargas elétricas.
- Em 68 propriedades não há nenhuma carga aterrada.
- As instalações com aterramento parcial das instalações totalizam 54 propriedades e seguem o esquema TT, disposto pela NBR 5410.
- Em 103 propriedade, verificou-se a presença do condutor proteção instalado entre o aterramento da alimentação e caixa de medição. Porém, o condutor não tem continuidade até as cargas elétrica, não atendendo por completo o esquema TN-S da NBR 5410.

As Figuras 6 e 7 apresentam uma entrada de serviço, que possui o condutor neutro e proteção ligados ao aterramento da alimentação, porém, o condutor proteção tem seu trecho finalizado na caixa de medição.



Figura 6 – Aterramento da alimentação, com condutor neutro e proteção

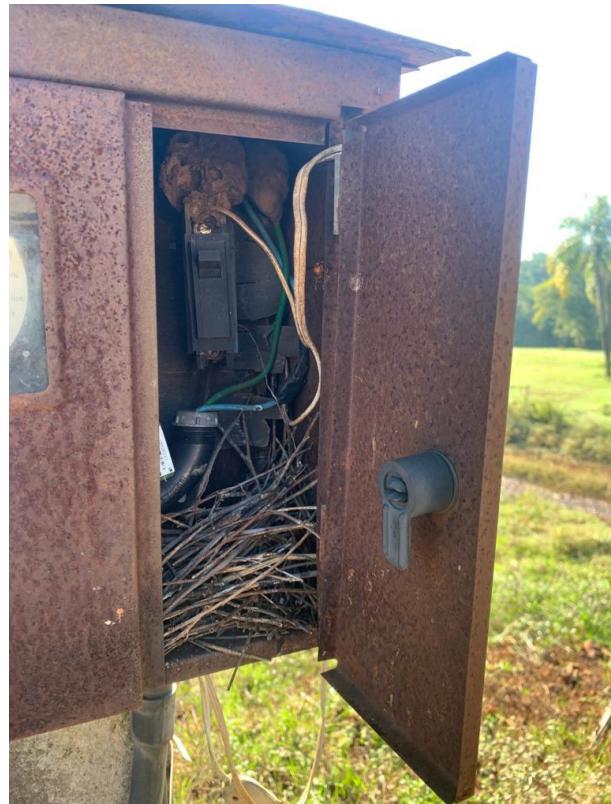


Figura 7 – Caixa de medição com o condutor proteção sem continuidade

O Gráfico 1 apresenta o resultado da quinta questão, sobre a presença de Dispositivo DR de alta sensibilidade nas instalações. Foi identificada a instalação em 19 propriedades, representando 16% do total. Os dispositivos estavam instalados de forma a atender parcialmente a instalação da propriedade rural. Em nenhuma das instalações havia Dispositivo DR na área residencial da propriedade.

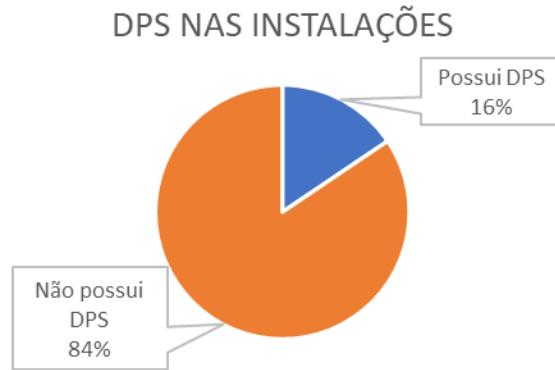


Gráfico 1 – DPS nas instalações

Outro dado verificado foi o número de acidentes de origem elétrica. O Gráfico 2 apresenta o resultado. Dentre as propriedades visitadas, em 47 delas, representando 39%, houve relato de choque elétrico no momento das atividades laborais. Outra questão levantada foi a consequência do choque elétrico. Verificou-se que houve morte por choque elétrico em 4 propriedades, sendo que o choque ocorreu durante o desenvolvimento das atividades laborais.

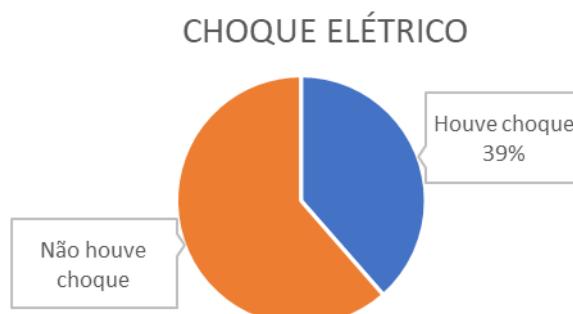


Gráfico 2 - Acidentes de origem elétrica

5.0 – CONCLUSÕES

Diante do diagnóstico nas propriedades rurais, a partir do questionário, observa-se uma discrepância entre as medidas de proteção indicadas pela NBR 5410 e sua efetiva execução. Durante as visitas, a partir das conversas com os produtores rurais, percebeu-se que o motivo pela adoção de um tipo de material ou a não instalação de uma medida de proteção é pela falta de conhecimento sobre o tema. Outra questão relatada, é a dificuldade de conseguirem mão de

obra especializada na área de instalações elétricas, ou, a demora no atendimento. Isso faz com que os próprios produtores tenham que realizar determinadas manutenções ou instalações, para garantir o funcionamento dos sistemas, já que a não operação pode acarretar a perda de produção, como a morte de aves devido ao excesso de calor ou frio. Outro dado que chama atenção é o número de vítimas devido ao choque elétrico. O número de acidente com morte demonstra a necessidade de um olhar para a área da agricultura de pequeno porte, com atenção para os acidentes de origem elétrica, em especial, para o choque elétrico.

Trazer para a discussão os acidentes de origem elétrica na agricultura e discutir sobre soluções, tanto a nível, regional como a nível nacional, reunindo os mais diversos setores, como o poder público, a indústria, o comércio e entidades sociais.

FONTE:

- [1] ABNT, Norma Brasileira - **Instalações Elétricas de Baixa Tensão NBR 5410:2004 versão corrigida, 2008.** 2008.
- [2] BRASIL. **VII Plano Diretor de Embrapa - 2020 a 2030.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/vii-plano-diretor>. 2020.
- [3] BRASIL. **NR31 – Segurança e saúde no trabalho na agricultura, pecuária, silvicultura, exploração florestal e aquicultura.** Brasília, 2022.
- [4] DE SOUZA, Danilo Ferreira; MARTINHO, Edson; MARTINHO, Meire Biudes; MARTINS JR, Walter Aguiar (Org.). **Anuário Estatístico de Acidentes de Origem Elétrica 2023 – Ano base 2022.** Salto-SP: Abracopel, 2023. DOI: 10.29327/5194308
- [5] IBGE. **Atlas do espaço rural brasileiro / Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE,** Coordenação de Geografia. 2. ed. - Rio de Janeiro: IBGE, 2020. 324 p.
- [6] MINAYO, Maria Cecília de Souza. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade.** 26. ed. Petrópolis, RJ: Vozes, 2007.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

UMA ABORDAGEM ESTATÍSTICA DA QUALIDADE DOS CABOS ELÉTRICOS DE BAIXA TENSÃO, E AS SUAS CONTRIBUIÇÕES COM OS INCÊNDIOS DE ORIGEM ELÉTRICA

Danilo Ferreira de Souza
Professor na UFMT e Pesquisador na USP
Danilo.ferreira.souza@hotmail.com

Walter Aguiar Martins Jr.
Mestrando no PGFA-UFMT
walter.aguiar@ieee.org

Edson Martinho
Diretor Executivo da Abracopel e Gerente da Lambda Engenharia
abracopel@abracopel.org.br

RESUMO

Nas economias emergentes, é comum encontrar produtos que não cumprem as normas estabelecidas, por exemplo, produção de baixa qualidade, economia de material etc., no mercado onde os clientes são motivados pelo baixo preço, especialmente em tempos de crise econômica. No que diz respeito aos produtos para instalações elétricas, não há diferença. Notoriamente, vários produtos não cumprem as normas no mercado dos fios e cabos. Muitos fabricantes procuram reduzir os custos e melhorar as margens, utilizando matérias-primas mais baratas. Isso se observa principalmente na redução do volume de cobre utilizado nos condutores, causando superaquecimento, aumentando as perdas elétricas, e reduzindo a vida útil, aumentando o risco de incêndios de origem elétrica. O Brasil possui uma entidade independente há mais de 29 anos, que monitora o mercado - a Qualifio - Associação Brasileira para a Qualidade de Fios e Cabos Elétricos. Neste estudo, foram utilizadas 136 amostras de cabos coletadas pela Qualifio e submetidas a ensaios de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 6814: Fios e cabos elétricos - Ensaio de resistência elétrica. Os resultados mostraram que 74% dos fios e cabos coletados apresentaram resistência elétrica acima do máximo permitido para aquelas seções nominais. Em alguns casos, a resistência foi três vezes maior que o limite superior estabelecido na norma. Foram analisados cabos com seção nominal de 1,5 mm², 2,5 mm², 4 mm² e 6 mm².

1.0 – INTRODUÇÃO

Os cabos elétricos flexíveis com isolamento de cloreto de polivinila (PVC) para tensões nominais de até 450/750V são os cabos elétricos mais utilizados em instalações elétricas. Entretanto, muitos cabos elétricos não apresentam o mesmo desempenho nos testes laboratoriais, quando comparado com as informações técnicas disponibilizadas pelos fabricantes.

Vários elementos são essenciais para a qualidade dos cabos elétricos, como flexibilidade, rugosidade do isolante, massa, liga metálica etc. [1]. Entretanto, a resistência elétrica é um dos mais relevantes, pois representa diretamente as perdas elétricas que a utilização do cabo pode provocar na instalação.

A quantidade e a qualidade do material condutor determina a resistência de um cabo elétrico. No Brasil, só é permitido o uso de cobre em cabos de baixa tensão para instalações elétricas fixas - residenciais. Outros materiais, como alumínio e ligas metálicas, são proibidos. Além disso, vários fabricantes, na tentativa de economizar e lucrar mais na fabricação dos cabos, acabam aplicando uma quantidade menor de cobre, fazendo com que a resistência do condutor fique acima do valor permitido.

O cobre é um dos metais mais utilizados no mundo e desempenha um papel estratégico na intensificação da industrialização. Mais recentemente, o cobre é um insumo fundamental no processo de mobilidade elétrica - os carros com motores de combustão interna utilizam, em média, 25 quilos (kg) de cobre. Os carros híbridos usam, em média, 40 kg de cobre, enquanto os veículos totalmente elétricos podem usar até 70 kg. Consequentemente, o preço do minério aumentou nos últimos anos, passando de 4,4 USD/kg em março de 2020 para 11 USD/kg em março de 2022. No mesmo período, o dólar subiu de R\$ 4,8 para R\$ 5,4 (URV - Unidade Real de Valor, é a moeda

utilizada no Brasil, com o símbolo R\$). Além do fato de que, nos últimos 20 anos, o dólar (EUA) se valorizou mais de 300% em relação ao real (R\$). Esses motivos fizeram com que o preço dos cabos elétricos aumentasse significativamente. E com isso, ampliou-se o número de fabricantes que comercializam cabos elétricos com resistência superior à permitida pela normatização vigente.

Pelas razões expostas, é necessário analisar a qualidade dos cabos elétricos disponíveis no mercado brasileiro.

2.0 – METODOLOGIA

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Mercosul (ABNT NBR NM) 280:2011 [2], a resistência elétrica dos cabos flexíveis, em 20 graus Celsius, não deve exceder valores máximos predefinidos, de acordo com a seção nominal do cabo. A Tabela 1 apresenta a resistência elétrica máxima por quilômetro que diferentes seções nominais dos cabos mais comuns nas instalações elétricas devem atender.

A Tabela 1 apresenta os valores máximos de resistência elétrica dos condutores, seção nominal entre 1,5 mm² e 6 mm², seguindo as tabelas I a IV da ABNT NBR NM 280.

Tabela 1 - Resistência elétrica máxima dos condutores elétricos a 20°C

Seção nominal (mm ²)	Resistência elétrica em 20°C (Ω/km)			
	Classe 1 ou 2		Classe 5 ou 6	
	Fio nú	Fio revestido	Fio nú	Fio revestido
1.5	12.10	12.20	13.30	13.70
2.5	7.41	7.56	7.98	8.21
4.0	4.61	4.70	4.95	5.09
6.0	3.08	3.11	3.30	3.39

Neste estudo, foram avaliados cabos revestidos de classe 5 ou 6. Por esse motivo, a última coluna da Tabela 1 está destacada. Esses são os valores de referência usados.

A classe do cabo elétrico define se o condutor é um fio, um cabo (rígido) ou um cabo flexível. A Classe 1 é apenas para condutores sólidos (fios) e a Classe 2 é para condutores trançados (cabos rígidos). Para condutores flexíveis, há as Classes 4, 5 e 6, sendo a Classe 6 mais flexível que a 5 e a Classe 5 mais flexível que a 4.

O teste de resistência elétrica dos condutores (fios e cabos) foi realizado de acordo com a ABNT NBR 6814:1986. Entre janeiro e maio de 2022, 136 amostras de condutores com seção nominal entre 1,5 mm² e 6 mm² (classe 5 ou 6) foram coletadas do mercado e testadas.

Os cabos elétricos devem apresentar a resistência elétrica máxima a 20°C de acordo com as colunas destacadas na Tabela 1 para atender à norma nacional de fabricação de condutores

elétricos. Condutores com resistência superior à máxima estabelecida não estão em conformidade com a norma e apresentam falhas de desempenho e segurança.

3.0 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 mostra os resultados com base nas amostras testadas. As amostras que apresentaram resistência elétrica igual ou inferior aos valores da Tabela 1 foram consideradas em conformidade, e as que apresentaram resultados superiores aos da Tabela 1 foram consideradas não conformes.

Tabela 2 - Resultado dos testes de resistência elétrica dos condutores

Descrição	Amostras	%
Seção Nominal: 1.5 mm ²	24	
Conforme	4	16.7%
Não Conforme	20	83.3%
Seção Nominal: 2.5 mm ²	72	
Conforme	17	23.6%
Não Conforme	55	76.4%
Seção Nominal: 4.0 mm ²	23	
Conforme	6	26.1%
Não Conforme	17	73.9%
Seção Nominal: 6.0 mm ²	17	
Conforme	5	29.4%
Não Conforme	12	70.6%
Total	136	

Apenas 30 amostras testadas (21,3%), apresentaram resultados compatíveis com a resistência máxima estabelecida pela ABNT NBR NM 280:2011. Demonstrando assim, que existem muitos condutores elétricos problemáticos no mercado e, consequentemente, sendo usados em instalações elétricas. A Figura 1 resume os resultados gerais de conformidade e não conformidade das amostras por seção transversal.

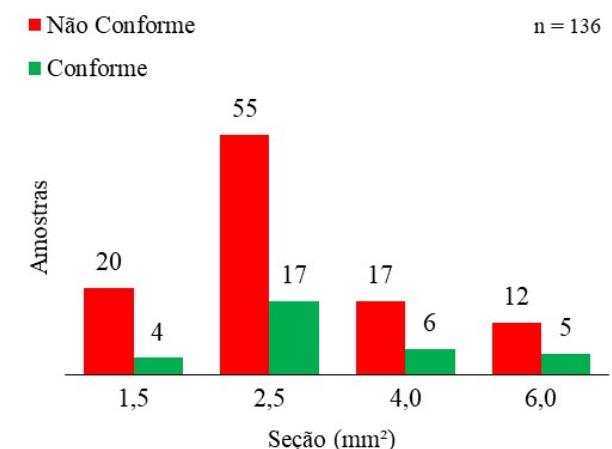


Figura 1 - Resultado de testes de amostra por uma seção transversal nominal

Uma análise dos resultados percentuais de conformidade e não conformidade dos testes por seção transversal nominal constatou que, quanto menor a seção transversal, maior a taxa de não conformidade, conforme observado na Figura 2.

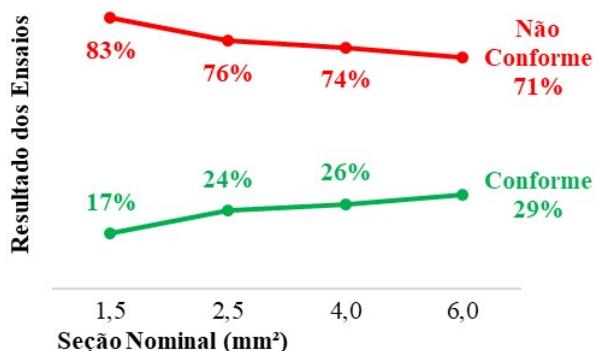


Figura 2 - Resultado percentual de conformidade e não conformidade dos testes por uma seção transversal nominal

As Tabelas 3 a 6 apresentam algumas estatísticas resumidas sobre os resultados obtidos no teste das amostras coletadas, segmentadas por uma seção transversal nominal do condutor elétrico.

Tabela 3 - Resumo estatístico dos resultados dos testes dos condutores de 1,5 mm²

Condutores - Seção transversal nominal de 1,5 mm ² (Classe 5 ou 6)	
Amostras:	24
Resistência máxima padrão (Ω/km):	13.30
Resistência máxima medida (Ω/km):	49.32
Resistência mínima medida (Ω/km):	10.07
Resistência média medida (Ω/km):	22.18
Desvio padrão:	10.52

Tabela 4 - Resumo estatístico dos resultados dos testes dos condutores de 2,5 mm²

Condutores - Seção transversal nominal de 2,5 mm ² (Classe 5 ou 6)	
Amostras:	72
Resistência máxima padrão (Ω/km):	7.98
Resistência máxima medida (Ω/km):	32.83
Resistência mínima medida (Ω/km):	7.57
Resistência média medida (Ω/km):	13.84
Desvio padrão:	6.55

Tabela 5 - Resumo estatístico dos resultados dos testes dos condutores de 4,0 mm²

Condutores - Seção transversal nominal 4,0 mm ² (Classe 5 ou 6)	
Amostras:	23
Resistência máxima padrão (Ω/km):	4.95
Resistência máxima medida (Ω/km):	19.65
Resistência mínima medida (Ω/km):	4.83
Resistência média medida (Ω/km):	7.67

Desvio padrão:

3.45

Tabela 6 - Resumo estatístico dos resultados dos testes dos condutores de 6 mm²

Condutores - Seção transversal nominal de 6,0 mm² (Classe 5 ou 6)

Amostras:	17
Resistência máxima padrão (Ω/km):	3.30
Resistência máxima medida (Ω/km):	6.23
Resistência mínima medida (Ω/km):	3.25
Resistência média medida (Ω/km):	4.10
Desvio padrão:	1.07

Os resumos apresentados entre as Tabelas 3 e 6, especialmente os desvios-padrão, complementam a Figura 2, mostrando que, à medida que a seção nominal do condutor aumenta, o desvio-padrão diminui, o que representa um melhor desempenho dos condutores com maior seção nominal quando comparados aos de menor seção nominal. Embora a taxa de amostras em conformidade permaneça abaixo de 30% para as quatro seções transversais nominais testadas, à medida que a seção transversal aumenta, a resistência elétrica das amostras se aproximam do valor de referência fornecido na Tabela 1.

Desde a Figuras 3 até a Figura 6 estão apresentadas as distribuições de amostras testadas, segmentadas pela seção nominal do condutor elétrico. A coluna em verde, indica a quantidade de amostras que estão apresentaram resultados que atendem aos valores normativos. Nas colunas das demais cores estão distribuídos os condutores com resistência máxima correspondentes as seções nominais normalizadas imediatamente menores.

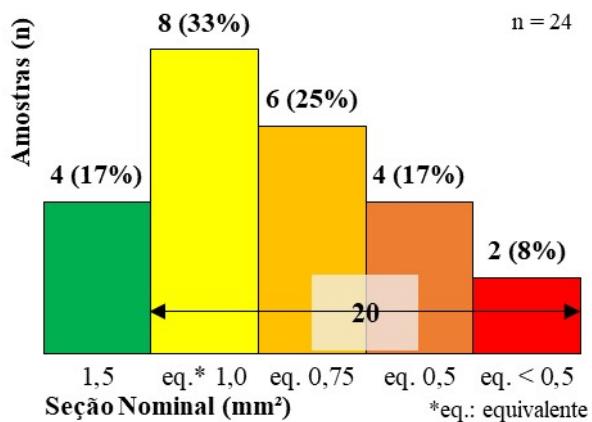


Figura 3 - Distribuição dos resultados dos testes de amostras de condutores com seção nominal de 1,5 mm²

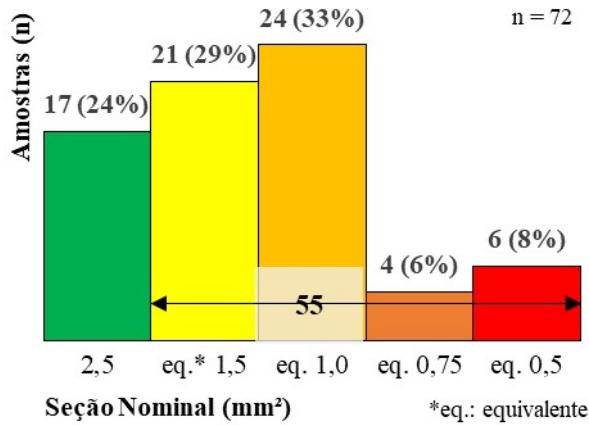


Figura 4 - Distribuição dos resultados dos testes de amostras de condutores com seção nominal de 2,5 mm²

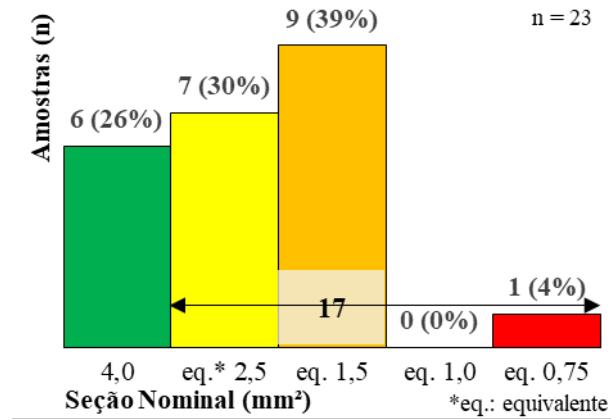


Figura 5 - Distribuição dos resultados dos testes de amostras de condutores com seção nominal de 4,0 mm²

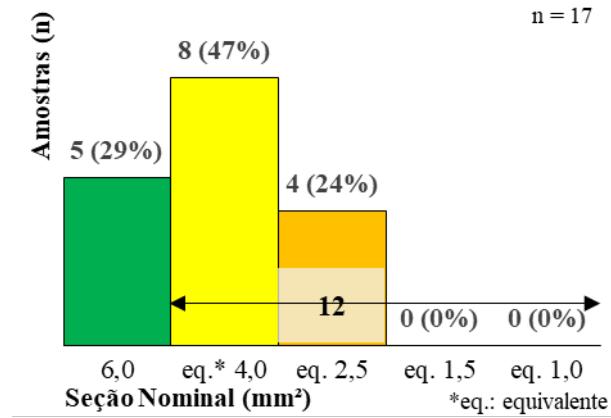


Figura 6 - Distribuição dos resultados dos testes de amostras de condutores com seção nominal de 6,0 mm²

A Figura 7 apresenta o resultado geral das 136 amostras testadas. As amostras são consideradas seguindo a seção nominal, e as amostras não conformes como o número de vezes que a seção nominal padronizada que está imediatamente abaixo da nominal.

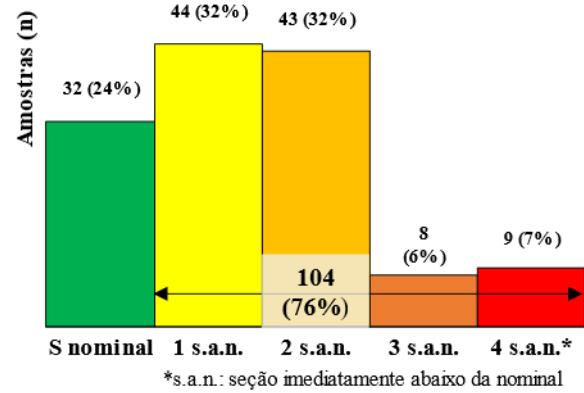


Figura 7 - Distribuição dos resultados dos testes das amostras de condutores por seção transversal nominal e por número de vezes abaixo da seção transversal nominal

Deste a Figura 3 até a Figura 6 confirmam a conclusão discutida a partir da análise das Tabelas 3 a 6 sobre os desvios-padrão. À medida que a seção nominal dos condutores aumenta, observa-se que os resultados dos testes se agrupam mais próximos do valor de referência da resistência elétrica, representado nas figuras pela primeira coluna de cada figura (Figura 3 - Figura 7), justificando a redução do desvio padrão.

A Figura 7 mostra que apenas 24% das amostras testadas apresentaram desempenho elétrico equivalente à sua respectiva seção nominal especificada. Em comparação, 32% das amostras apresentaram o desempenho de condutores de uma seção transversal imediatamente abaixo da nominal especificada e 45% apresentaram o desempenho de condutores de duas a quatro seções abaixo da nominal especificada. As amostras com desempenho equivalente ao de condutores de menor classificação apresentam riscos para o usuário.

A Figura 8 mostra um cabo irregular de 2,5 mm² e a Figura 9 um cabo regular. Ao analisar as duas figuras, as seguintes observações são registradas:

- O cabo irregular tem um diâmetro de 4,1 mm, enquanto o cabo regular tem um diâmetro de 3,6 mm;

- O cabo irregular apresenta 35 fios pequenos de cabo de alumínio revestido de cobre. Enquanto o cabo regular tem 40 fios pequenos de cobre;

- O cabo irregular tem uma disposição irregular dos fios dentro da massa isolante de PVC;

- O diâmetro do fio interno dos dois cabos (Irregular e Regular) é de 0,26 mm.

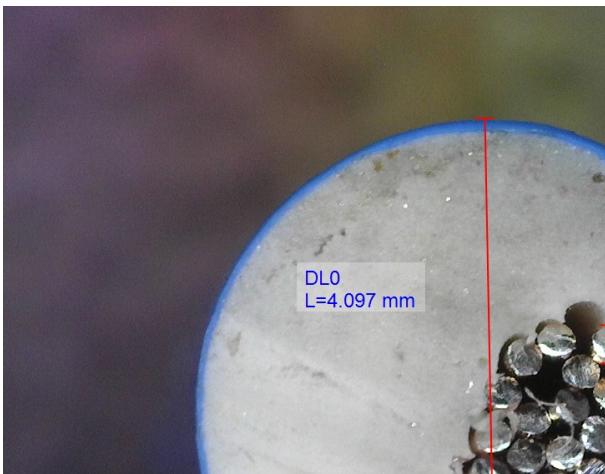


Figura 8 - Cabo irregular ($2,5 \text{ mm}^2$) com 35 cabos internos de alumínio e um diâmetro total de 4,1 mm

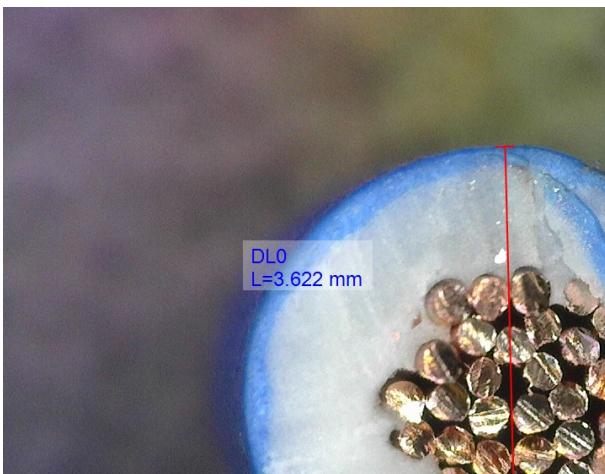


Figura 9 - Cabo comum ($2,5 \text{ mm}^2$) com 40 cabos internos de cobre e um diâmetro total de 3,6 mm

Como visto nas figuras 8 e 9, o diâmetro do cabo irregular é maior do que o diâmetro do cabo regular. Portanto, há métodos mais adequados do que medir o diâmetro do cabo com um paquímetro para avaliar o cabo.

Uma maneira possível de avaliar o cabo é por meio da massa. Os cabos irregulares têm um rolo de 100 metros, geralmente 7% menos massa do que os cabos regulares, pois a economia se dá principalmente pelo uso de um material menos metálico ou de metais mais leves.

A melhor maneira de verificar a qualidade dos cabos é por meio da resistência ôhmica, utilizando um instrumento capaz de medir com precisão baixas resistências. Posteriormente, compare com os valores das normas.

As ações identificadas que podem melhorar a qualidade dos fios e cabos disponíveis no mercado brasileiro são:

1. Aumentar a fiscalização do comércio por meio de entidades públicas responsáveis e associações de produtores de cabos;

2. As autoridades públicas impõem multas aos fabricantes e, se forem reincidentes, suspendem o registro comercial da organização;

3. Ampliar as campanhas de conscientização para projetistas, eletricistas e grandes consumidores sobre os riscos do uso de cabos de baixa qualidade;

4. Criar campanhas para os usuários finais informando-os sobre o aumento dos custos com a perda de energia elétrica devido ao aquecimento dos cabos por subdimensionamento.

4.0 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um dos principais critérios para o dimensionamento de condutores elétricos em uma instalação elétrica é a capacidade térmica de conduzir corrente elétrica.

O uso de condutores que deveriam ter uma determinada seção nominal, mas que são subdimensionados no processo de fabricação, coloca a instalação elétrica em risco de incêndio. A probabilidade de serem submetidos a correntes elétricas causará um aquecimento maior do que o suportado pelo isolamento, resultando em um princípio de incêndio. Existem condutores elétricos fabricados com produtos inadequados para uso em instalações elétricas, como condutores com fios de alumínio cobreado, popularmente conhecidos como Alucobre - (alumínio + cobre), que apresentam resistência elétrica superior à máxima especificada na norma. O escopo deste artigo não aborda a ilustração acima, porém, ela é verificada em amostras previamente coletadas no mercado.

Além disso, normalmente são observadas não conformidades na isolação das amostras de condutores coletadas, onde se observa excesso de PVC, menos fios de cobre, formação descentralizada etc.

A Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade (Abracopel) registrou, no Brasil, 3.312 incêndios de origem elétrica, com 271 vítimas fatais (8,2%), de 2016 a 2021, com uma variação de 42,2% no período [3], [4]. Ou seja, os incêndios de origem elétrica têm seguido uma tendência de crescimento recentemente. A maioria dos incêndios ocorre em residências (49,7%) e edifícios comerciais e industriais (31,5%), e algumas das causas são o superaquecimento de condutores elétricos mal dimensionados e falhas no isolamento dos condutores elétricos [5], [6].

5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Brazilian Association of Technical Standards - ABNT, NBR 5410 - Electrical installations of buildings – Low voltage (IN PORTUGUESE). Rio de Janeiro, 2008.

[2] BRAZILIAN ASSOCIATION OF TECHNICAL STANDARDS (ABNT), "ABNT NBR NM 280:2011 - Insulated cable conductors," Rio de Janeiro, 2011.

[3] E. E. Martinho, "Electricity accidents in Brazil: The data and characteristics of accidents. What is being done to change this scenario: Copyright Material IEEE Paper No. ESW2021-22," in IEEE IAS Electrical Safety Workshop, 2021, vol. 2021-March, doi: 10.1109/ESW45993.2021.9461493.

[4] M. B. Martinho, E. Martinho, and D. F. de Souza, "ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ACIDENTES DE ORIGEM ELÉTRICA 2022 - Ano base 2021," ABRACOPEL, vol. 1, p. 108, Mar. 2022, doi: 10.29327/560614.

[5] R. A. Yereance and T. Kerkhoff, Electrical fire analysis, 3rd ed. Springfield - Illinois: Charles C. Thomas, 2010.

[6] T. H. Gillman and I. Le May, "Mechanical and electrical failures leading to major fires," Eng. Fail. Anal., vol. 14, no. 6, pp. 995–1018, Sep. 2007, doi: 10.1016/J.ENGFALANAL.2006.11.049.

6.0 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a três pessoas que se dedicam integralmente às inspeções para melhorar a qualidade dos fios e cabos no Brasil, evitando que mais vidas sejam perdidas devido às consequências (incêndios, choques elétricos) do uso de fios e cabos irregulares. São eles Maurício Sant'Ana - Secretário Executivo da Associação Brasileira pela Qualidade de Fios e Cabos Elétricos (Qualifio), Enio Rodrigues - Diretor Executivo do Sindicato das Indústrias de Condutores Elétricos, Trefilação e Laminação de Metais Não Ferrosos do Estado de São Paulo (Sindicel), e Bento Bezerra - Presidente do Instituto de Pesos e Medidas de Mato Grosso (IPEM/MT).

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos disponibilizada ao primeiro autor por meio do projeto 870814/1999-0, processo 142323/2020-9, para que ele pudesse se dedicar à sua pesquisa de doutorado nessa área e em áreas correlatas.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

SOLUÇÕES IMPLEMENTADAS NA VALE PARA REDUÇÃO DA EXPOSIÇÃO DE PESSOAS AOS RISCOS ELÉTRICOS EM INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS

Edmilson José de Castro
Vale S/A
edmilson.jose@vale.com

Márcio Azevedo dos Santos
Vale S/A
marcio.azevedo.santos@vale.com

Marcos Tadeu Pereira
Vale S/A
marcos.tadeu@vale.com

Leonardo Elias Moschen Chisté
Vale S/A
leonardo.chiste@vale.com

Junio César Cunha Viana
Vale S/A
junio.viana@vale.com

Anderson Fernandes da Silva
Vale S/A
anderson.fernandes.silva@vale.com

Wendel Rosado Baldon
Vale S/A
wendel.baldon@vale.com

RESUMO

A interface com os componentes, sobretudo os integrantes do Sistema Elétrico de Potência (SEP) pode representar uma fonte potencial de perigo devido a perda de contenção da energia elétrica, o que, em muitos casos, resulta em lesões graves provocadas por arcos ou choques elétricos. Diante desse cenário, a VALE, por meio de suas equipes técnicas, de engenharia e de segurança, vem desenvolvendo uma série de soluções com o objetivo de reduzir a exposição dos trabalhadores que atuam em suas instalações elétricas. Destacam-se, principalmente, as ações voltadas para a retirada do homem dos ambientes potencialmente perigosos e as que definem regras obrigatórias para a adoção de estratégias de monitoramento da condição dos equipamentos ou para a gestão dos riscos envolvidos. Este trabalho tem por objetivo apresentar o histórico desses desenvolvimentos, as vantagens de se ter a segurança como uma alavancas para resultados sustentáveis e as possibilidades de redução real da exposição de pessoas a riscos conhecidos e ocultos.

1.0 – INTRODUÇÃO

A premissa de que as intervenções nas instalações elétricas sejam realizadas sem que haja presença de energia é uma regra de conhecimento de todo profissional que atue no ramo elétrico, ou seja, possuímos um sistema de legislação e normatização técnica que já nos oferecem subsídios para uma atuação segura. Porém, ainda que grande parte das atividades possam ser realizadas com o estado de energia zero, sempre haverá a necessidade de interação entre o homem e os equipamentos. Essa interação se dará, também em grande parte, com componentes do sistema elétrico, fato que, por si só já é suficiente para gerar um grau de exposição aos riscos presentes, ocultos ou não, no local. A Vale, utilizando-se da alavancas da segurança como meio de sustentabilidade para suas operações, e ainda, entendendo sua importância no contexto industrial nacional e internacional, vem aprimorando suas formas de atuação com o emprego de tecnologia para eliminação, mitigação e controle dos riscos de suas atividades.

A segurança em atividades com eletricidade é uma condição básica para permitir a confiabilidade dos processos e ativos, garantindo produtividade, continuidade das operações e, consequentemente, resultando em ambientes com riscos controlados e com profissionais motivados.

A Vale está comprometida em gerenciar os riscos de forma proativa e eficaz, prezando sempre pela segurança dos seus colaboradores e parceiros, em consonância com seus valores, seu Código de Conduta, políticas internas e suas regras de governança. Dessa forma, vem desenvolvendo um trabalho contínuo de gerenciamento de riscos, onde atividades com eletricidade figuram como um dos 10 maiores riscos de acidente em suas operações.

2.0 – DESENVOLVIMENTO

A implementação de controles de engenharia que propiciem a redução da exposição de pessoas aos riscos de lesões por arco elétrico e eletrocussão durante atividades com eletricidade resulta em uma redução na ocorrência de eventos com severidade real ou potencial crítica e, consequentemente, em maior segurança para milhares de empregados que atuam em ambientes com riscos mapeados em várias unidades da empresa em 34 países, além de conferir maior confiabilidade aos processos.

Dentre as soluções implementadas pela empresa, destacam-se:

- **Padrões Normativos Obrigatórios**

Nos últimos 3 anos, através da reunião de profissionais com grande experiência em diversas áreas de conhecimento de suas unidades produtivas, contratos com empresas especialistas em gestão de riscos, emprego de metodologia desenvolvida especificamente com o objetivo de mudar o patamar de segurança de suas operações, vêm sendo criados padrões normativos globais para instalações e processos, contemplando requisitos de normas técnicas internacionais, nacionais e as melhores práticas de mercado utilizadas no mundo todo, com foco em segurança de pessoas e integridade dos ativos, que já estão mudando significativamente a forma com que os profissionais interagem com as instalações e equipamentos, além de direcionar recursos para a modernização, implementação de controles de engenharia, revitalização de ativos e implantação de adequações necessárias e desejáveis, fazendo com que riscos sejam controlados, mitigados e, em vários casos, eliminados. Esses documentos, que já abrangem centenas de temas técnicos ou não, conhecidos internamente como PNRs, Padrões Normativos, têm grande potencial para contribuir para que a VALE alcance sua ambição em ser uma referência em Segurança no Brasil e no Mundo.

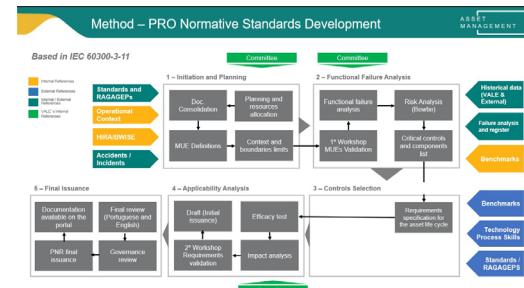


Fig. 01 – Metodologia empregada para o desenvolvimento dos Padrões Normativos Obrigatórios

- **Sistema de monitoramento remoto e online de temperatura para painéis de Média Tensão**

Trata-se do emprego de tecnologias de mercado para permitir o monitoramento remoto, online e contínuo de temperatura e outras importantes grandezas no interior de painéis elétricos destinados à distribuição de energia nas suas instalações, retirando os profissionais responsáveis por atividades que, pontualmente, tem por objetivo fazer a leitura dessas grandezas, sempre com a remoção de portas e barreiras físicas de proteção dos painéis, gerando alta exposição aos riscos de ocorrência de choques e arcos elétricos que podem atingi-los, podendo provocar graves lesões e até mesmo levando à óbito. O emprego dessas tecnologias, através da obrigatoriedade prevista em alguns dos Padrões Normativos mencionados anteriormente, vem se mostrando uma grande ferramenta de redução da exposição aos riscos elétricos, além de desempenhar o papel de direcionador de recursos importantes da empresa em prol da segurança de pessoas.



Fig. 02 – Exemplo de uma das tecnologias empregadas no monitoramento de temperatura de barramentos em Painéis de Média Tensão.

- **Sistema de manobras de inserção e extração remota de disjuntores e contatores em painéis de Média e Baixa Tensão**

Também ancorada nos Padrões Normativos, essa iniciativa trata-se do

desenvolvimento de uma solução de mercado para atendimento a requisitos mínimos de segurança definidos pela VALE para as operações de inserção e extração de disjuntores e contatores de alta e baixa tensão com sistema rotativo, padronizando essa solução para todas as suas instalações que ainda não possuam esse recurso. Com custo relativamente baixo, fácil implementação, adaptação e operação, essa solução tem grande flexibilidade e real potencial de redução da exposição de milhares de pessoas aos riscos elétricos durante a realização de manobras elétricas.



Fig. 03 – Sistema portátil de inserção e extração de disjuntores e contatores.

- Sistema de monitoramento de descargas atmosféricas com mapeamento de áreas onde pessoas executam atividades**

Como o título já menciona, tal iniciativa tem por objetivo monitorar a possibilidade de ocorrência de descargas atmosféricas em determinadas regiões e, através do mapeamento prévio, definir procedimentos para o deslocamento seguro de equipes de profissionais que estejam atuando em campo aberto para áreas com risco calculado aceitável para a ocorrência de descargas atmosféricas.

- Sistema de detecção pessoal de tensão para alerta em atividades na zona controlada**

Essa iniciativa tem por objetivo monitorar 100% do tempo em que os profissionais estejam em ambientes com presença de instalações elétricas para alertá-los sobre a possibilidade de toque acidental com superfície energizada, seja por fonte conhecida ou não, através do emprego de um dispositivo individual com tecnologia para detecção de campo elétrico ou magnético. O equipamento homologado e que será, nos próximos anos, de uso obrigatório por todos os profissionais que atuem na área elétrica da VALE tem o desafio se representar a última barreira antes do toque, acidental ou não, em um componente ou superfície condutora que esteja sob potencial elétrico de risco.



Fig. 04 – Sistema detecção de tensão e corrente de uso individual para pulso.

- Sistema de gestão eletrônica de bloqueios de fontes de energias perigosas**

O bloqueio de fontes de energias perigosas é uma das etapas de interação entre o homem e os equipamentos que utilizam ou armazenam algum tipo de energia em que há uma das maiores exposições de riscos das indústrias, onde uma falha em uma de suas etapas pode representar o desencadeamento de uma reação de liberação dessa energia de forma descontrolada ou indesejada, que, por sua vez, pode provocar lesões graves e até mesmo fatalidades. Por isso, a VALE desenvolveu um sistema informatizado que gerencia as informações referentes à todas as etapas desse processo crítico, identifica corretamente o ponto a ser bloqueado, além de fornecer confirmações e registros necessários para que as atividades que dependam dessa rotina sejam realizadas de forma segura e com armazenamento de histórico. Esse sistema foi batizado de Energia Zero, e já está presente em quase todas as unidades operacionais da Vale.

Energia Zero							
Data de Programação		Data de Solicitação		Estado da Ordem		Pontos Bloqueio	
Exibir Síntese	Atualizar	Criar Ordem de Bloqueio					
01/04/2017 10:00	31/03/2017 10:42	Liberação	Equipamento	Corretiva	3PE03	• 3PE03M1 • 3TC01M1 • 3TC04M1 • 3TC21M1 • 3TC03M1	

Fig. 05 – Sistema Energia Zero.

- Sistema de seleção de EPIs específicos para atividades em zonas controladas**

Uma das mais comuns dificuldades enfrentadas pelos profissionais que atuam nas instalações elétricas é a identificação do conjunto de equipamentos de proteção adequados às atividades que serão desenvolvidas em cada equipamento ou painel. Essa fragilidade também

está presente no dia a dia das equipes de eletricistas, técnicos e engenheiros da Vale, por isso, como forma de auxiliar na tomada de decisão pela proteção adequada, foi desenvolvido um sistema informatizado de identificação dos riscos envolvidos nas atividades, dentro de uma plataforma tecnológica denominada ARVIS. Através de um fluxo com perguntas diretas sobre as intervenções e as condições das instalações, que, contando com a utilização de um dispositivo móvel, conectado ou não na rede corporativa, verifica permissões e treinamentos, força a identificação de questões técnicas das instalações, informa quais equipamentos de proteção são mais indicados e registra históricos dos resultados para permitir o tratamento de desvios e auxilia na investigação de ocorrências, além de ser uma excelente ferramenta de conscientização e disciplina na atuação em ambientes com riscos elétricos.

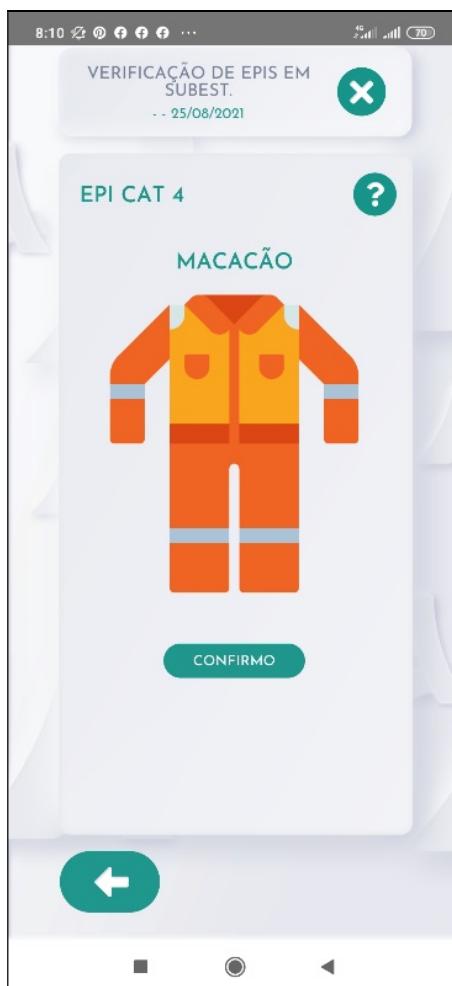


Fig. 06 – Tela do sistema ARVIS

Estas soluções fazem parte de um programa da Vale para garantir o nosso maior Valor que é "A Vida em primeiro lugar" e para alcançar nossa ambição de ser uma empresa reconhecida pela sociedade por ser referência em segurança.

Uma estratégia de priorização baseada nestas soluções de engenharia vem sendo implantada

para obtenção de projetos intrinsecamente mais seguros e identificação de novos controles que reduzam ainda mais o risco das instalações elétricas, fazendo com que suas atividades atinjam limites de riscos toleráveis.

3.0 – CONCLUSÕES

A busca por soluções de engenharia e de gestão da rotina que tenham como objetivo a redução de acidentes pela redução da exposição de profissionais se mostra como uma excelente alternativa ao desenvolvimento de grandes projetos de eliminação dos referidos riscos, sobretudo na área elétrica, que tendem a demandar recursos consideráveis e de implementação complexa que, por vezes, são despriorizados dos portfólios de investimentos das empresas devido às dificuldades de implementação, ainda que representem atendimento à requisitos legais. A adoção de soluções como as apresentadas neste trabalho, permite que indústrias e empresas possam obter condições de segurança muito superiores às condições originais. Dessa forma, conclui-se que com dedicação, ciência, criatividade, foco e boas parcerias pode-se alcançar resultados notáveis que podem fazer com que os processos produtivos sejam ainda mais sustentáveis, principalmente pela priorização da preservação da saúde e integridade das pessoas que fazem com que as instalações elétricas de empresas e indústrias continuem desempenhando seu papel previsto em projeto, fornecer energia de forma segura e confiável a equipamentos e processos.

4.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *Manual RECAF – Proteção contra Arco Voltaico*. RECAF COMERCIAL E TECNICA LTDA, São Bernardo do Campo – SP. www.recaf.com.br
- [2] *Manual de auxílio na interpretação e aplicação da nova NR-10*. Joaquim Gomes Pereira e João José Barrico de Souza. Editora LTr, 2005, Rio de Janeiro, RJ.
- [3] *Proteção Elétrica em Subestações: Uma abordagem sobre a energia incidente*. Filipe Barcelos Resende. UFMG, 2016, Belo Horizonte, MG.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

ESTUDO DINÂMICO DE ENERGIA INCIDENTE CONSIDERANDO CONTRIBUIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO COM DECREMENTO CA DE MÁQUINAS ROTATIVAS

Edson Fernando Machado Sato
Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras
eng.esato@gmail.com

José Maria de Carvalho Filho
Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI
jmariacarvalho@gmail.com

RESUMO

O modelo matemático da IEEE Std 1584-2018, norma para cálculo de energia incidente de arco elétrico, considera que a corrente de falta franca, que é a corrente de curto-círcuito simétrica eficaz, permanece constante ao longo de toda a duração de arco. Esta premissa, no entanto, não é sempre verdadeira. Alguns tipos de fontes fornecem uma corrente de curto-círcuito simétrica eficaz que é máxima imediatamente após o início do evento, decaindo com o decorrer do tempo. Esta característica é conhecida como “decremento CA”, e pode ter influência no tempo de atuação da proteção e no valor da energia incidente resultante. A norma alerta que este fenômeno deve ser levado em consideração em um estudo de energia incidente, contudo, não apresenta exemplos nem diretrizes de como se realizar esta simulação dinâmica. Também são poucos os exemplos na literatura, e os softwares comerciais, via de regra, não calculam a energia incidente considerando o decremento CA. Neste contexto, este trabalho analisa as técnicas válidas para aplicar o método IEEE Std 1584-2018 a correntes variáveis, e propõe um roteiro para a realização de um estudo dinâmico de energia incidente considerando o decremento CA. Utilizando um script de cálculo, um estudo de caso é apresentado, tendo como base uma subestação industrial de uma unidade de refino de petróleo que, além da concessionária, conta com contribuições de curto-círcuito de máquinas rotativas. Ao final, é discutido o balanço entre o esforço para a realização deste cálculo detalhado, e o ganho em termos de informação e otimização das medidas de proteção contra o arco elétrico.

1.0 – INTRODUÇÃO

Embora a utilização em larga escala da eletricidade na indústria tenha se iniciado no final do Século XIX [1] [2], o primeiro método para estimar os efeitos térmicos do arco elétrico só foi proposto nos anos 80 [3]. Nas décadas seguintes, vários trabalhos [4] [5] contribuíram para o aumento do conhecimento sobre o fenômeno e para a melhoria dos métodos para quantificá-lo.

Em 2002, foi publicada a primeira edição da IEEE Std 1584 [6], sendo a primeira norma técnica dedicada ao cálculo de energia incidente. Esta norma, que se tornou o método mais popular na indústria, teve sua segunda edição [7] publicada no final de 2018, com mudanças significativas. Um novo modelo matemático foi proposto, incluindo parâmetros que antes não eram avaliados, além de equações tão extensas que a sua resolução manual pode ser considerada impraticável, sendo comum a utilização de planilhas eletrônicas ou de softwares comerciais especializados.

A Fig. 1 ilustra, esquematicamente, os conceitos básicos de um estudo de energia incidente pelo método IEEE Std 1584-2018 (representação monofásica).

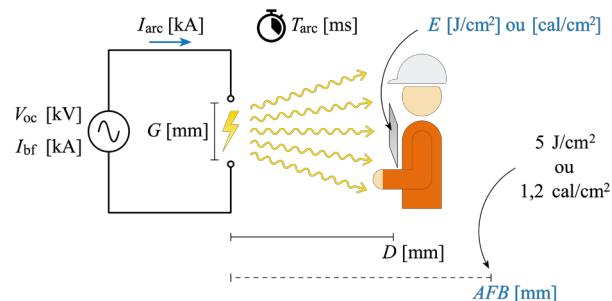


Fig. 1. Representação conceitual método IEEE Std 1584-2018.

Seja uma instalação elétrica que possui uma tensão de circuito aberto (V_{oc}) e uma corrente de falta franca (I_{bf}) definida através de um estudo de curto-círcuito. Se, em alguma parte desta instalação, dois pontos energizados com potenciais diferentes estiverem separados por uma distância (G) relativamente pequena, e isolados apenas pelo ar, um arco elétrico poderá ser iniciado se houver uma ruptura dielétrica. Quando isto ocorrer, o arco elétrico drenará da fonte uma corrente de arco (I_{arc}), que terá um valor menor do que o da corrente de falta franca, em função da impedância do arco. A corrente de arco é o primeiro parâmetro estimado pelo método IEEE Std 1584-2018.

Uma vez iniciado, e enquanto o sistema elétrico sustentá-lo, o arco elétrico irá liberar calor ao seu entorno. Se houver um trabalhador posicionado a uma distância de trabalho (D) do arco, e se este trabalhador permanecer nesta posição por toda a duração de arco (T_{arc}), ele receberá uma quantidade de energia térmica definida como energia incidente (E), sendo este o segundo parâmetro estimado pelo método IEEE Std 1584-2018. O método também define que deva ser calculada a distância do arco na qual a energia incidente é equivalente a $1,2 \text{ cal/cm}^2$, valor que é considerado o limiar de energia térmica a partir do qual uma pessoa pode sofrer queimaduras de segundo grau na sua pele, se desprotegida. Esta distância é conhecida como limite de aproximação segura, ou *Arc Flash Boundary (AFB)*, e é o terceiro e último parâmetro estimado pelo método IEEE Std 1584-2018.

Além dos parâmetros ilustrados na Fig. 1, o método também considera a configuração dos eletrodos (E.C.) e as dimensões (*Height* \times *Width* \times *Depth*) do compartimento que os envolve, se for o caso.

O modelo matemático empiricamente desenvolvido considera como dado de entrada uma corrente de falta franca (I_{bf}) que é constante ao longo da duração de arco (T_{arc}), conforme Fig. 2.

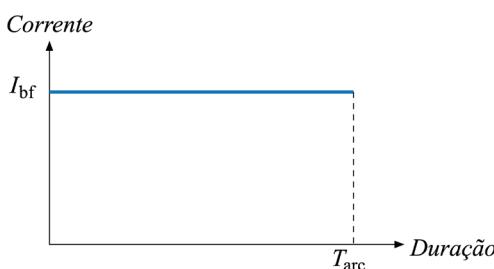


Fig. 2. Corrente de falta franca constante ao longo da duração de arco.

As principais fontes de um sistema elétrico de potência são as máquinas rotativas, que fornecem uma corrente de curto-círcuito simétrica eficaz que é máxima imediatamente após o início do evento, decaindo com o decorrer do tempo. Esta característica é conhecida como “decremento CA”, representada na Fig. 3.

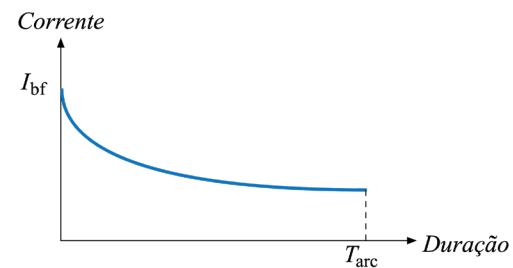


Fig. 3. Corrente de falta franca com decremento CA.

O decremento CA ocorre em função do comportamento variável das reatâncias das máquinas rotativas durante um curto-círcuito, sendo menor nos geradores, moderado nos motores síncronos, e acentuado nos motores de indução. A contribuição de curto-círcuito da concessionária, que possui um sistema elétrico muito maior que os sistemas industriais, é considerada constante [8].

A IEEE Std 1584-2018 alerta que as contribuições decrescentes devem ser consideradas num estudo de energia incidente. No entanto, a norma não apresenta diretrizes de como realizar esta simulação dinâmica. Os softwares comerciais, geralmente, realizam o cálculo de energia incidente apenas com contribuições constantes. Em alguns casos, oferecem a possibilidade de aplicar um degrau nas contribuições de geradores, e limitar a duração das contribuições de motores.

Na literatura, este tema é abordado por Das [9], que sugere dividir a contribuição de curto-círcuito total em alguns segmentos, calcular a energia incidente de cada segmento considerando sua corrente média, e obter a energia incidente total através do somatório das energias incidentes dos segmentos. O exemplo apresentado por Das em [9], cabe ressaltar, é extremamente simples. Além disso, o autor não discute em detalhes a aplicação do método proposto, tampouco apresenta os cálculos do seu exemplo numérico. O cálculo do limite de aproximação segura não é abordado.

Neste contexto, este trabalho discutirá a aplicabilidade de técnicas de análise de circuitos ao cálculo de energia incidente considerando o decremento CA, e proporá um roteiro de cálculos através de um estudo de caso.

2.0 – APLICABILIDADE DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE CIRCUITOS

A IEEE Std 1584-2018 não esclarece qual método de simulação dinâmica é aplicável para o cálculo da energia incidente em sistemas com correntes variáveis. Deste modo, faz-se necessário avaliar a aplicabilidade e a exatidão de algumas técnicas para a solução destes sistemas.

2.1 – Segmentação no Tempo da Corrente de Falta Franca

A primeira análise sugerida é a validação matemática do cálculo da energia incidente total através da soma da energia incidente de segmentos de uma corrente de falta franca constante.

A Fig. 4 apresenta no caso (a) uma corrente de falta franca de 20 kA, com uma duração de arco de 500 ms. Os outros casos apresentam a mesma corrente segmentada em (b) 2 intervalos de 250 ms, (c) 5 intervalos de 100 ms e (d) 20 intervalos de 25 ms.

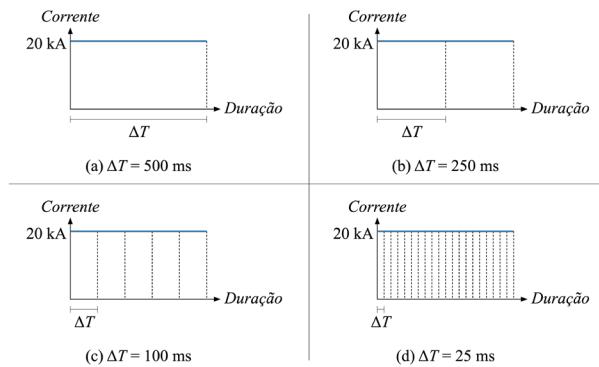


Fig. 4. Análise da segmentação no tempo.

Para esta análise, foram utilizados parâmetros arbitrários (13,8 kV, VCBB, invólucro 1143 × 762 × 762 mm, $G = 152$ mm, $D = 914,1$ mm). A energia incidente total (E_{Tot}) foi calculada como a soma da energia incidente dos segmentos ($E_{\Delta T}$). De maneira análoga, o limite de aproximação segura total (AFB_{Tot}) foi calculado como a soma do limite de aproximação segura de cada segmento ($AFB_{\Delta T}$). A Tabela 1 mostra os resultados.

Tabela 1. Resultados da análise pela segmentação.

	(a) 500 ms	(b) 250 ms	(c) 100 ms	(d) 25 ms
$E_{\Delta T}$ [cal/cm ²]	19,4	9,69	3,87	0,97
E_{Tot} [cal/cm ²]	19,4	19,4	19,4	19,4
$AFB_{\Delta T}$ [mm]	4.792	3.171	1.838	805
AFB_{Tot} [mm]	4.792	6.342	9.188	16.096

Considerando o caso (a) como o resultado correto, pode-se verificar que nos demais casos se obteve o mesmo valor de energia incidente, confirmando a validade desta técnica, que é possível em função da relação linear entre a duração de arco e a energia incidente.

Entretanto, verifica-se que a técnica não é válida para o cálculo do limite de aproximação segura. A relação não linear entre a energia incidente e a distância faz com que sejam introduzidos erros, que se acumulam com a quantidade de segmentos utilizados.

2.2 – Valor Médio de uma Corrente Variável

A energia incidente (E) de arco elétrico não é calculada diretamente a partir da corrente de falta franca (I_{bf}), que é um dado de entrada do modelo matemático, mas a partir da corrente de arco (I_{arc}), que é um dado calculado, além de outros parâmetros. Os dados dos ensaios realizados pelo grupo de trabalho da IEEE Std 1584-2018 demonstraram que a relação entre a corrente de arco (I_{arc}) e a corrente de falta franca (I_{bf}) não pode ser considerada linear devido às variações de impedância do sistema.

Uma implicação desta relação não linear entre a corrente de falta franca e a corrente de arco é que a energia incidente resultante de um sistema em que a corrente de falta franca é continuamente decrescente não pode ser calculada com exatidão a partir do valor médio desta corrente. A título de exemplo, foi avaliada uma corrente de curto-círcuito com decaimento, discretizada em segmentos de curta duração (e.g. 0,1 ms), de modo a se aproximar do perfil contínuo da corrente real, indicada na Fig. 5 (a). Na Fig. 5 (b) é apresentado o gráfico com a corrente média equivalente, calculada a partir da integral da corrente com decaimento, dividida pela duração total do evento (100 ms).

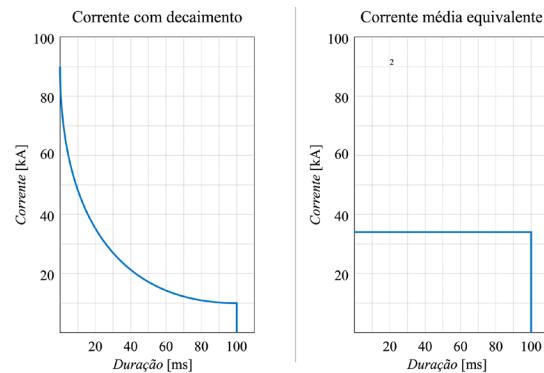


Fig. 5. Corrente com decaimento e sua corrente média equivalente.

Foram utilizados parâmetros arbitrários (480 V, VCBB, invólucro 508 × 508 × 508 mm, $G = 32$ mm, $D = 609,6$ mm). A energia incidente calculada pela soma das parcelas de energia incidente de cada segmento da corrente com decaimento é **4,54** cal/cm², enquanto que a energia incidente calculada pela corrente média equivalente é **5,16** cal/cm².

O cálculo da energia incidente pelo valor médio de uma corrente variável introduz um erro que aumenta na medida que aumenta a variação da corrente no segmento.

Esta técnica, no entanto, pode ser utilizada se os segmentos forem cuidadosamente selecionados, visando minimizar o erro de estimativa.

2.3 – Superposição de Fontes

Um princípio aplicado na solução de circuitos elétricos com múltiplas fontes é o Teorema da Superposição, pelo qual pode-se afirmar que a corrente elétrica total em um certo ramo do circuito é igual a soma das contribuições individuais de cada fonte. Este teorema advém da propriedade aditiva das funções lineares.

No entanto, a relação não linear entre a corrente de arco (I_{arc}) e a corrente de falta franca (I_{bf}), *a priori*, invalida a aplicação do método da superposição para o cálculo de energia incidente de um sistema com múltiplas fontes.

Para ilustrar esta constatação com um exemplo numérico, a Fig. 6 mostra um sistema com duas fontes que possuem contribuições de curto-circuito de $I_{bf1} = 20 \text{ kA}$ e $I_{bf2} = 80 \text{ kA}$.

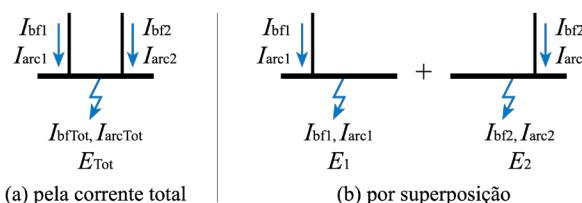


Fig. 6. Resolução pela corrente total e por superposição.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos cálculos de energia incidente pela corrente total (a), e pelo método da superposição (b), utilizando-se parâmetros arbitrários (480 V, VCBB, invólucro 508 × 508 × 508 mm, $G = 32 \text{ mm}$, $D = 609,6 \text{ mm}$, $T_{arc} = 200 \text{ ms}$).

Tabela 2. Resultados da análise por superposição.

(a) pela corrente total	(b) por superposição
1º) Calcular E_{Tot} a partir de I_{bfTot} : $I_{bfTot} = 100 \text{ kA}$ $I_{arctot} = 46,7 \text{ kA}$ $E_{Tot} = 19,7 \text{ cal/cm}^2$	1º) Calcular E_1 e E_2 separadamente: $I_{bf1} = 20 \text{ kA}$ $I_{bf2} = 80 \text{ kA}$ $I_{arc1} = 16,1 \text{ kA}$ $I_{arc2} = 43,0 \text{ kA}$ $E_1 = 6 \text{ cal/cm}^2$ $E_2 = 18 \text{ cal/cm}^2$
2º) Calcular I_{arc1} e I_{arc2} proporcionais a I_{bf1} e I_{bf2} : $I_{bf1} = 20\% I_{bfTot}$ $I_{bf2} = 80\% I_{bfTot}$ $I_{arc1} = 20\% I_{arctot}$ $I_{arc2} = 80\% I_{arctot}$ $I_{arc1} = 9,3 \text{ kA}$ $I_{arc2} = 37,4 \text{ kA}$	2º) Calcular E_{Tot} pela soma das energias parciais (E_1 e E_2): $E_{Tot} = E_1 + E_2 = 24,2 \text{ cal/cm}^2$

Considerando o cálculo pela corrente total como correto, verifica-se que a aplicação do método da superposição leva a valores incorretos tanto da energia incidente, quanto das contribuições de corrente de arco, que representam as correntes que passam pelos dispositivos de proteção durante o evento, podendo levar a avaliações incorretas do tempo de atuação das proteções de tempo inverso, se for o caso.

3.0 – DEFINIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O sistema escolhido para o estudo de caso foi uma subestação de uma Unidade de

Craqueamento Catalítico Fluido de Resíduo (URFCC) de uma refinaria de petróleo.

O sistema elétrico completo da refinaria conta com mais de quarenta subestações, alimentadas pela rede de 13,8 kV, omitidas neste estudo por questão de simplicidade.

No modelo utilizado neste estudo, destacam-se os seguintes subsistemas:

- Subestação de conexão com a concessionária, em 69 kV, e transformadores principais de 69 para 13,8 kV;
- Painéis de distribuição geral (PN-01A/B), em 13,8 kV, onde estão conectados os turbogeradores (GE-TE e GE-TG), e de onde partem alimentadores para outras subestações de processo (omitidas);
- Painéis de distribuição local (PN-02A/B), que alimentam os transformadores da unidade de processo (TF-02A/B, TF-03A/B e TF-04A/B), que por sua vez alimentam centros de distribuição de carga (PN-03A/B, PN-04A/B e PN-05A/B).

A Fig. 7 mostra um diagrama unifilar simplificado do sistema utilizado no estudo de caso, com destaque para os conjuntos de manobra e comando (PN's) a serem avaliados.

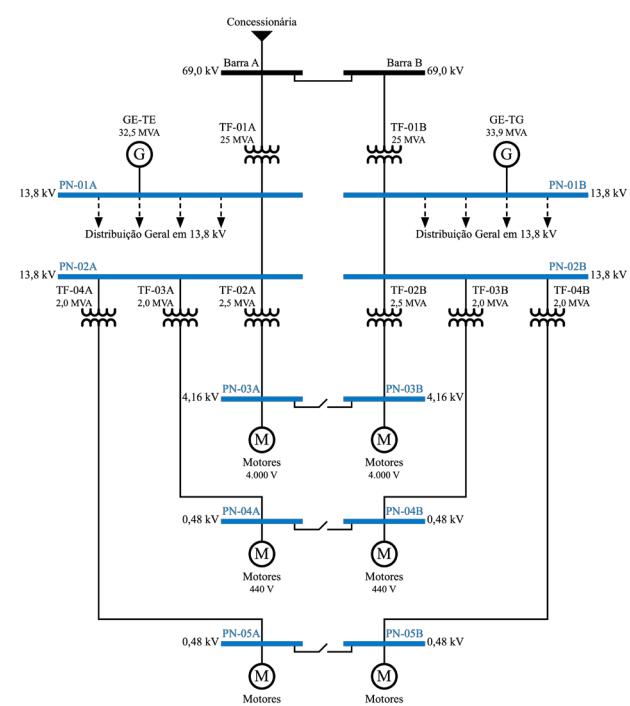


Fig. 7. Diagrama unifilar simplificado.

A subestação de processo alimenta diversos motores elétricos, todos assíncronos, com tensões nominais de 4.000 e 440 V. O sistema de proteção não conta com relés de arco, toda a proteção é baseada em relés digitais “convencionais”, com sensores de corrente apenas.

4.0 – LEVANTAMENTO DE DADOS E DEFINIÇÃO DE PREMISSAS

4.1 – Parâmetros para Estudo "Convencional"

O primeiro conjunto de dados a ser definido corresponde aos dados necessários para elaboração de um estudo "convencional" de energia incidente, i.e., um estudo considerando as correntes de falta franca constantes.

1) Dados mecânicos e construtivos:

- *Determinação dos equipamentos a serem avaliados:* O estudo foi realizado nos painéis de distribuição (PN-01A/B, PN-02A/B, PN-03A/B, PN-04A/B e PN-05A/B), considerando um comportamento típico em cada um deles. Não é possível calcular a energia incidente na subestação de 69 kV pelo método IEEE Std 1584-2018, pois está fora da faixa de aplicação;
- *Determinação da configuração de eletrodo (E.C.):* Em todos os compartimentos, a configuração atribuída foi VCBB;
- *Determinação do espaçamento entre eletrodos (G):* Foi utilizado o espaçamento típico definido na norma;
- *Determinação das dimensões do invólucro (Height × Width × Depth):* Foram utilizadas as dimensões típicas definidas na norma.

2) Dados elétricos e operacionais:

- *Determinação da corrente de curto-círcuito franca (I_{bf}):* Foi utilizado um software comercial para o cálculo das correntes de curto-círcuito simétricas iniciais;
- *Determinação dos modos de operação:* O estudo foi realizado com a configuração "I-I", i.e., com os disjuntores de interligação dos painéis da subestação de processo abertos. Este é o modo de operação prioritário do sistema;
- *Determinação dos cenários de falha:* Foi considerada a ocorrência de arco elétrico nos cubículos dos painéis, com atuação das proteções de sobrecorrente;
- *Determinação da distância de trabalho:* Foram utilizadas as distâncias típicas definidas na norma.

4.2 – Parâmetros para Estudo "Dinâmico"

Além dos dados "convencionais", é necessário determinar as curvas de contribuição de curto-círcuito das máquinas rotativas com decreimento CA.

- *Geradores:* A curva de decreimento CA, tipicamente, é fornecida pelo fabricante. Alternativamente, a curva pode ser traçada a partir dos parâmetros da máquina (reatâncias, constantes de tempo etc.)

aplicados à equação característica da contribuição de curto-círcuito [9];

- *Motores:* Ao contrário dos geradores, não possuem uma documentação tão detalhada. Entretanto, a contribuição de curto-círcuito com decreimento CA pode ser aproximada por valores típicos [10].

4.3 – Premissas Adotadas para Estudo "Dinâmico"

- 1) *Limite de influência dos decrementos CA:* A rigor, os decaimentos de corrente se propagam através dos transformadores, contudo, sabe-se que as impedâncias destes transformadores têm efeito atenuador ou limitador para as correntes de curto-círcuito. Além disso, computar individualmente os decrementos CA de contribuições de curto-círcuito de máquinas conectadas em barras diversas da barra em estudo pode se tornar uma tarefa extenuante ou impraticável. Portanto, foram estabelecidos alguns critérios para simplificar ou mesmo viabilizar o estudo de caso:
 - a) *Geradores:* Foram considerados os decrementos CA das contribuições dos geradores apenas nas barras diretamente conectadas aos mesmos, incluindo barras adjacentes conectadas por cabos (mesmo nível de tensão);
 - b) *Motores:* Foram considerados os decrementos CA das contribuições dos motores nas barras que alimentam os respectivos motores, e nas barras imediatamente à montante destas, mesmo que separadas por transformador.
- 2) *Passo de simulação:* É a duração dos segmentos da corrente discretizada. Para cada segmento (ΔT), deve ser realizado um cálculo completo de energia incidente. A energia incidente resultante será a soma destes resultados parciais. Sendo a segmentação da corrente no tempo válida para qualquer tamanho de segmento, deve-se considerar:
 - a) *Passo menor:* A curva discretizada se aproxima da curva real (Fig. 8), adaptando-se mais facilmente a perfis "recortados", i.e., com degraus, que podem ocorrer em função das atuações, em tempos distintos, das proteções das contribuições. Se o passo for suficientemente pequeno, pode-se considerar a corrente constante no segmento, sem a necessidade de cálculo da corrente média. Com passo menor, mais cálculos precisam ser processados.

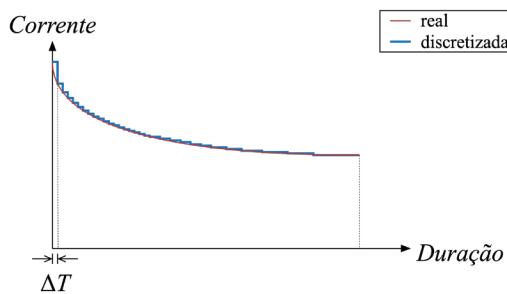


Fig. 8. Passo de simulação menor.

- b) *Passo maior*: É necessário calcular a corrente média (\bar{i}_n) em cada segmento (Fig. 9). Pode haver erro na determinação do tempo de operação da proteção, caso esta seja baseada em relés de sobrecorrente com curva do tipo de tempo inverso, pois esta avaliação será feita pela corrente de arco média no segmento. Pode ser necessário reajustar o tamanho dos segmentos de análise para etapa do cálculo da energia incidente, se houver algum degrau na curva da corrente de falta franca total no meio de algum segmento. Com passo maior, menos cálculos precisam ser processados.

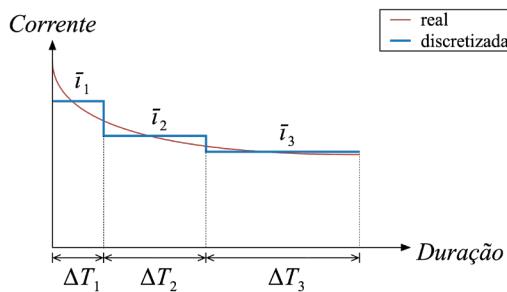


Fig. 9. Passo de simulação maior.

5.0 – PROPOSTA DE METODOLOGIA

A metodologia proposta para realização do estudo dinâmico de energia incidente é baseada na segmentação no tempo da corrente de falta franca. Para sua execução, é necessário dispor de uma ferramenta computacional que realize sequencialmente os cálculos previstos na IEEE Std 1584-2018. Neste estudo, foi desenvolvido um script na plataforma MATLAB, completamente descrito em [10].

Em função da facilidade de manipulação de dados com o script utilizado e da alta capacidade de processamento dos computadores pessoais atuais, optou-se por utilizar um passo de simulação de pequena duração, i.e., 1 ms, que é uma base de tempo conveniente para se trabalhar com a operação dos dispositivos do sistema de proteção.

O sistema escolhido para o estudo de caso apresenta uma situação com certa complexidade:

- O arco elétrico pode ser alimentado por múltiplas fontes;
- Será considerado o decremento CA nas contribuições das máquinas rotativas;
- Os relés de proteção são baseados em elementos de sobrecorrente de tempo inverso, sendo dependentes da magnitude da corrente de arco, implicando em tempos de atuação distintos.

A Fig. 10 representa o diagrama unifilar de um painel similar aos painéis PN-01A/B do estudo de caso. Na Fig. 10 (a) é indicada a corrente de falta franca total (I_{bf_Tot}) que deve ser a soma das contribuições I_{bf_c} , I_{bf_g} e I_{bf_m} . Da mesma maneira, a corrente de arco total (I_{arc_Tot}) deve ser a soma das contribuições I_{arc_c} , I_{arc_g} e I_{arc_m} .

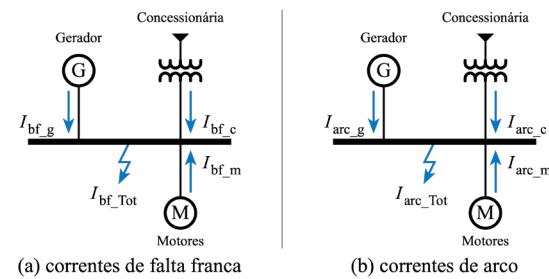


Fig. 10. Correntes de falta franca e de arco com múltiplas fontes.

Neste caso, a parte mais trabalhosa para o cálculo de energia incidente é determinar a curva da corrente de falta franca total considerando as atuações das proteções de cada fonte, pois estas dependem das correntes de arco. Assim, o seguinte passo-a-passo é sugerido:

- 1) *Determinar I_{bf} total (sem atuação da proteção)*: Em sistemas com múltiplas fontes de curto-circuito, deve-se traçar as curvas das contribuições de cada fonte para se determinar a corrente de falta franca (I_{bf}) total através da sua soma;
- 2) *Calcular I_{arc} total*: Após a determinação de I_{bf} total, utilizar o script para calcular as correntes de arco (I_{arc}) totais (máxima e mínima) de cada segmento de 1 ms;
- 3) *Decompor I_{arc} total*: A corrente de arco (I_{arc}) total é a corrente que flui pelo arco elétrico. Esta corrente é a soma das contribuições das diversas fontes, que por sua vez são as correntes que circulam pelos sistemas de proteção durante um arco elétrico, e que devem ser consideradas para avaliação do tempo de operação dos relés com curva de tempo inverso. Para a determinação destas contribuições, a IEEE Std 1584-2018 assume que as fontes contribuem para a corrente de arco (I_{arc}) total na mesma proporção que contribuem para a corrente de curto-circuito (I_{bf}) total;

A Fig. 11 representa esquematicamente os passos 1 a 3.

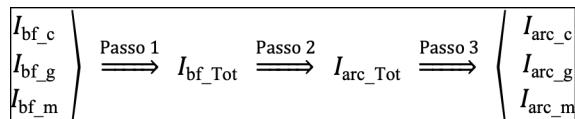


Fig. 11. Passos 1 a 3.

- 4) *Determinar a duração de cada contribuição:* A duração de arco de cada contribuição deve ser avaliada individualmente, pois dependem de dispositivos de proteção distintos. Esta tarefa é relativamente simples quando o sistema de proteção é baseado em relés de arco ou de sobrecorrente do tipo tempo definido, mas torna-se particularmente trabalhosa quando depende de proteções do tipo tempo inverso ou ainda do tipo adaptativo;
- 5) *Determinar I_{bf} total (considerando atuação da proteção):* Após determinar as durações de cada contribuição, deve-se recompor a corrente de curto-círcuito (I_{bf}) total, como exemplificado na Fig. 12. A rigor, deve ser feita uma curva de corrente de curto-círcuito total baseada nas atuações de proteção provocadas pela corrente de arco máxima (ou plena) e outra baseada nas atuações de proteção provocadas pela corrente de arco mínima (ou reduzida);

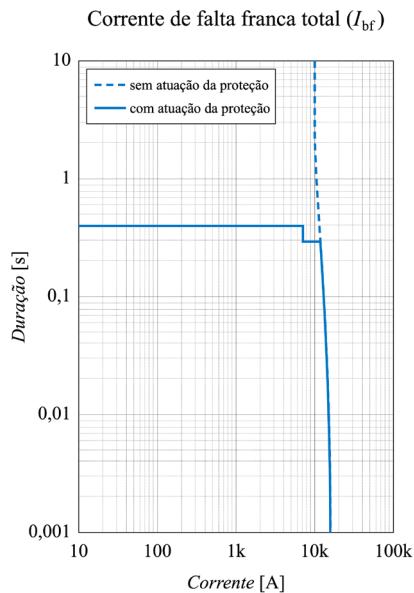


Fig. 12. Corrente de falta franca (I_{bf}) total sem e com atuação da proteção.

- 6) *Calcular E :* A etapa final do estudo consiste em rodar o script com as correntes de curto-círcuito definidas no passo anterior e, em seguida, somar a energia incidente de cada segmento.

7) *Calcular AFB:* Na literatura, não há referências que discutam como fazer o cálculo do limite de aproximação segura (AFB) em situações com correntes variáveis como no caso do decremento CA. No entanto, de posse do conceito de que o limite de aproximação segura é “a distância da potencial fonte do arco elétrico na qual a energia incidente é calculada em 1,2 cal/cm²”, e que a distância de trabalho é “a distância na qual é calculada a energia incidente”, pode-se sugerir um método iterativo para se chegar a um valor conceitualmente válido para o limite de aproximação segura. O método consiste em variar a distância de trabalho (D) até que se atinja como resultado a energia incidente (E) de aproximadamente 1,2 cal/cm². Quando isto ocorrer, o limite de aproximação segura (AFB) será o último valor utilizado como distância de trabalho (D). A Fig.13 apresenta o algoritmo deste processo.

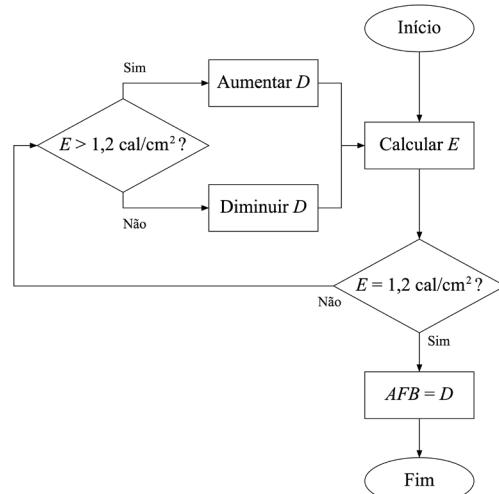


Fig. 13. Algoritmo sugerido para cálculo de AFB.

Este trabalho iterativo é facilitado pelo uso do script desenvolvido, com o qual se pode chegar ao resultado em poucas tentativas. Uma sub-rotina para automatizar estes cálculos pode ser desenvolvida.

6.0 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 – Resultados Consolidados

O método proposto no item anterior para o cálculo da energia incidente e do limite de aproximação segura foi aplicado em todos os conjuntos de manobra e comando do estudo de caso. Para todos os equipamentos, foram adotadas as mesmas premissas, ou seja, o cálculo realizado para apenas um compartimento, com dimensões típicas, com o sistema operando na mesma condição. Os resultados se encontram na Tabela 3.

7/10

Tabela 3. Resultados consolidados.

	V_{oc} [kV]	E [cal/cm ²]	AFB [mm]
PN-01A	13,8	8,67	2.969
PN-01B	13,8	10,49	3.325
PN-02A	13,8	4,87	2.106
PN-02B	13,8	5,56	2.280
PN-03A	4,16	3,62	1.732
PN-03B	4,16	3,70	1.752
PN-04A	0,48	22,11	3.051
PN-04B	0,48	22,34	3.069
PN-05A	0,48	22,06	3.047
PN-05B	0,48	22,31	3.066

Os resultados do estudo, por si só, não permitem uma avaliação crítica do método. Deste modo, uma análise qualitativa será realizada nos subitens a seguir.

6.2 – Comparação com o Método Proposto por Das

Foi realizado o cálculo de energia incidente do PN-01A pelo método apresentado por Das [9], que sugere a divisão da corrente de curto-círcuito em poucos segmentos, com a estimativa da corrente média em cada um deles.

A Fig. 14 apresenta a corrente de curto-círcuito total (I_{bf}), e as correntes médias de quatro segmentos convenientemente escolhidos.

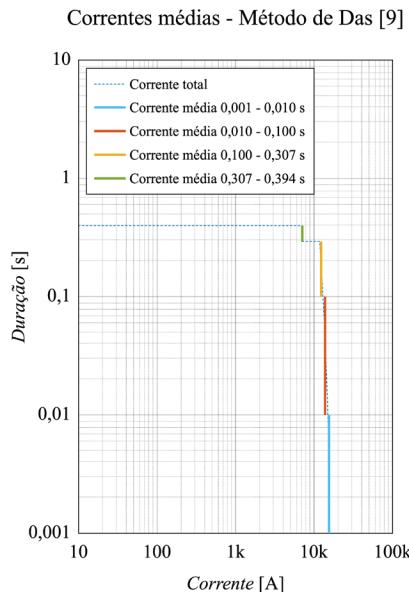


Fig. 14. Comparação com o método proposto por Das [9].

A Tabela 4 apresenta o resultado de energia incidente para o PN-01A obtido com passo de simulação de 1 ms, e resultado obtido pelo método de Das [9]. Ambos convergiram para o mesmo valor.

Tabela 4. Comparação de resultados entre o método proposto neste trabalho e o método proposto por Das [9].

Método Proposto		Método de Das [9]	
Segmento [s]	E [cal/cm ²]	Segmento [s]	E [cal/cm ²]
0,001 – 0,002	0,0291	0,001 – 0,010	0,26
0,002 – 0,003	0,0290	0,010 – 0,100	2,36
...	...	0,100 – 0,307	4,77
0,393 – 0,394	0,0136	0,307 – 0,394	1,27
TOTAL (Σ)	8,67	TOTAL (Σ)	8,67

Em ambos os métodos, as etapas de preparação dos dados são as mesmas. A principal diferença ocorre após a definição da corrente de falta franca no seu formato “real”, i.e., considerando as atuações da proteção. No método proposto por Das, deve-se dividir a curva da corrente de falta franca em poucos segmentos e estimar a corrente média em cada um deles. Isto implica num relativo baixo esforço computacional, no entanto, é necessário uma análise cuidadosa para escolha de segmentos convenientes a fim de minimizar a inexactidão no cálculo de energia incidente. No método proposto neste trabalho, as correntes são discretizadas em segmentos de 1 ms. Isto implica num maior esforço computacional, pois é necessário um cálculo de energia incidente completo a cada 1 ms, mas elimina a etapa analítica da definição dos segmentos e respectivas correntes médias.

Ressalta-se também que Das [9] não sugere como realizar o cálculo do limite de aproximação segura (AFB) num estudo dinâmico.

A Tabela 5 apresenta uma comparação entre os métodos.

Tabela 5. Comparação entre características do método proposto neste trabalho e do método proposto por Das [9].

	Método Proposto	Método de Das [9]
Esforço analítico	MENOR (segmentos de 1 ms, sem necessidade de calcular correntes médias)	MAIOR (requer definir segmentos convenientes e calcular suas correntes médias)
Esforço computacional	MAIOR (requer calcular a energia incidente de muitos segmentos)	MENOR (requer calcular a energia incidente de poucos segmentos)
Limite de aproximação segura	SIM (é proposto um método iterativo)	NÃO (o autor não aborda o assunto)

6.3 – Comparação com o Cálculo sem Considerar o Decremento CA

Para avaliar a diferença entre considerar ou não o decremento CA no estudo de energia incidente, foi feito o cálculo para os dez conjuntos de manobra e comando deste estudo de caso, considerando as correntes de falta constantes e com o mesmo valor da contribuição simétrica inicial obtida no estudo de curto-círcuito. Além disso, nos casos em que as contribuições parciais cessam em momentos diferentes, foi considerada a maior duração.

A Tabela 6 mostra os resultados dos cálculos realizados nestas condições, e as respectivas diferenças para o estudo base (com decremento CA).

Tabela 6. Comparação entre cálculos com e sem considerar o decremento CA.

	V_{oc} [kV]	E [cal/cm ²] (com decremento)	E [cal/cm ²] (sem decremento)	Diferença (sem/com)
PN-01A	13,8	8,67	11,38	+31%
PN-01B	13,8	10,49	15,69	+50%
PN-02A	13,8	4,87	5,57	+14%
PN-02B	13,8	5,56	6,20	+11%
PN-03A	4,16	3,62	3,88	+7%
PN-03B	4,16	3,70	4,37	+18%
PN-04A	0,48	22,11	23,45	+6%
PN-04B	0,48	22,34	24,66	+10%
PN-05A	0,48	22,06	22,36	+1%
PN-05B	0,48	22,31	23,83	+7%

Como esperado, em todos os casos houve um aumento da energia incidente estimada. Esta diferença de estimativa depende principalmente:

- *Da proporção que a contribuição das máquinas rotativas representa da corrente de curto-círcuito total:* A maior diferença ocorreu no PN-01B, que é um painel diretamente conectado a um gerador, no qual o aumento na estimativa de energia incidente foi de 50%. A menor diferença ocorreu no PN-05A, que no cenário avaliado estava com apenas um motor em operação, resultando num aumento desprezível na estimativa de energia incidente (1%);
- *Da duração das contribuições oriundas das máquinas rotativas:* Uma vez que a diferença entre a corrente de curto-círcuito com e sem decremento CA é nula no tempo igual a zero, a diferença na energia incidente resultante tende a ser desprezível para contribuições muito rápidas, conforme Fig. 15.

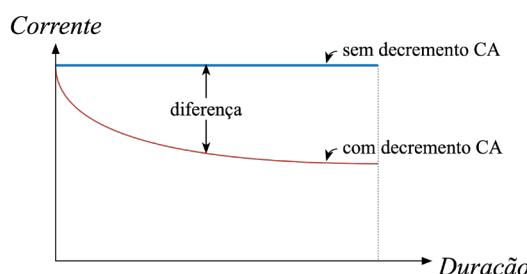


Fig. 15. Diferença na contribuição com e sem decremento CA.

De maneira geral, os softwares comerciais consideram as contribuições de curto-círcuito constantes, o que aumenta a estimativa de energia incidente, por um lado favorecendo a proteção do

trabalhador, indicando EPIs (Equipamentos de Proteção Individual) superdimensionados, por outro lado penalizando o conforto e até mesmo comprometendo a exequibilidade da tarefa.

7.0 – CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma proposta de roteiro de cálculos para realização de um estudo dinâmico de energia incidente (E), conforme IEEE Std 1584-2018, considerando o decremento CA das máquinas rotativas.

Inicialmente, a aplicabilidade de algumas técnicas de análise de circuitos foi avaliada, e a metodologia proposta foi apresentada através de um estudo de caso. A aplicação de um método concebido para utilizar como dado de entrada uma corrente constante num estudo com correntes variáveis mostrou-se trabalhosa, mas possível, facilitada pela utilização de um script de cálculo que possibilita a realização de inúmeros casos sequencialmente. Também foi proposto um algoritmo para o cálculo do limite de aproximação segura (AFB), baseado na definição deste conceito.

Por fim, foram avaliados os impactos de se considerar ou não o decremento CA num estudo de energia incidente. A elaboração deste tipo de estudo dinâmico requer certo esforço de engenharia, e sua aplicação deve ser ponderada pelo responsável técnico pelo estudo. Situações em que a contribuição total das máquinas rotativas é pequena em comparação à da concessionária, ou que a proteção de arco é muito rápida, tendem a oferecer menos ganhos em se realizar este estudo detalhado. Por outro lado, nas situações em que a contribuição das máquinas rotativas é considerável (e.g. sistemas isolados, plataformas de petróleo etc.), e que possuem maiores durações de arco, a aplicação desta metodologia de avaliação pode resultar na recomendação de utilização de um EPI otimizado para as equipes de operação e manutenção.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sulzberger, C. L., "Triumph of AC - from Pearl Street to Niagara," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 1, no 3, 2003, IEEE, pg. 64-67.
- [2] Sulzberger, C. L., "Triumph of AC, part 2 - The battle of the currents," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 1, no 4, 2003, IEEE, pg. 70-73.
- [3] Lee, R. H., "The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 18, no 3, IEEE, 1982, pg. 246-251.
- [4] Neal, T. E., Bingham, A. H. e Doughty, R. L., "Protective clothing guidelines for electric arc exposure," *43rd IEEE IAS Petroleum and Chemical*

Industry Committee Annual Conference (PCIC),
Philadelphia, IEEE, 1996.

[5] Doughty, R. L., Neal, T. E. e Floyd II, H. L.,
"Predicting Incident Energy to Better Manage the
Electric Arc Hazard on 600-V Power Distribution
Systems," *45th IEEE IAS Petroleum and Chemical
Industry Committee Annual Conference (PCIC)*,
Indianapolis, IEEE, 1998.

[6] *IEEE Std 1584-2002 – IEEE Guide for
Performing Arc-Flash Hazard Calculations*, Institute
of Electrical and Electronics Engineers, IEEE, 2002.

[7] *IEEE Std 1584-2018 – IEEE Guide for
Performing Arc-Flash Hazard Calculations*, Institute
of Electrical and Electronics Engineers, IEEE, 2018.

[8] *Industrial Power Systems Handbook*,
Donald Beeman, McGraw-Hill, 1955.

[9] *Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation*,
J. C. Das, John Wiley & Sons, 2021.

[10] Sato, E. F. M., *Arco Elétrico e Energia
Incidente em Sistemas Elétricos Industriais*,
Acessado em 21/05/2023 de:
<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/3426>



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo, SP

PROJETO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO SEGURAS PARA A POPULAÇÃO

Estellito Rangel Jr.
Experiência & Soluções
experiencia.e.solucoes@gmail.com

RESUMO

As estatísticas têm mostrado números elevados de acidentes envolvendo as redes aéreas de distribuição de energia elétrica [1].

Além disso, diversas ocorrências de fumaça, fogo e explosões já foram registradas nas redes de distribuição subterrâneas, que causaram queimaduras e mortes [2].

Este trabalho analisa a arquitetura utilizada nas redes urbanas de distribuição de média tensão (MT) das concessionárias brasileiras e sugere melhorias visando o fim das tristes estatísticas que significam a destruição de inúmeras famílias.

1.0 – INTRODUÇÃO

A primeira cidade brasileira a ter uma rede de distribuição de energia elétrica foi Campos dos Goytacazes, localizada no estado do Rio de Janeiro. A inauguração ocorreu em 7 de dezembro de 1883, pela Companhia de Eletricidade Fluminense, fundada pelo empresário Mário de Gusmão.

Como o país era essencialmente agrícola, a tecnologia empregada foi importada. Inicialmente, a distribuição por redes aéreas foi adotada, uma vez que os consumidores eram poucos e os custos de execução eram menores.

Anos depois, com o crescimento da população nas grandes cidades, a colocação em postes ficou inviável para suportar os transformadores maiores, e então, estes passaram a ser colocados em câmaras abaixo do nível das ruas, formando as redes de distribuição subterrâneas, também segundo tecnologia importada.

2.0 – CARACTERÍSTICAS DAS REDES MT

2.1 – REDES AÉREAS

2.1.1 - Construção

As redes urbanas aéreas de distribuição de energia elétrica em MT (13,2kV), são majoritariamente construídas com cabos nus. Em alguns locais é adotada a “rede compacta”, mostrada na Figura 1, onde são utilizados os “cabos protegidos”, que possuem uma capa polimérica, mas não destinada a oferecer proteção às pessoas; ela visa apenas protegê-los de contatos eventuais com galhos de árvores, uma das causas mais comuns de interrupções no fornecimento [3].



Figura 1: Rede aérea compacta.

A medida de proteção aplicada às redes aéreas de MT é a “parcial por colocação fora de alcance” [4], que visa impedir o contato involuntário com as partes vivas. Desta forma, os condutores geralmente ficam a cerca de 10m do solo.

Há normas ABNT sobre construção de redes aéreas de distribuição, porém, cada concessionária possui seus procedimentos internos, onde os detalhes de montagem estão padronizados.

2.1.2 – Ocorrências

2.1.2.a – Eletrocussão

Dentre os vários eventos publicados na mídia, destacamos o ocorrido em São Paulo, em 26/9/2013, quando dois homens morreram ao



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo, SP

empurrar um andaime e este ter encostado na rede de MT [5]. A rua onde aconteceu o acidente é bastante estreita, e a rede MT fica muito próxima das casas.

Este tipo de acidente tem sido noticiado com certa regularidade, em várias cidades, e na maioria das vezes, causando vítimas fatais.

2.1.2.b – Rompimento de condutores

A queda de cabos sobre veículos tem ocorrido com alguma frequência em vários estados do Brasil, sendo um acidente dos mais perigosos, como mostrada na Figura 2 uma ocorrência em São Gonçalo, RJ [6].

O São Gonçalo

O jornal de São Gonçalo, Itaboraí, Maricá, Niterói, Rio Bonito



Figura 2 – Queda de cabo energizado na via causou quatro mortes.

As recomendações ora divulgadas nas redes sociais, em vídeos estrangeiros e até replicados por concessionárias brasileiras, orientam os passageiros dos veículos nesta situação, a: ficarem no carro (mas sem tocar em partes metálicas); caso se inicie um incêndio, pular do veículo com os dois pés juntos; e afastar-se do carro arrastando os pés, sem levantá-los do chão, até 15m de distância. [7]

Tais “recomendações”, apesar de parecerem de fácil execução, são falhas, pois, além de não avaliarem que os passageiros estarão sob impacto emocional, não consideraram outros riscos intrínsecos, como: parte do cabo energizado pode estar em contato com o chão, produzindo tensões de passo perigosas ao redor do carro; o

piso pode ser irregular e/ou estar molhado, com risco de tropeços e quedas; etc.

A primeira pergunta que surge nestas ocorrências, é sobre a razão do cabo permanecer energizado, uma vez que a proteção deveria ter atuado e desenergizado o trecho. Considerando que a proteção típica empregada nas redes aéreas MT [3] é composta pelo disjuntor do ramal (na subestação), os religadores automáticos, e os elos-fusíveis (no primário dos transformadores), temos que tal configuração não “enxerga” esta falta à terra, cuja característica é de alta impedância (envolvendo o piso de asfalto), resultando em corrente muito menor que a necessária para a atuação. Também não há sensores que identifiquem que a linha tenha sido rompida.

2.1.3 – Melhorias possíveis

2.1.3.a – Rede aérea isolada

Em virtude do crescimento industrial, da existência de clientes mais exigentes quanto à qualidade de entrega de energia, multas por degradação ambiental (cortes e podas de árvores) e por transgressão aos índices DEC e FEC (indicadores de “qualidade” da ANEEL), já há concessionária testando a rede de distribuição aérea isolada de MT, com cabos pré-reunidos. [8]



Figura 3 – Rede aérea MT isolada.

Devido à isolação do cabo, acidentes com terceiros deverão reduzir significativamente, pois



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo, SP

nos casos de toques acidentais, não deverá ocorrer choque. O cabo isolado de MT, mostrado na Figura 4, confina o campo elétrico, permitindo que na sua camada externa o potencial seja zero.

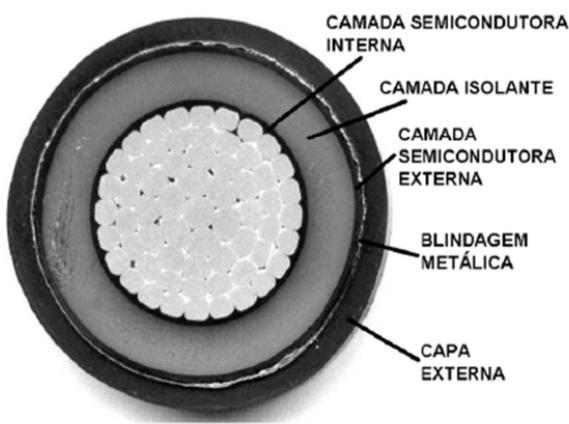


Figura 4 – Cabo isolado MT.

2.1.3.b – Uso de relés para alta impedância

A tecnologia tem avançado bastante no desenvolvimento de relés sensíveis às faltas de alta impedância, e os três métodos mais empregados [9] são:

- Monitoramento da corrente de terceira harmônica, comparando-se vetorialmente o último valor lido com a média;
- Utilização de um algoritmo que identifique se o surgimento do arco elétrico foi motivado por um condutor caído ao solo;
- Análise de eventual desbalanço nas tensões, pois na ocorrência do rompimento de um condutor de fase, aparecerão tensões de sequências negativa e zero.

O IEEE tem um programa piloto de implantação desta proteção na Índia [10], um país com elevados índices de acidentes por eletricidade, e situações similares às encontradas aqui [11].

No Brasil, a concessionária Equatorial Energia já realizou um teste com esta proteção em uma instalação piloto, envolvendo 19 ramais [12].

2.2 – Redes subterrâneas

2.2.1 - Construção

As redes subterrâneas são empregadas em locais com maior concentração de carga, quando são exigidos transformadores de maior tamanho, e a utilização de uma estrutura com postes passa a

ser inviável, pois eles precisariam suportar não só os pesos dos transformadores, como também as trações impostas pelos cabos de maior seção transversal. Além deste requisito técnico, as redes subterrâneas contam com a simpatia da sociedade, pelo melhor aspecto visual nos logradouros, e pelo menor número de interrupções no fornecimento de energia.

Na rede subterrânea há diferentes configurações possíveis, tanto na rede primária (MT), quanto na rede secundária (BT). No projeto, são definidos os critérios de suportabilidade da rede às “contingências”, como são chamadas as faltas no sistema. Dependendo das características da localidade, a rede pode ser dimensionada para suportar uma (N-1), ou mais contingências, sem comprometer a continuidade do fornecimento [3].

No caso da rede subterrânea com secundário em anel (network), as consequências quando um determinado trecho sai de operação, é que os demais passarão a assumir uma parcela da carga do trecho faltoso, com possibilidade de entrarem em sobrecarga, até o retorno à normalidade.

Outra característica do tipo network aqui adotado é a ausência de proteção para os cabos secundários (BT), filosofia conhecida como “queima-livre” [13].

2.2.2 - Ocorrências

As ocorrências de incêndios e explosões nas redes subterrâneas ficaram na berlinda no século XX, em especial nos EUA. No Brasil, tivemos ocorrências não só Rio de Janeiro e São Paulo, mas também em outras cidades, desde 1930 [14].

Dentre as vítimas dos acidentes no Rio de Janeiro, a americana Sarah Lowry ficou internada por 67 dias com 80% do corpo queimado, após ela e o marido terem sido atingidos pela explosão de um “bueiro” quando atravessavam, na faixa de pedestres da rua República do Peru em 29/6/2010. Sarah foi arremessada a oito metros de distância e seu corpo caiu já em chamas na calçada [15].

2.2.3 – Melhorias possíveis

As ocorrências de explosões de bueiros não são exclusividade brasileira. Quando começaram a construir redes subterrâneas aqui, nos EUA já eram conhecidas. E como foi adotada aqui a mesma tecnologia de lá, os mesmos eventos ocorreram aqui.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo, SP

A configuração “queima-livre”, sem proteções aos componentes da instalação BT, é inaceitável perante a norma técnica [16].

No mercado americano já foram desenvolvidas melhorias para as redes subterrâneas, como a monitoração das correntes e tensões, a instalação de indicadores de defeitos, e o acompanhamento da temperatura dos cabos, tudo com comunicação remota para a central de controle e supervisão [17].

3.0 DADOS, NORMAS E LEGISLAÇÃO

3.1 – Os dados

A ANEEL tem divulgado os números relativos a acidentes nas redes elétricas [18], mostrados na Tabela 1:

Tabela 1 – Índices de acidentes nas redes

	2017	2018	2019	2020	2021
NMOFUPR	9	6	0	15	9
NMOFUTE	37	18	28	34	33
NACTER	893	865	816	776	813
NMOTER	254	275	281	260	265

Onde:

NMOFUPR - Número de mortes decorrentes de acidentes do trabalho (funcionários próprios).

NMOFUTE - Número de mortes decorrentes de acidentes do trabalho (funcionários terceirizados)

NACTER - Número de acidentes com terceiros envolvendo a rede elétrica.

NMOTER - Número de mortes com terceiros envolvendo a rede elétrica.

A manutenção do patamar dos NACTER e NMOTER ao longo dos anos, indica não só que a sociedade vem sendo continuamente vitimada, mas também que não se investe em medidas corretivas.

O histórico de mortes nos acidentes nas redes aéreas, é mostrado na Tabela 2 [1].

Destes números podemos constatar, por exemplo, que as 297 mortes ocorridas em 2021 correspondem a 44% do total daquele ano com acidentes de eletricidade, mostrando que as redes

aéreas em cabos nus são extremamente perigosas.

Tabela 2 – Mortes por choque elétrico em redes de distribuição aéreas:

Ano	Mortes
2015	213
2016	218
2017	181
2018	172
2019	206
2020	237
2021	297

Utilizando-se uma matriz de risco, ao correlacionarmos os fatores de “severidade” (morte → alta) com “frequência” (por ocorrer todos os anos com mais de 200 mortes → alta), resulta em risco “muito alto”, inaceitável portanto, vide Tabela 3.

Tabela 3: Matriz de riscos

S	E	V	E	R	I	D	A	D	E
			A						
			alta		alta				muito alta
				M					
				média		alta			Alta
					B				
					baixa		média		alta
						B	M	A	

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA

Uma apreciação superficial dos acidentes pode induzir que “árvore derrubadas em tempestades, que rompem os cabos e estes caem na rua, energizados, podendo atingir carros e pedestres”, seja um exemplo de “imprevisto” [19]. Porém, se cabos partidos são recorrentes, o evento deve ser classificado como “previsto”. E, se, a rede aérea está sendo mantida há mais de um século sem proteção contra um evento previsto, sinaliza uma grave omissão, confirmada pelas centenas de mortes de cidadãos e animais.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo, SP

3.2 – As Normas

A ABNT possui normas sobre a construção de redes de distribuição aéreas, onde são especificadas as ferragens, e mostrados detalhes de montagem [20], porém não há documentos técnicos que estabeleçam os dispositivos mínimos de proteção que elas devam conter.

E a norma que rege o projeto de instalações elétricas em MT [4] (assim como a de BT), não se aplica “às instalações elétricas de concessionários dos serviços de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica”, criando uma situação inusitada, onde elas exigem dos consumidores o atendimento às normas para que possam dar entrada nos pedidos de ligação, porém podem operar sem que suas instalações sigam as mesmas regras. Desta forma, o capítulo 5 da NBR 14039, que aborda as proteções contra: choques elétricos; efeitos térmicos; sobrecorrentes; sobretensões; inversão de fases; fuga de líquido isolante; perigos resultantes de faltas por arco, e por último, mas mais importante, a proteção das pessoas que trabalham nas instalações elétricas de MT, podem ser solenemente ignoradas pelas concessionárias.

Pelo fato das normas ABNT não serem aplicáveis às concessionárias, isto permite, por exemplo, que elas adotem a configuração “queimalive” para os cabos de BT nas redes subterrâneas, bem como apenas isolar as faltas nos cabos de MT utilizando o “protetor network”, como mostrado na Figura 5.

Quando estes limites são ultrapassados, ocorre o envelhecimento térmico do isolamento do cabo, levando à deterioração do seu isolamento e à emissão de gases inflamáveis, responsáveis pelos eventos de fumaça, fogo e explosões na rede (que a mídia erroneamente atribui a vazamentos do gás encanado), pois a isolação dos cabos ao se deteriorar, libera gases inflamáveis, e o arco do curto-círcuito faz a ignição, o que já causou centenas de vítimas, inclusive fatais [23].

Ressalte-se que a operação em sobrecarga de cabos de potência não deve superar 100h durante 12 meses consecutivos, nem 500h durante a vida do cabo. E em curto-círcuito, a norma estabelece que para cabos da classe 90 °C, a falta deve parar em 5s e a temperatura no condutor não deve ultrapassar 250 °C [21, 22].

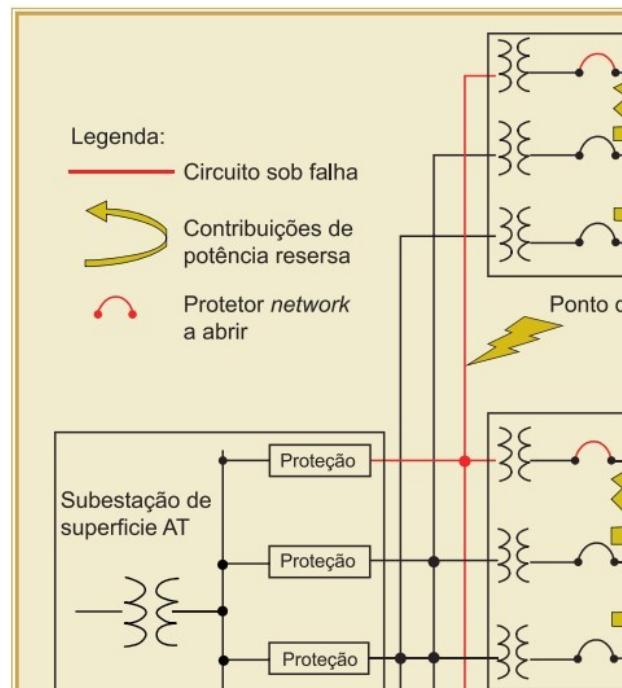


Figura 5 – Protetor network na rede subterrânea.

3.3 – A Legislação

3.3.1 – Sobre segurança

O artigo 132 do Decreto 41.019/1957 já estabelecia: “A operação e a conservação deverão ser aparelhadas e organizadas de modo a assegurar a continuidade e a eficiência dos fornecimentos, além da segurança das pessoas e a conservação dos bens e instalações nelas empregados”.

Como esta citação a “pessoas” está no capítulo das instalações da concessionária, talvez seja referente aos funcionários da mesma.

3.3.2 – Sobre normas

Nos contratos de concessão celebrados com a ANEEL [24], encontramos: “A Concessionária obriga-se a adotar, na prestação dos serviços, tecnologia adequada e a empregar equipamentos, instalações e métodos operativos que garantam níveis de qualidade, continuidade e confiabilidade estabelecidos pelo Poder Concedente para os serviços de energia elétrica.”

Portanto, a prioridade contratual é nos níveis de produtividade, não sendo citada a segurança da população. E para atingir isto, a Concessionária está obrigada a adotar “tecnologia adequada”, e não, as normas brasileiras.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo, SP

3.3.3 – Sobre índices

Por não estarem referenciados contratualmente, os índices NMOPUPR, NMOTER e NMOFUT não interferem na remuneração das Concessionárias, e nem exigem que elas tomem medidas para diminuí-los. Os índices utilizados pela ANEEL para avaliar a qualidade do serviço prestado pelas concessionárias baseiam-se na continuidade do fornecimento de energia [25]:

- FEC - frequência equivalente de interrupção por consumidor;
- DEC - duração equivalente de interrupção por consumidor;
- DIC - duração de interrupção individual por consumidor;
- FIC - frequência de interrupção individual por consumidor.

4.0 – CONCLUSÕES

Como os acidentes envolvendo pessoas e bens não impactam negativamente na avaliação das concessionárias, eles não recebem atenção prioritária, sendo tratados como “eventos imprevistos”, que não podem ser controlados ou evitados. Sem a aplicação de sanções às concessionárias pelos registros de acidentes, não se nota a implantação de medidas eficazes para redução dos casos de choques e mortes, que assim, mantêm-se recorrentes.

Deve haver a mobilização da sociedade civil no sentido que os registros de acidentes não sirvam apenas para preencher papel com tabelas e estatísticas; seu objetivo principal é orientar a tomada de decisões para solucionar os problemas. É inaceitável que situações onde o nível de risco é “muito alto”, não recebam medidas corretivas com prioridade.

A modernização das redes, acompanhada de revisões nos critérios contratuais para avaliação de desempenho das concessionárias, e com a implantação de um modelo onde a segurança para pessoas e animais seja priorizada, é imprescindível para estancar a perda de vidas, o que, tristemente, tende a cair no esquecimento e na impunidade.

5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ACIDENTES DE ORIGEM ELÉTRICA.** Salto, SP: Abracopel, v. 1, 30 mar. 2022. Anual.
- [2] RANGEL Jr., Estellito (org.). **CABUM!** Explosões na rede subterrânea. 2010. Registro de notícias. Disponível em: <https://bit.ly/32Rftd3>. Acesso em: 15 jun. 2023.
- [3] GUIMARÃES, Rafaela Filomena Alves. **Sistemas de distribuição.** São Paulo: Know How, 2016. 344 p.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14039:** Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 65 p.
- [5] **DOIS MORREM EM SP APÓS ANDAIME ENCASTRAR NA REDE ELÉTRICA.** São Paulo, 26 set. 2013. Disponível em: <https://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2013/09/dois-morrem-em-sp-apos-andaime-encastar-na-rede-eletrica.html>. Acesso em: 20 jun. 2023.
- [6] RANGEL Jr., Estellito. **Mais quatro mortos devido à rede aérea de média tensão em cabos nus!** 1ed. Rio de Janeiro, 4 jan. 2016. LinkedIn: @Estellito. Disponível em: <https://bit.ly/2AK49RL>. Acesso em: 20 jun. 2023.
- [7] O QUE fazer se bater o carro em poste de energia? Produção de Puget Sound Energy. Washington: PSE, 2016. (5 min.), son., color. Legendado. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=5r1BTKPAm0>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- [8] SOUZA, William Alves de. **Interferências eletromagnéticas por descargas atmosféricas em redes de distribuição blindadas (rdi) que utilizam equipamentos não blindados.** 2012. 44 f. Monografia (Especialização) - Curso de Sistemas Elétricos de Potência, UFMG, Belo Horizonte, 2012.
- [9] PARADELO Jr., Romildo de Campos. **Proteção de sobrecorrente em sistemas de distribuição de energia elétrica através de abordagem probabilística.** 2016. 247 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Engenharia de

6/7



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo, SP

Energia e Automação Elétricas, USP, São Paulo, 2016.

[10] **Overhead powerline safety awareness project India.** Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE, Special Interest Group on Humanitarian Technology- SIGHT. Disponível em: <https://sight.ieee.org/project-highlights/overhead-powerline-safety-awareness-project-india/>. Acesso em 20 jun.2023.

[11] CONSCIENTIZAÇÃO para os acidentes com eletricidade e sua prevenção. Produção de IEEE India. Hyderabad: Wings And Oars Media Comm, 2019. (15 min.), mp4, son., color. Legendado pelo eng Estellito Jr. Disponível em: <https://bit.ly/2Z1r2xh>

[12] SANTOS, Marcelo Costa et al. Detecção de faltas de alta impedância em redes de distribuição: um estudo de caso. In: ELECTRICAL SAFETY WORKSHOP BRASIL, 10., 2021, Virtual. Anais [...]. São Paulo: IEEE, 2021. p. 25-30.

[13] MELLO, João Canellas P.. **Distribuição de Energia Elétrica.** Rio de Janeiro: UFRJ, 1976. 98 p.

[14] CABUM!: Normas e tecnologias Ex. Normas e tecnologias Ex. 1997. Histórico de explosões. Disponível em: http://www.cabum-ex.net.br/historico_explosoes.htm. Acesso em: 15 jun. 2023.

[15] MILLAZO, Daniel. Mais de dois meses após acidente, turista atingida por explosão de bueiro no Rio recebe alta. 2010. UOL. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2010/09/06/mais-de-dois-meses-apos-acidente-turista-atingida-por-bueiro-no-rio-recebe-alta.htm>. Acesso em: 10 jun. 2023.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410:** Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 209 p.

[17] CUNHA, Antonio Paulo da; VAZ, Luiz Eduardo Pereira (org.). **Redes de distribuição subterrâneas de energia elétrica.** Rio de Janeiro: Synergia, 2014. 228 p.

[18] ANEEL. **Indicadores de segurança do trabalho e das instalações.** MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Brasil, 2021. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/IndicadoresSegurancaTrabalho/pesquisaGeral.cfm>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

[19] ABRACOPEL . Os riscos próximos à rede aérea. <https://abracopel.org/blog/noticias/os-riscos-proximos-rede-aerea/> acessado em 20/6/23.

[20] RANGEL Jr., Estellito. Explosões em redes subterrâneas de distribuição: parte 1 – histórico e pseudocausas. **Eletrociadade Moderna**, São Paulo, v. 47, n. 543, p. 34-39, 10 jun. 2019. Mensal. Disponível em: <https://bit.ly/43V0c8d>. Acesso em: 9 jun. 2023.

[21] RANGEL JUNIOR, Estellito. Explosões em redes subterrâneas de distribuição: parte 2 - causa real, equívocos e soluções. **Eletrociadade Moderna**, São Paulo, v. 47, n. 544, p. 50-55, 10 jul. 2019. Mensal. Disponível em: <https://bit.ly/43V0c8d>. Acesso em: 9 jun. 2023.

[22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15688:** Redes de distribuição aérea de energia elétrica com condutores nus. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 158 p.

[23] RANGEL Jr., Estellito. Explosion Risk in Underground Networks: measures for preventing manhole explosion events. **IEEE Industry Applications Magazine**, New York, v. 20, n. 5, p. 58-63, 10 set. 2014. Bimensal.

[24] DF. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. Ministério de Minas e Energia. **CONTRATO DE CONCESSÃO 001/96:** para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, que celebram a união e a Light Serviços de Eletricidade S.A. Brasília: MME, 1996. 32 p. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/contratos-de-distribuicao>. Acesso em: 18 jun. 2023.

[25] ANEEL. Resolução nº 956, de 7 de dezembro de 2021. **Resolução Normativa 956:** Estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Brasília, DF: DOU, 15 dez. 2021. v. 235, Seção 1, p. 125-280.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

[EPI Conforto Térmico em Calçados para Eletricistas]

[Fábio Rafaelli]

[CELESC]

[fabiorr@celesc.com.br]

[Danieli Tarta]

[CELESC]

[danielit@celesc.com.br]

[Fábio Leonardo Ramos Salvador]

[CELESC]

[fabiolrs@celesc.com.br]

RESUMO

As atividades dos eletricistas de concessionárias de energia envolvem uma série de particularidades do seu dia a dia, relacionadas ao clima (frio, calor, chuva, ambiente alagado); terrenos (esburacados, irregulares, lisos, mato, restos de tocos de plantação, pedras); tipo de atividade (escada, escalada – espora ou torre, cesto aéreo, movimentações nas estruturas); bem como as particularidades de cada usuário (volume e largura dos pés, pés chatos, muito chatos, cavo ou normais, comprimento de dedos). Particularidades que podem ter impactos significativos na sua qualidade de vida e na sua produtividade.

Todas as particularidades podem, isoladamente ou em conjunto, trazer riscos ao usuário, podendo contribuir para registro de queixas e dores ou ocorrências de acidentes e doenças, levando o eletricista a sofrer com desconforto, lesões e afastamento do trabalho.

Neste cenário se identificou as principais queixas dos usuários e buscou adequar produto no mercado para atender e propiciar bem-estar ao usuário na sua jornada de trabalho.

Foram trabalhadas as formas de calço, tipo de solado, forração interna, sistema de fechamento e ajuste, adoção ou não de proteções.

Fica claro e evidente o ganho de bem-estar nos usuários, pela própria iniciativa dos mesmos em preferir utilizar um calçado com maior peso e com maior área de preenchimento corpóreo do que um mais leve e com menos área, demonstrando o quanto foi adequada a construção deste calçado para os eletricistas.

Permitindo conforto térmico, tanto em dias frios, como em dias quentes. Evidenciando que o investimento numa membrana que propicie a troca de calor e ajude a conter a entrada de água, são fundamentais para a qualidade de vida do usuário e consequentemente uma adequada produtividade.

Palavras-chave: EPI. Conforto Térmico. Qualidade de Vida.

1. INTRODUÇÃO

Toda base de nossa sustentação está nos pés, que aguentam todo nosso peso e o peso que carregamos, bem como são uma base de apoio em nossas posturas e gestos profissionais.

Dentro do contexto das atividades dos eletricistas, o calçado de segurança é fundamental para proteção do mesmo, tanto servindo como uma ferramenta isolada, onde o solado do calçado faz o isolamento do solo, mitigando o risco elétrico por criar uma barreira entre o corpo humano e o solo. Como servindo de base e sustentação da sobrecarga do peso (próprio + carregado), que é transferida para a base plantar e consequentemente para o solado do calçado, onde aqui a utilização de calçados com solado bidensidade, para absorver esta sobrecarga em sua parte mais macia ou menos densa e para resistir o impacto e atrito de superfícies e irregularidade do solo ou apoios, em sua parte mais rígida e externa. Permitindo a proteção e aliviando a pressão na parte inferior dos pés.

Estes dois cenários (eletricidade e densidade) são bastante trabalhados e tratados como medidas de prevenção, mas vários outros riscos adicionais devem ser levados em conta na escolha e definição de padrão de calçado, onde podemos destacar como exemplo:

* **animais peçonhentos**, onde ter um produto com resistência a picadas de animais, contribui significativamente para redução destes acidentes, bem como o tipo do cano do calçado conforme ambiente de trabalho. Onde aqui se destaca também os ambientes de trabalho dos eletricistas, que estão na rua, zona urbana ou rural, e não possuem controle destes ambientes.

* **Impacto e queda de objetos**, também é uma condição importante a ser avaliada e definir seu

grau de proteção conforme o risco ou atividade a ser executada.

* **Materiais perfurocortantes**, (tocos de plantação, pregos, entre outros), que requerem uma palmilha de proteção ou um solado mais rígido que absorva e mitigue este risco.

* **Ambientes escorregadios**, também são importantes, pois o deslocamento em diversos ambientes em especial dias de chuva, que fazem com que barro e umidade se junte ao soldado do calçado é um cenário de risco bastante comprometedor, bem como resíduos de óleo ou graxa eventualmente utilizada nas atividades e que possam cair no piso ou estrutura da viatura, causando um ambiente escorregadio, um solado com características antiderrapante ou com estrutura que não acumule resíduos auxiliam nesta proteção.

* **Conforto do pé**, um desenho de cabedal que permita as diversas formas de pé ter a firmeza do calçço e ao mesmo tempo a sustentação do calçço, não deixando o calçado frouxo, que pode ocasionar bolhas e irritações, tanto por estar apertado como por estar frouxo. Aqui vale destacar o tipo da palmilha, que pode contribuir em muito no conforto do usuário.

* **Forças inversas**, como pisos irregulares, saliências, materiais irregulares no solo, degraus de escadas, que proporcionam esta força invertida, destacasse em especial as atividades dos eletricistas na utilização de escada, onde o solado em si não possui resistência de absorção da flexão invertida quando apoiado na escada, causando agressão por compressão do solado dos pés. Neste cenário a utilização de alma, produto, em geral de polímero, colocado no meio do solado em sua densidade menor, que passa a ser um absorvedor desta energia e alivia o desgaste diário dos eletricistas com esta compressão, trazendo conforto em seus gestos profissionais.

* **Torções**, ocasionadas pelos ambientes irregulares de deslocamento, onde, algumas empresas desenvolvem a alma, citada no item anterior, também com a característica de trabalhar a torção, possuindo em sua forma de montagem uma estrutura que ajuda a manter a base do pé ao pisar num ambiente irregular, mitigando o risco de torções.

Estes são alguns dos riscos adicionais identificados na atividade de eletricistas diretamente relacionado aos membros inferiores onde a principal ferramenta de proteção é o calçado.

Mas uma situação pouco explorada e levada em consideração na definição de um padrão de calçado é quanto a sensação térmica que este calçado promove. Condição muito tratada na prática de esportes, onde verificasse calçados com as mais altas tecnologias sendo aplicadas para aumentar o desempenho dos atletas, mas raramente pensada para aumentar o rendimento das atividades profissionais e qualidade de vida, neste caso, dos eletricistas.

E foi neste cenário, devido a queixas de usuários quanto a dificuldade de calço, desconforto no uso e calor nos pés, que buscavam-se fornecedores e fabricantes do produto para desenvolver um EPI que propiciasse ao eletricista, além das proteções necessárias ao desempenho de sua atividade, trouxessem uma satisfação do uso. Foram feitos contatos com as empresas do setor calçadista, onde algumas apresentaram soluções que iriam de encontro ao problema levantado. Após alinhamento das opções, iniciou o trabalho de avaliação e construção das possíveis soluções.

2. INTERAÇÃO CELESC X FORNECEDORES

Após os contatos feitos com as empresas, explicando o problema, começou uma série de conversas e discussões sobre as possibilidades e alternativas que cada empresa possuía.

Neste cenário, muitas empresas não queriam construir soluções, mas sim apresentar modelos já concebidos e de certa forma aceitos ou confirmados no mercado. As opções propostas, caracterizadas por boas características de proteção, não atendiam a principal questão a ser trabalhada, a aceitação do uso. Quando falamos aceitação do uso, destacamos o conforto e o bem-estar do usuário durante a utilização do calçado, seu EPI que além de proteger deveria proporcionar a satisfação ao longo do dia, durante sua jornada de trabalho, muitas vezes de até 10 h de uso contínuo do calçado, em atividades muitas vezes consideradas pesadas.

Naquela época, uma empresa entendeu o que queríamos, que não importava o custo, mas sim o resultado final de proporcionar o melhor ao empregado, sensação de bem-estar nos pés após sua jornada de trabalho.

Neste cenário, e que chamaremos de primeiro momento, uma empresa trouxe um conceito novo, com a utilização de membranas respiráveis que possibilitavam a transpirabilidade, jogando o suor do pé para fora dessa membrana e permitindo uma sensação térmica agradável ao usuário ao longo de sua jornada de trabalho.

Proposta bem recebida e que alinhava com a ideia que a Celesc buscava. Então foram desenvolvidas amostras do calçado e encaminhado para os usuários do local que tinha o maior registro de queixas no uso de calçado, na cidade de Lages (SC). Chama atenção, neste local, o fato de que alguns profissionais da Celesc, em suas horas de folga, tinham uma lida de campo, ambiente propício para avaliar o desempenho da bota, em vista do grau de exigência de seus usuários.

Após um período de uso dos calçados, foi promovido um encontro entre usuários e fabricante, para avaliar o desempenho do calçado na situação real de campo.

Neste encontro foi apontado pelos usuários algumas observações e junto com o alinhamento da

empresa com soluções para sanar estas observações, que são citadas abaixo:

- dificuldade de calço em especial para retirar a bota, onde se observou a necessidade de ter um fechamento com zíper ampliando a área para as condições de calçar e tirar o calçado, bem como ampliando as dimensões na região da panturrilha. Esta proposta veio com a inclusão de um “morcego”, sistema de fechamento por trás do zíper que impede a passagem de água para dentro da bota.

- região do peito do pé com leve compressão, onde se observou a necessidade de ampliação da área do cabedal nesta região, também contribuindo fortemente para um melhor calço, reduzindo compressões apontadas naquele local.

Modelo desenhado, amostra concebida e entregue para os usuários em campo. Com um grande aceite pelos usuários, foi o momento de uma compra para atender todos os empregados que estavam sujeitos ao risco de eletricidade. Assim foram contemplados mais de 1500 usuários de calçados de segurança.

Este valor é uma estimativa de usuários, pois além dos eletricistas da Celesc, somasse aqui os eletricistas das empresas contratadas, que devido as exigências contratuais da Celesc ela requer que as contratadas utilizem o mesmo padrão de EPI para suas contratadas, mas o número final de usuários não foi mensurado.

Num segundo momento, e após alguns anos de uso, começaram a aparecer novas queixas, que devido a situações de uso, não percebidas no início, começaram a se destacar. Pois com a aprovação da bota e disponibilidade de uso para todos os empregados, a bota começou a ser utilizada em várias características regionais, onde começou aparecer novos cenários e exigências quanto ao grau de proteção da bota.

Uma das situações que destacamos foi a característica de sua impermeabilidade, que ficou evidente durante as atividades em campo, em ambientes encharcados ou com grande volume de chuvas a bota impermeável apresentava o acúmulo de água entre a membrana e couro.

A membrana realizava o seu papel impedindo que a água molhasse o pé do usuário, mas ao longo da jornada, de até 10 horas de trabalho contínuo, o volume de água superava o volume disposto entre a membrana e o couro e a água começava a permear para dentro da bota molhando o pé do usuário, com uma vazão lenta de água acumulada. Para esta condição foi identificado que o modelo de costura do zíper permitia o acúmulo de água e consequentemente sua penetração entre a membrana e o couro. Pois o estilo do fechamento do zíper que era costurado na parte de baixo, fazia um bolsão entre o zíper e o morcego, fazendo com que a água não tivesse por onde sair.

Além da condição da longa exposição, também ocorria de quando o colaborador retirava a bota ao final do turno, a água acumulada acabava saindo por cima do “boot” da membrana no cano da

bota e molhando por dentro. Da mesma forma, após um dia de trabalho, onde a bota tinha água acumulada, na hora de calçar a movimentação da bota fazia esta água que estava depositada entre a membrana e o couro se movimentasse e entrasse para dentro, molhando o pé do usuário. Estas três situações que poderiam ocorrer no início ou fim da jornada, durante o calço ou retirada da bota e também em algumas operações, devido a movimentação e posicionamento do empregado que permitiam a entrada da água e causavam um grande desconforto ao usuário, pois além de molhar os pés, tinha o peso adicional que esse acúmulo de água trazia para o calçado. Um peso irrelevante para o conceito do calçado, mas que ao longo de uma jornada de trabalho representava um desgaste a mais ao usuário.

Essa situação foi repassada ao fabricante, e numa reunião nas instalações deste, a Celesc em conjunto com os setores de desenvolvimento e modelagem do fabricante, realizaram testes e análises em conjunto para avaliar o problema e achar uma solução. Dessa forma, foi remodelado o sistema de fechamento do zíper, onde o canal de escoamento ficaria aberto na parte de baixo para que a água não ficasse mais acumulada.

Com o novo sistema desenvolvido e o modelo concluído na nova estrutura foram realizados testes na bota pronta para que houvesse uma maior segurança sobre o ajuste. O teste não consta em referência normativa, mas permite uma análise de uma real condição de uso, como o deslocamento em ambiente encharcado, sendo eles sazonais ou não, como por exemplo em dias de temporais ou em plantação de arroz, condição e local que fazem parte da rotina dos eletricistas no estado de Santa Catarina.

O teste consiste em deixar o calçado dentro de uma vasilha d’água por cerca de 1 hora mergulhado em uma lâmina de aproximadamente 20cm de água, e após esse período não pode ter passado nenhuma umidade para dentro do calçado.

Outra proposta feita pelo fabricante, para garantir a qualidade de seu processo e garantir total segurança aos eletricistas que usam este modelo de bota, foi implementado no processo de produção, onde 100% das botas com membrana impermeável têm o seu boot/membrana testado durante o processo após sua vedação e antes de serem unidos ao cabedal.

Como forma de validarmos o trabalho, pegamos algumas opiniões de usuários, onde destacamos a do empregado Julio Cesar, um usuário e residente em Lages, cidade onde realizamos todas as etapas de teste dos calçados, que diz: “A bota cano alto utilizada na Celesc tem um alto grau de conforto, macia e leve, permite que o usuário permaneça por várias horas calçado sem fadigar. A forração interna cria uma sensação térmica confortável, em dias quentes não esquenta em demasia e em dia frios não gela os pés, bem como na questão de impermeabilidade, que não permite a entrada de água no calçado. O fecho com velcro ajustável proporciona o uso

para todos, mesmo aqueles com panturrilha mais desenvolvida, que no calçado anterior ficavam apertados causando um desconforto tremendo pela compressão dificultando a circulação do sangue nos membros inferiores.”

3. LEGISLAÇÃO

A legislação brasileira tem em seu regramento, quanto a questão do EPI, alguns critérios a serem seguidos. Começando pela NR 01 – Disposições Gerais e Gerenciamento de Riscos Ocupacionais, ela define em seu item 1.4 os direitos e deveres dos empregadores e dos empregados. Sendo que fica expresso no item 1.4.1, na alínea g, que cabe ao empregador implementar medidas de prevenção, ouvidos os trabalhadores, de acordo com uma ordem de prioridade, onde a adoção de medidas de proteção individual é o quarto e último item registrado. Da mesma forma, o item 1.4.2, na alínea d, define que cabe ao trabalhador usar o equipamento de proteção individual fornecido pelo empregador. [1]

Ainda na NR 01, em seu item 1.5.5.1.2, prevê que em caráter complementar ou emergencial e após a adoção de medidas de caráter administrativo ou de organização do trabalho é permitido como medida de controle a utilização de equipamento de proteção individual – EPI, quando comprovada pela organização a inviabilidade técnica da adoção de medidas de proteção coletiva, ou quando estas não forem suficientes ou encontrarem-se em fase de estudo, planejamento ou implantação. [1]

A NR 06 - Equipamento de Proteção Individual – EPI, é uma norma do Ministério do Trabalho e Emprego que trata exclusivamente sobre EPI, sendo que o objetivo desta NR é estabelecer os requisitos para aprovação, comercialização, fornecimento e utilização de Equipamentos de Proteção Individual - EPI. [2]

Esta NR, em seu item 6.5.2, estabelece que a organização deve selecionar os EPI de seus empregados considerando: [2]

- a) a atividade exercida;
- b) as medidas de prevenção em função dos perigos identificados e dos riscos ocupacionais avaliados;
- c) o disposto no Anexo I;
- d) a eficácia necessária para o controle da exposição ao risco;
- e) as exigências estabelecidas em normas regulamentadoras e nos dispositivos legais;
- f) a adequação do equipamento ao empregado e o conforto oferecido, segundo avaliação do conjunto de empregados;
- g) a compatibilidade, em casos que exijam a utilização simultânea de vários EPI, de maneira a assegurar as respectivas eficácia para proteção contra os riscos existentes.” (Fonte: NR 6)

Verificasse que a própria NR estabelece como parâmetro de seleção, em seu item f, citado acima, o conforto oferecido, e este conforto,

avaliado pelo conjunto de empregados/usuários. Onde a validação do EPI pela análise do usuário é um critério a ser levado em conta e de fundamental importância, pois é este usuário que fará o uso contínuo ou não deste equipamento. E a experiência tem nos mostrado que quanto maior o conforto que o EPI proporciona, maior será o uso dele pelos empregados.

Outra NR que aborda o tema e faz referência ao EPI, é a NR 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, que é uma norma específica e balizadora das ações das empresas em seus riscos com eletricidade. [3]

Nesta NR, em seu item 10.2.9.1 ela frisa: “... que os trabalhos em instalações elétricas, quando as medidas de proteção coletiva forem tecnicamente inviáveis ou insuficientes para controlar os riscos, devem ser adotados equipamentos de proteção individual específicos e adequados às atividades desenvolvidas, em atendimento ao disposto na NR 6.” (Fonte NR 10)

Assim, fica claro, que mesmo a NR específica para atividades com risco elétrico, remete a NR 06 a definição do padrão de qualidade do EPI a ser adotado. E desta forma a importância da validação pelos usuários quanto ao conforto do EPI a ser adotado por cada empresa.

4 – CONCLUSÃO

Este trabalho nasceu da queixa dos usuários, que ao demonstrarem seu desconforto na utilização de um EPI, trouxeram o desafio para a área de segurança em buscar soluções.

Da mesma forma esse desafio foi externado ao mercado, para que este conhecesse a realidade do setor e que abrisse os olhos sobre problemas reais, particularidades de uso, e riscos específicos de uma atividade, indo além de um produto de linha e consolidado no mercado.

Assim com a conscientização dos eletricistas, usuário final do produto e a possibilidade destes se manifestarem sobre suas condições de trabalho, permitiu o alinhamento, entre usuário, fabricante e equipe de segurança, na busca de um produto que atendesse os riscos inerentes a atividade e promovesse o bem-estar dos usuários ao final de sua jornada de trabalho.

Hoje, entendemos ter um produto adequado ao risco com eletricidade e seus riscos adicionais, que além de proteger seu usuário possibilita uma sensação de conforto e bem-estar ao seu usuário. Sensação que fica evidente quando se observa os eletricistas trabalhando, mesmo em dias de elevado calor, utilizando a bota.

Para o usuário fica a importância de suas observações, construindo um produto para seu dia a dia. Em especial quanto ao conforto térmico propiciado pelo EPI desenvolvido.

Para a área de segurança, fica o sentimento de dever cumprido, pois atende a legislação, em suas peculiaridades, como o conforto térmico

validado pelos usuários, e a promoção do bem-estar destes.

Evidenciamos estas observações no dia a dia, em campo conversando com os eletricistas e tendo um retorno positivo. Da mesma forma mantendo um canal aberto ouvindo as percepções, para ver a possibilidade de novas melhorias, ajustes ou desenvolvimentos.

Para o fabricante, como conclusão deste projeto, foi a possibilidade de melhorar o produto para todo o segmento elétrico no país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Ministério do Trabalho e Emprego. NR 01 – Disposições Gerais e Gerenciamento de Riscos Ocupacionais. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2022.

[2] Ministério do Trabalho e Emprego. NR 06 – Equipamento de Proteção Individual. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2022.

[3] Ministério do Trabalho e Emprego. NR 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2004.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

Procedimento para Emenda de Condutores em Redes de Distribuição

[Francis Nascimento]
[CEMIG]

[falbert@cemig.com.br]

[Henrique Couto]
[CEMIG]

[henrique.pcouto@cemig.com.br]

[Helvécio Teixeira]
[CEMIG]

[helvecio.junior@cemig.com.br]

[Fábio Rafaelli]
[CELESC]

[fabiorr@celesc.com.br]

[Josué Bastos]
[CEMIG]

[josue.bastos@cemig.com.br]

RESUMO

As atividades dos eletricistas das concessionárias de energia elétrica envolvem uma série de procedimentos no seu dia a dia, uma delas é a emenda de cabos, que pode ocorrer por diversas causas, em pontos distintos do SEP – Sistema Elétrico de Potência. Em algumas situações, mesmo cumprindo os requisitos da NR10, quanto à desenergização do sistema de forma correta [10], este cabo continua interligado ao SEP, permitindo a energização do circuito por erro de manobra, descarga atmosférica ou outras situações que podem promover essa energização. Adicionalmente, o tempo para efetuar esta emenda impacta nos resultados pelos quais as empresas são avaliadas pelo órgão regulador. Dentro deste cenário, registram-se acidentes, que podem resultar inclusive na morte dos profissionais que ali atuam, sejam eletricistas ou ajudantes, no solo ou no alto da estrutura estando o eletricista não equipotencializado. Neste estudo, pretendemos demonstrar a importância de se ter um procedimento seguro, com medidas de controle eficazes com procedimentos bem definidos para garantirmos a segurança dos profissionais e ao mesmo tempo dar qualidade à recuperação e continuidade do sistema. O principal objetivo é assegurar a redução da possibilidade de passagem da corrente elétrica nos envolvidos no procedimento de emenda de cabo desenergizado, porém interligado ao SEP [7]. Não iremos avaliar a forma ou padrão da emenda, situação técnica definida de acordo com padrões de cada empresa, mas sim identificar procedimentos seguros para dar agilidade ao serviço e mitigar os riscos existentes, promovendo a segurança das equipes que realizam essa atividade [10].

Palavras-chave: Aterramento Temporário. Choque Elétrico. Emenda de Cabos. Energização Acidental. Equipotencialização. Segurança do Trabalho. SEP.

1 – INTRODUÇÃO

As atividades de manutenção e construção de redes de distribuição de energia acontecem todos os dias de forma programada ou emergencial, e os elementos antigos e desgastados são regularmente substituídos, além de novas tecnologias que são estudadas e implantadas em nossas redes.

A realização das atividades mencionadas e outras complementares proporcionam como resultado a satisfação de quem consome a energia distribuída, mas também contribuem para a exposição a riscos de acidentes de origem elétrica para os executantes.

Uma das atividades mais rotineiras efetuadas no SEP são as emendas de condutores, ou seja, a união das extremidades de dois condutores. Essa técnica é utilizada para se prolongar a extensão de condutores existentes, ou religá-los em caso de rompimento.

A emenda de condutores se torna necessária pela ocorrência de alguns fatores, quando condutores são seccionados intencionalmente (construção de derivações na rede, substituição e/ou padronização de condutores, abaixamento de vãos para poda), ou não intencionalmente (queda de árvores sobre a rede, abalroamento na estrutura, efeitos de ventania, descargas atmosféricas).

Em todos os casos, a emenda deve ser executada de tal modo que seu contato elétrico e resistência mecânica garanta a sua qualidade, bem como a segurança do executante que está em contato com os condutores.

Através de estudo detalhado, foi reconhecido o risco de passagem de corrente elétrica pelo executante da emenda na estrutura ou no solo, ainda que o circuito esteja corretamente aterrado, tornando-se necessária a revisão dos procedimentos de aterramento e emendas de condutores, mitigando o risco [7].

2 – EFEITO DA CORRENTE ELÉTRICA SOBRE O CORPO HUMANO

Muitas pesquisas já foram implementadas com o objetivo de melhor esclarecer a reação do corpo humano em exposição à passagem de corrente elétrica. Modelar uma resposta exata é complexo, uma vez que o organismo humano sofre diferentes impactos e consequências pela passagem da corrente elétrica sobre ele [5][6].

Semelhantes impactos são regidos sobretudo pelos fatores tempo de exposição e magnitude da corrente. Também o próprio fluxo de corrente que é aplicado em função do nível de tensão, resistência e impedância, além de outros caminhos disponíveis para a corrente, se somam como variáveis a mais [5][6].

O corpo humano é vulnerável a tensões de passo e de toque, e ele possui uma resistência de aproximadamente 1.000 Ohms, conforme Figura 1, cujo estudo é amplamente aceito e utilizado por especialistas sobre o tema [5][6].

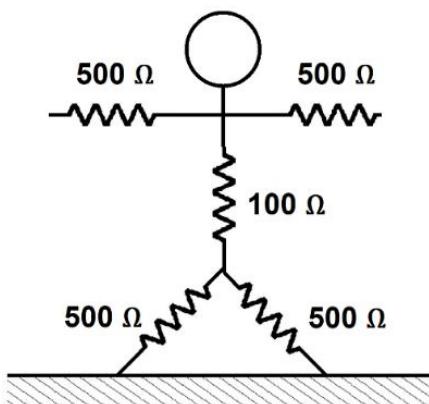


Figura 1: Modelo elétrico do corpo humano
Fonte: Dos Autores

Considerando os fatores envolvidos, concluiu-se que a passagem da corrente elétrica pelo corpo humano resulta desde sua não percepção até contrações musculares, dificuldade de respirar, queimaduras, fibrilação cardíaca a morte por eletrocussão, conforme a tabela 1 [5].

Tendo ciência das possíveis consequências e para se evitar as mesmas, normas internacionais e nacionais como a NR10 estabeleceram como metodologia de controle a tensão de segurança, a extraíbaixa tensão originada de uma fonte segura. A tensão de segurança possibilita valores não nocivos de corrente, permitindo que o trabalho seja desenvolvido de forma segura [10].

Tabela 1: Efeitos do Choque elétrico no corpo humano (Todos os valores são em miliamperes RMS para 60Hz.)

Efeito	Homem	Mulher
Nenhuma sensação na mão	0.4	0.3
Leve Formigamento (Limiar de Percepção)	1.1	0.7
Choque, não doloroso e controle muscular não perdido	1.8	1.2
Choque doloroso, mas o controle muscular não é perdido	9.0	6.0
Choque Doloroso (Limiar de Liberação)	16.0	10.5
Choque doloroso e grave, músculos se contraem, respiração difícil	23.0	15.0
Possível fibrilação ventricular		
Choques de curta duração (0.03 Sec.)	1,000	1,000
Choques de longa duração (3.0 Sec.)	100	100
Fibrilação Ventricular, Morte Certa (Deve ocorrer durante a fase suscetível do ciclo cardíaco para ser letal.)		
Choques de curta duração (0.03 Sec.)	2,750	2,750
Choques de longa duração (3.0 Sec.)	275	275

Fonte: Dalziel, 1972 [5].

Desta forma, precisa-se garantir na execução do trabalho, mesmo diante da possibilidade de energizações acidentais, uma tensão não superior a 50 volts em corrente alternada ou 120 volts em corrente contínua, entre fases ou entre fase e terra. Para tanto, utilizam-se técnicas de aterramento e equipotencialização [10][11][12][13][14].

3 – ILUSTRANDO O PROBLEMA

A emenda de cabos pode ocorrer em redes monofásicas, trifásicas, em áreas urbanas ou rurais, no solo, nas estruturas, em cestos aéreos ou escadas veiculares, podendo o eletricista estar em contato com uma extremidade ou as duas do cabo rompido.

Podemos citar 3 acidentes, sendo dois deles registrados na Região Sul e um deles na Região Sudeste do Brasil, onde as características e causas contribuintes ilustram a dimensão do problema identificado e a importância da adoção de medidas de controle para prevenção de acidentes.

1º Caso: tratava-se de uma emenda de cabo em rede bifásica, que ocorria no solo, um cabo foi rompido por uma árvore que caiu sobre o mesmo durante temporal. A equipe de 5 pessoas se posicionou, com um em cima do poste (escalada) que colocou o aterramento e ali ficou posicionado, um estava no chão próximo ao poste e foi responsável pela fixação do trado de aterramento no solo, os outros três faziam a emenda do cabo com utilização de catraca para tracionar o cabo, onde um segurava e puxava o cabo de um lado e o outro segurava e puxava a outra ponta, o terceiro manobrava a catraca para aproximar os cabos e fazer a emenda. Destaca-se neste acidente, que após o temporal o solo encontrava-se encharcado. A fixação dos grampos do aterramento foi inadequada (Figura 2), mal apertada, e a haste de aterramento estava com aproximadamente 30cm cravada no solo (Figura 3), sendo que o determinado é no mínimo 80cm. Ao tracionarem o

cabo, a estrutura fletiu, fazendo com que o cabo rompesse em outro vão (onde o outro cabo, que não estava sendo emendado, já estava rompido), o cabo ao romper neste outro vão, ricocheteou e atingiu uma rede de alta tensão de outra concessionária que cruzava o vão e estava energizada ocasionando um pulso de energização no cabo que estava sendo emendado. Este pulso resultou em um choque elétrico nos 3 empregados que faziam a emenda no solo, ocasionando sequelas permanentes.

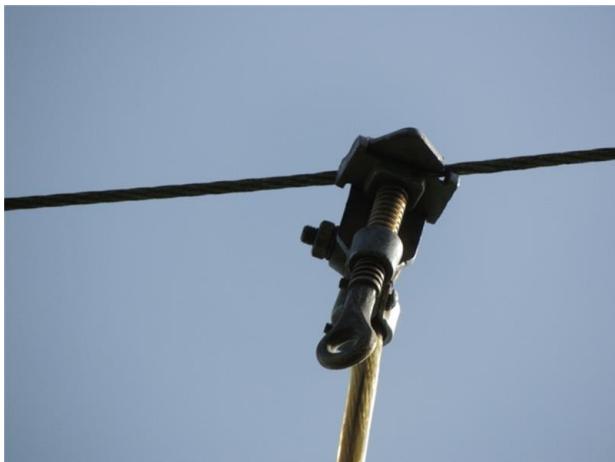


Figura 2: Grampo mal posicionado
Fonte: dos Autores



Figura 3: Trado mal posicionado
Fonte: dos Autores

2º Caso: era uma emenda de cabo em região rural, onde a dupla de eletricistas abriu a chave, mas não fez o aterramento do circuito, se deslocaram ao local de trabalho, e ao fazerem a emenda do cabo no solo segurando ambas as extremidades, ocorreu uma energização acidental no sistema, eletrocutando o eletricista, que veio a óbito. A corrente possivelmente entrou pelo braço direito, de onde veio a energização, e saiu por ambas as pernas, apesar de estar com calçado de segurança. O local apresentava vegetação alta que pode ter contribuído para a passagem da corrente. A energização acidental se deu por possível entrada de gerador particular, não cadastrado na rede da concessionária, visto que o ramal desenergizado se estendia por um longo trecho com várias fazendas abastecidas por este ramal.

3º Caso: dupla de eletricistas realizava emenda de cabo em rede monofásica rural, com aterramento de trecho com sela neutro e haste devidamente instalados, conforme procedimentos. Após a emenda do cabo no solo, o eletricista posicionado em cima da estrutura preparava o encabeçamento do cabo, quando sofreu choque elétrico através de energização acidental advinda de descarga atmosférica do lado aterrado (Figura 4), porém não equipotencializado, devido ao seccionamento dos condutores na estrutura. O eletricista perdeu os sentidos por alguns segundos, mas não sofreu nenhuma lesão; estar em série com o poste de madeira, pode ter contribuído para a redução da intensidade da corrente no corpo.

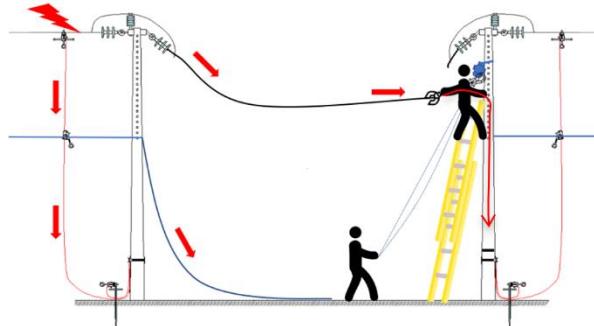


Figura 4: Acidente do caso 3
Fonte: dos Autores

4 – MODELAGEM ELÉTRICA

Foi realizado na CEMIG um estudo com objetivo de revisar e refinar os cálculos para análise do uso dos conjuntos de aterramento temporário e cálculo para avaliação da condição de emenda de cabo com uso dos Conjuntos de aterramento temporário [1][2].

Foram considerados os parâmetros do documento Cemig ED-4002 [3], utilizando as mesmas premissas do estudo original, com pequenos ajustes (Figura 5). E na Figura 6, temos os parâmetros de um alimentador monofásico que foi utilizado para simulações.

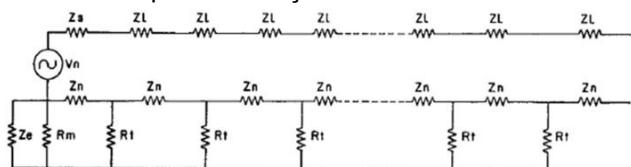


Figura 5: correção do ponto de cálculo do equivalente - Alterado de F-T para F-N
Fonte: CEMIG, 1986 [3]

Considerou-se como parâmetro a resistência equivalente do corpo humano, de acordo com IEEE Std 1048 – Guide for Protective Grounding of Power Lines e CHANCE – Encyclopedia of Groundings, os valores tipicamente considerados na literatura: 500 Ω a 1000 Ω , ressaltando-se que é difícil determinar o valor exato pois esse valor é variável dependendo das condições ambientais e equipamentos de proteção usados [7][4][5].

1 - Características do alimentador

- bitola de condutor fase - 336,4 CA.
- bitola do condutor neutro - 1/0 CA.
- tensão nominal fase, neutro- 7967 V.
- posteiação - poste de concreto circular.

2 - Parâmetros de cálculo

- Z_L - impedância do condutor fase = $0,2035 + j0,3914 \Omega/km$
 Z_m - impedância do condutor neutro = $0,0195 + j0,0163 \Omega/30m$
 Z_s - impedância equivalente do sistema = $0,44 \Omega$
 R_m - resistência da malha de aterramento = $0,7 \Omega$
 R_T - resistência de aterramento por poste = 300Ω (ver obs.1)
 R_p - resistência do poste de concreto = $450 \Omega/m$
 R_c - resistência do conjunto de aterramento = $0,005 \Omega$
 R_h - resistência do corpo humano = 1000Ω
 n - número de pontos de aterramento antes = 10
 m - número de pontos de aterramento depois = 100
 d - distância entre postes de aterramento = 30 m.

Figura 6: parâmetros de efeitos da corrente no corpo humano
Fonte: CEMIG, 1986 [3].

Através do modelo do alimentador monofásico, foram realizados cálculos da corrente no eletricista executando emenda no solo de condutor em uma estrutura aterrada, utilizando sela-neutro (Figura 7).

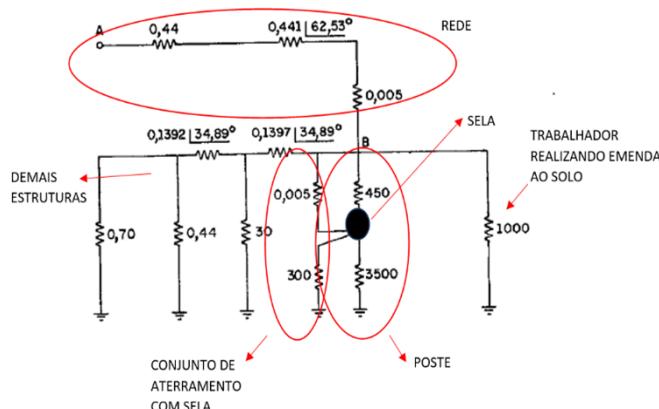
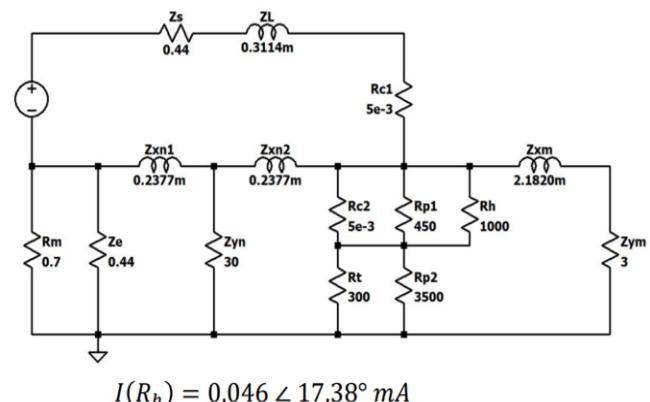
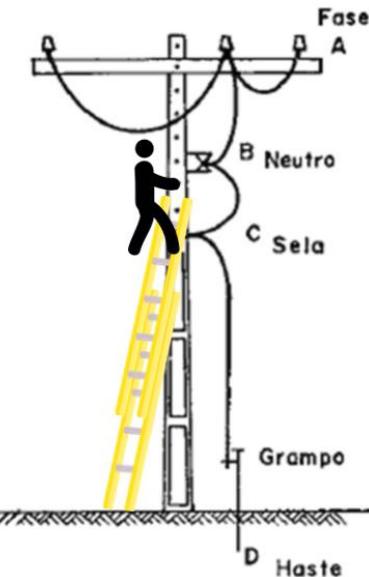


Figura 7: Esquema elétrico de cálculo de corrente
Fonte: dos Autores

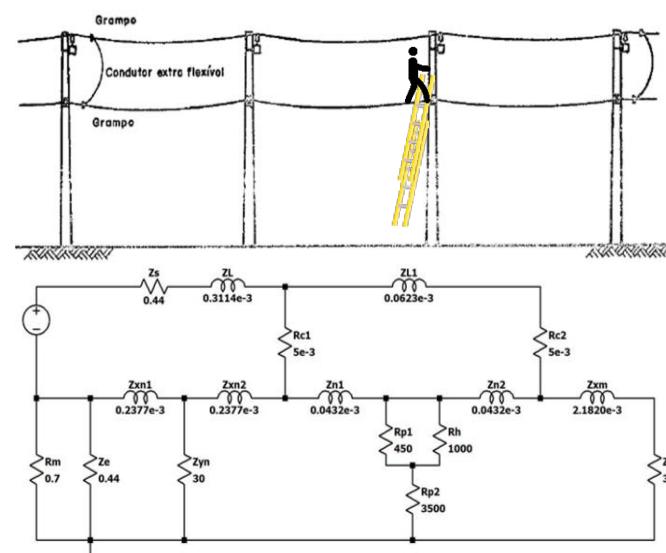
Considerando o diagrama unifilar acima, obtivemos um valor de corrente total de curto-circuito de 6,3kA, uma diferença de potencial de 3.226V, e por consequente, 3,26A no corpo do eletricista.

Após a identificação do risco representado pela corrente calculada, foram realizados estudos mais aprofundados que tiveram como objetivo analisar outras situações semelhantes de risco e fornecer soluções adequadas. Os resultados obtidos serão apresentados abaixo nos casos de 1 a 7. Em cada caso, primeiramente, será apresentado o problema, logo após o circuito elétrico modelado pelo documento Cemig ED-4002 [3] e simulado pela equipe de engenharia da CEMIG, utilizando os softwares MATLAB/Simulink [15] e LTspice [9].

Caso 1 – Aterramento de ponto na estrutura com uso de conjunto sela neutro.

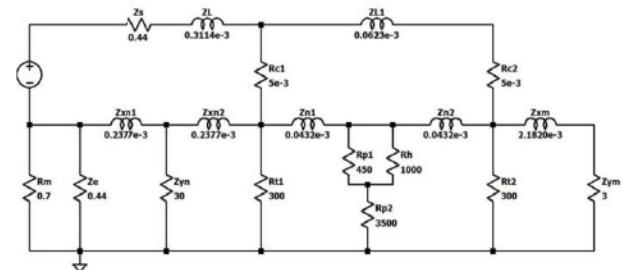
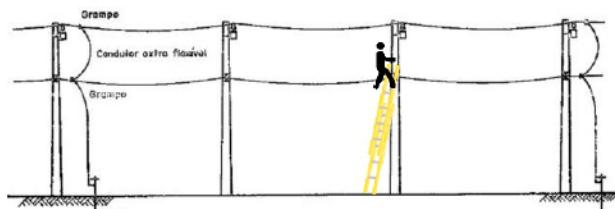


Caso 2 – Aterramento de trecho (Conexão Fase-Neutro).



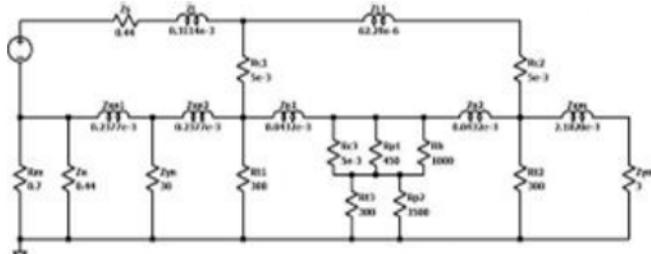
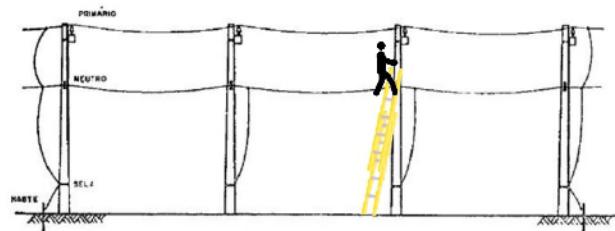
$$I(R_h) = 209,47 \angle 17,13^\circ mA$$

Caso 3 – Aterramento de trecho (Conexão Fase-Neutro-Haste).



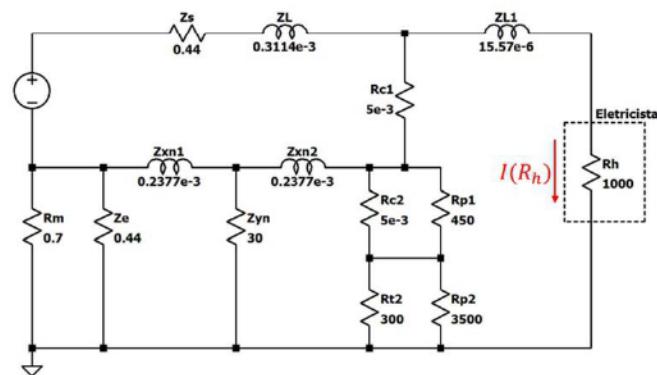
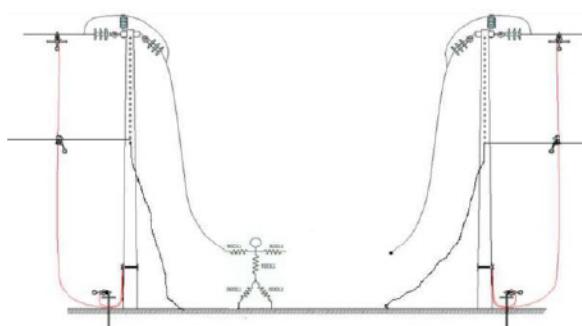
$$I(R_h) = 208,93 \angle 17,10^\circ \text{ mA}$$

Caso 4 – Aterramento de trecho (Conexão Fase-Neutro-Haste e sela neutro em todos os postes).



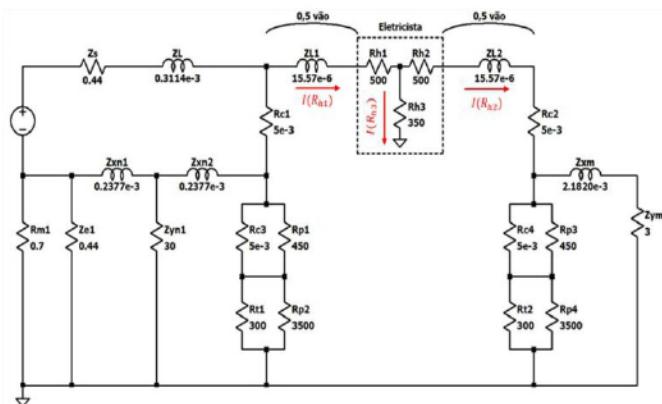
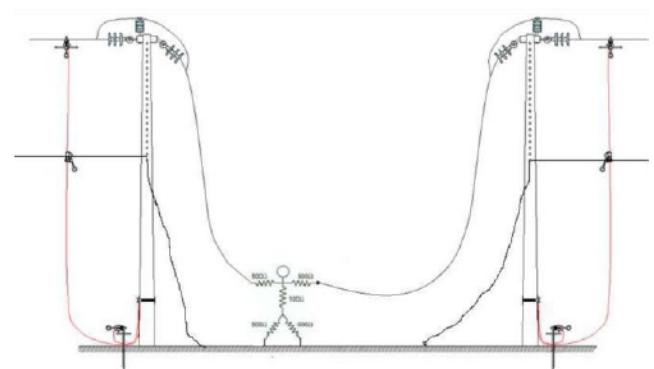
$$I(R_h) = 0,0464 \angle 17,08^\circ \text{ mA}$$

Caso 5 – Emenda de cabos no chão (Eletricista tocando a fase em um lado do vão rompido).



$$I(R_h) = 2,8750 \angle 16,79^\circ A$$

Caso 6 – Emenda de cabos no chão (Eletricista tocando os dois lados da fase rompida).

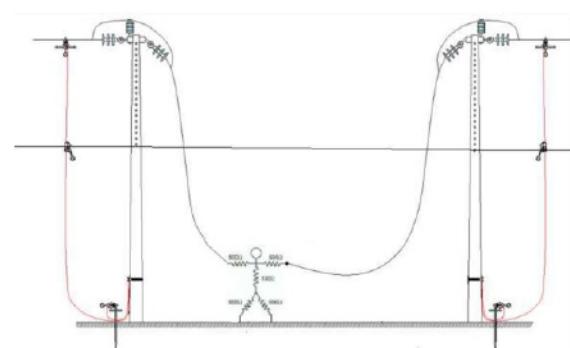


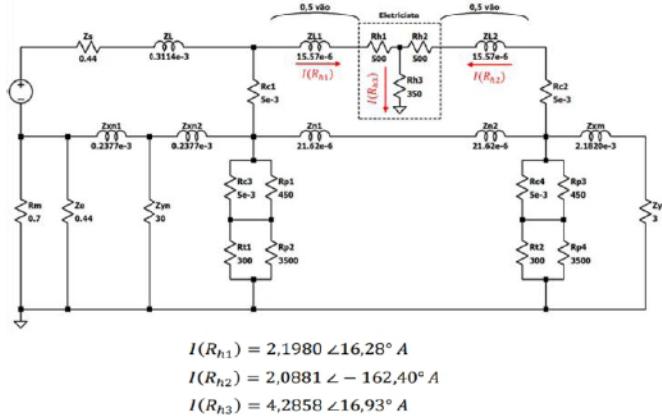
$$I(R_{h1}) = 4,0684 \angle 16,78^\circ A$$

$$I(R_{h2}) = 1,6675 \angle 16,73^\circ A$$

$$I(R_{h3}) = 2,4009 \angle 16,82^\circ A$$

Caso 7 – Emenda de cabos no chão (Contato com os dois lados da fase – neutro contínuo).





Nas tabelas a seguir temos os resultados das correntes simuladas no eletricista no solo e no alto da estrutura durante a execução de emenda de cabos.

Tabela 2: Corrente no eletricista no poste

Casos 1-4	$I(Rh)$ [mA]
1 - Aterramento com Sela-Neutro	0,0464 $\angle 17,38^\circ$
2 - Aterramento de trecho (F-N)	209,47 $\angle 17,13^\circ$
3 - Aterramento de trecho (F-N-haste)	208,93 $\angle 17,10^\circ$
4 - Aterramento de trecho (F-N-Haste e sela-neutro em todos os postes)	0,0464 $\angle 17,08^\circ$

Fonte: dos Autores

Tabela 3: Corrente no eletricista no solo

Casos 5-7	$I(Rh1)$ [A]	$I(Rh2)$ [A]	$I(Rh3)$ [A]
5 - Eletricista tocando um lado do vão	2,8750 $\angle 16,79^\circ$	N/A	N/A
6 - Eletricista tocando os dois lados do vão	4,0684 $\angle 16,78^\circ$	1,6675 $\angle 16,73^\circ$	2,4009 $\angle 16,82^\circ$
7 - Eletricista tocando um lado do vão com neutro contínuo	2,1980 $\angle 16,28^\circ$	2,0881 $\angle -162,40^\circ$	4,2858 $\angle 16,93^\circ$

Fonte: dos Autores

Após a realização das simulações, constatamos o risco de choque elétrico para as equipes envolvidas, tanto no solo quanto no alto da estrutura, durante a execução dessas atividades quando o executante não está utilizando luvas isolantes ou equipotencializado.

5 – PROCEDIMENTO SEGURO

Diante desse cenário, identifica-se a importância de medidas para eliminar/controlar o risco de choque elétrico nas atividades de emendas de cabos, que iremos abordar na sequência.

5.1 Análise da emenda de cabo no solo

Em situações de emenda de cabo no solo, além do aterramento de trecho, devem-se utilizar luvas isolantes compatíveis com o nível de tensão da rede [7]. Mangas isolantes devem ser utilizadas de acordo com a análise e controle de riscos da equipe.

Enquanto o cabo permanecer no solo, a equipe não pode tocar no cabo com parte do corpo desprotegida (Figura 8). É obrigatório o uso de luvas isolantes, inclusive, ao manusear a carretilha/moitão para subir o cabo após a emenda.

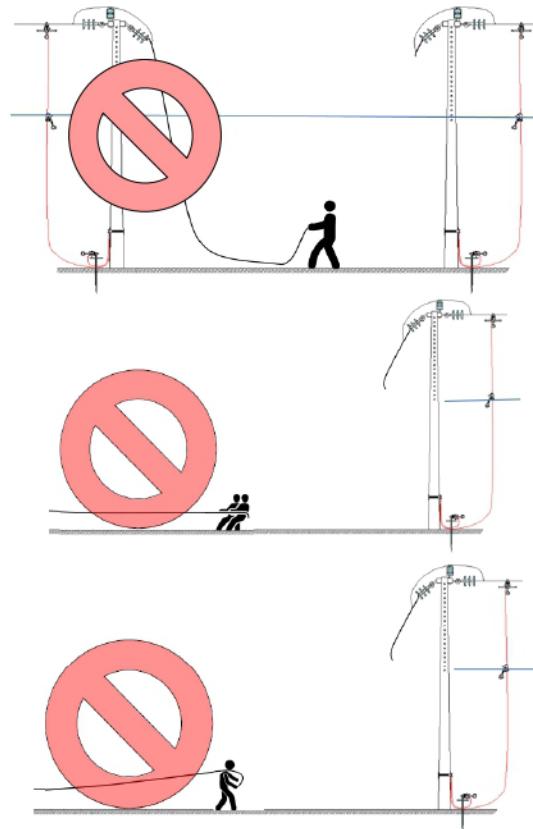


Figura 8: Formas não permitidas para manuseio de cabos seccionados ao solo
Fonte: dos Autores

Conforme análise de riscos, sendo necessário puxar o cabo conectado ao SEP, deve ser utilizada uma corda com isolador e garra na ponta do cabo, eliminando o risco de choque elétrico nesta etapa conforme Figura 9.

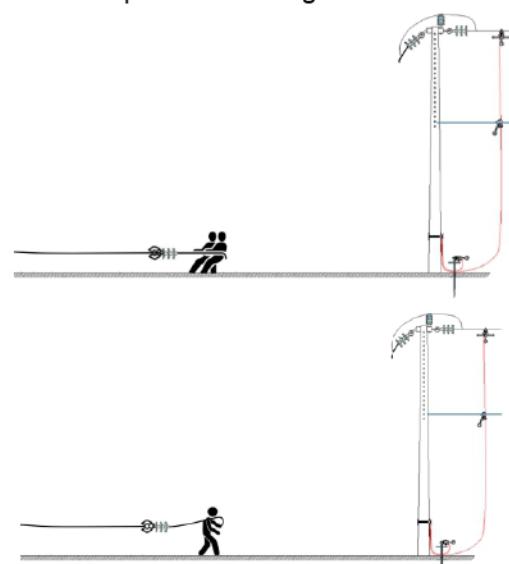


Figura 9: Formas padronizadas para manuseio de cabos seccionados ao solo
Fonte: Dos autores

A instalação da garra no cabo deve ser realizada utilizando luvas isolantes. Caso a equipe esteja utilizando a corda com o isolador na ponta do cabo (Figura 10), dispensa-se o uso de luvas isolantes ao puxar o cabo pela corda.



Figura 10: Arranjo para manuseio de cabo conectado ao SEP
Fonte: Dos autores

Esse arranjo garante o controle de risco de choque elétrico para a equipe que está manuseando o cabo no solo. Reforçando que a luva isolante deve ser compatível com o nível de tensão da rede aterrada.

5.2 Análise do encabeçamento na estrutura

Antes de analisarmos o encabeçamento e/ou emenda do cabo na estrutura, precisamos explorar o conceito de equipotencialização na estrutura de trabalho, que não é obrigatório no Brasil, porém aplicado em algumas concessionárias para evitar a passagem de corrente elétrica pelo corpo do eletricista [8][16].

5.2.1 Conceito de Zona Equipotencial de Trabalho

De acordo com a OSHA (Occupational Safety and Health Administration), uma zona equipotencial é uma zona de trabalho na qual o trabalhador está protegido contra choques elétricos de diferenças de potencial elétrico entre objetos na área de trabalho. Essas diferenças de potencial podem ser causadas por tensão induzida, reenergização da linha ou raios [11][12][13][14].

O trabalhador em zonas equipotenciais, exemplificadas na Figura 11, está protegido contra choque elétrico porque existe um estado quase idêntico de potencial elétrico entre quaisquer dois pontos do corpo. Para garantir que os aterramentos de proteção individual protejam o trabalhador de condições perigosas de contato, é essencial empregar bons métodos de aterramento de engenharia reconhecidos, como os do IEEE Guide for Protective Grounding of Power Lines, IEEE 1048-2003 [7].

Considerando o conceito de equipotencialização exposto, destacamos que em situações de cabos seccionados na estrutura de trabalho, o eletricista no poste não pode tocar em condutores que não estejam conectados no sela-neutro da estrutura de trabalho (Figura 12).

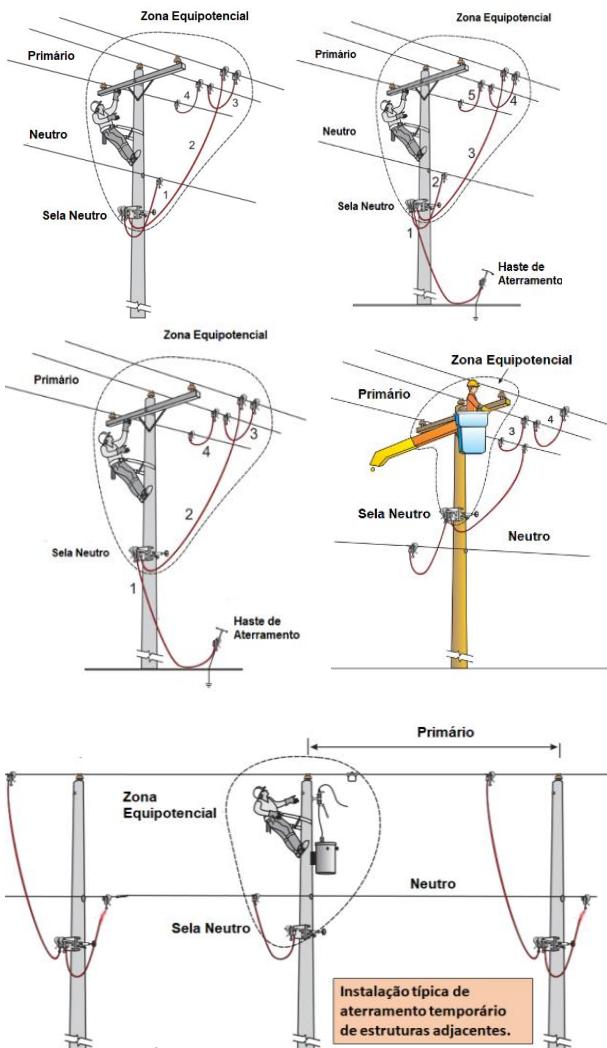


Figura 11: Ilustrações de zonas equipotenciais de trabalho
Fonte: IHSA.CA, 2011 [8].

Caso o circuito não possua neutro ou ele esteja seccionado ou seja seccionado durante a atividade, devem ser instalados dois selas-neutro, um em cada lado da estrutura (ponta de condutor fase/neutro) trabalhada, podendo ser utilizada a mesma haste de aterramento para as duas selas.

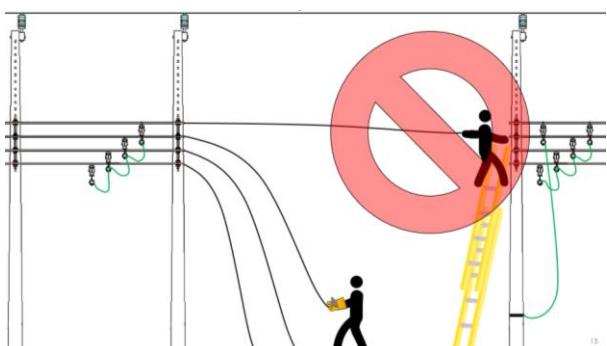


Figura 12: Forma incorreta do eletricista na estrutura manusear o condutor seccionado para emenda.
Fonte: Dos autores

O procedimento correto é o que se segue: o eletricista ao solo, utilizando luvas isolantes, deve conectar o cabo partido a um sela neutro na estrutura onde será realizada a emenda, garantindo

assim a equipotencialização completa do eletricista. Sendo garantida a equipotencialização, o eletricista que está no solo deve entregar o condutor conectado ao sela neutro para o eletricista na estrutura (Figura 13).

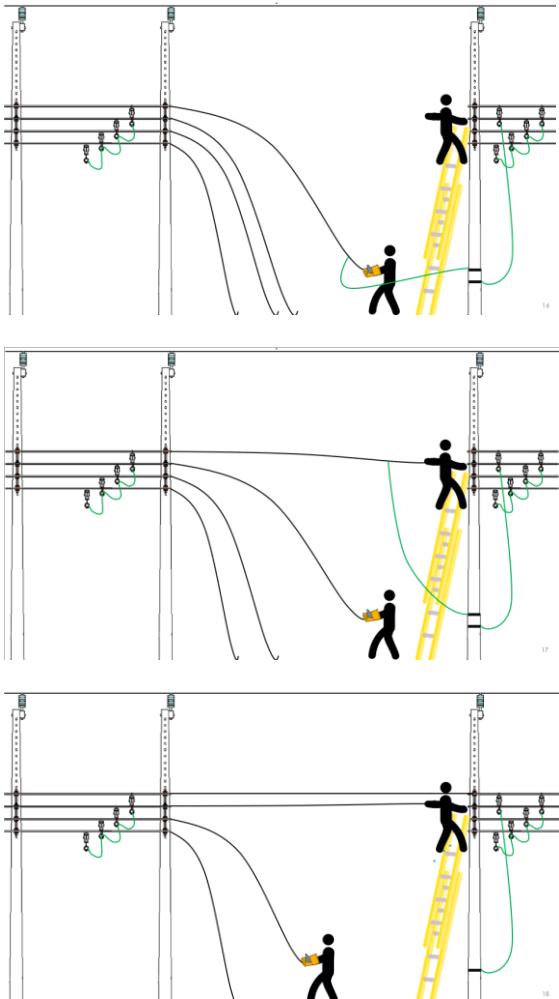


Figura 13: Forma correta de entregar o condutor seccionado para o eletricista que está posicionado no alto da estrutura.
Fonte: Dos autores

Nos casos em que haja a necessidade de seccionar o neutro durante a atividade e o aterramento for de ponto, alternativamente poderá ser utilizado um by-pass em substituição ao segundo sela-neutro conforme a figura 14.

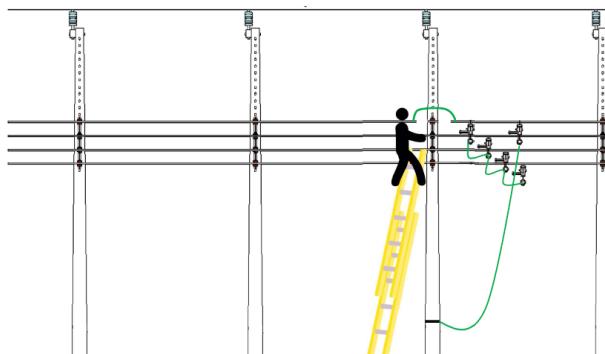


Figura 14: Utilização de by-pass para equipotencialização durante seccionamento
Fonte: os Autores

Enquanto os cabos conectados ao SEP permanecerem no solo, a equipe não pode manuseá-los com parte do corpo desprotegida de EPI's isolantes, sendo obrigatório o uso de luvas isolantes, inclusive, ao utilizar a carretilha/moitão (Figura 15).

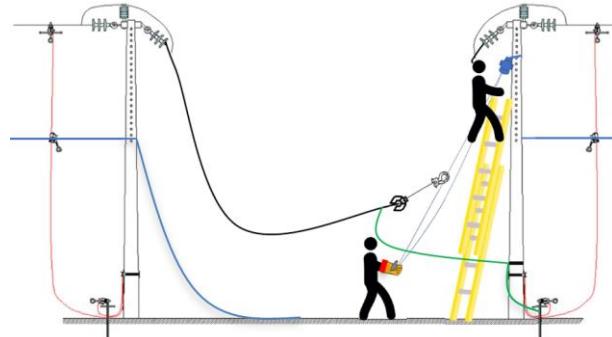


Figura 15: Utilização de luvas isolantes para utilizar carretilha/moitão
Fonte: Dos autores

Após identificado o risco de choque elétrico na atividade de emenda de cabos e definidos os controles, foi necessário ir a campo para ajustá-los com a rotina das equipes.

6 – EXECUÇÃO EM CAMPO

As imagens a seguir (Figuras de 16 a 21) referem-se à aplicação do procedimento que foi proposto para o controle do risco de choque elétrico na atividade de emenda de cabos.



Figura 16: Haste de aterramento com os dois grampos dos selas neutro instalados no poste.
Fonte: dos Autores



Figura 17: Poste aterrado com dois selas neutro, um do aterramento temporário e outro para a equipotencialização do eletricista

Fonte: dos Autores



Figura 18: Eletricista instalando Grampo do segundo sela no neutro rompido, utilizando luvas isolantes.

Fonte: dos Autores



Figura 19: Eletricistas instalando o moitão para elevar cabo rompido, utilizando luvas isolantes.

Fonte: dos Autores



Figura 20: Eletricistas elevando o cabo rompido
Fonte: dos Autores



Figura 21: Eletricista utilizando luvas de vaqueta na estrutura recebendo o cabo, estando equipotencializado.

Fonte: dos Autores

7 – CONCLUSÃO

A atividade de emenda de cabos em redes de energia elétrica apresenta desafios significativos em diferentes cenários, como em áreas urbanas ou rurais, em solo ou em estruturas. Durante a realização dessas emendas, os eletricistas podem estar em contato com uma ou ambas as extremidades do cabo rompido, exigindo a adoção de medidas eficientes de segurança além do cumprimento dos requisitos da NR10, quanto à desenergização do sistema de maneira correta.

No caso da emenda de cabo no solo é fundamental utilizar luvas isolantes compatíveis com o nível de tensão, garantindo a proteção dos eletricistas. Além disso, ao manusear o cabo conectado ao SEP, deve-se utilizar uma corda com isolador e garra na ponta do condutor, evitando o risco de choque elétrico.

Já em situações de cabos seccionados em estruturas, deve-se garantir a equipotencialização do eletricista. Nesse caso, ele não deve ter contato com condutores que não estejam conectados ao sela-neutro da estrutura de trabalho. Para isso, utiliza-se um segundo sela neutro.

Para seccionar o condutor neutro da estrutura, pode-se utilizar um by-pass como alternativa. A utilização de luvas isolantes também é obrigatória durante a manipulação de carretilhas ou moitões conectados aos cabos devido ao risco de choque elétrico.

A ausência de requisitos precisos sobre a zona de equipotencialização no SEP Brasileiro reforça a importância de seguirmos as diretrizes estabelecidas por órgãos reguladores, como o Occupational Safety and Health Administration (OSHA), IEEE e da IHSA (Infrastructure Health and Safety Association).

A correta análise e modelagem elétrica, considerando os parâmetros como a resistência equivalente do corpo humano, contribuem para um melhor entendimento dos riscos e da distribuição de corrente nos eletricistas durante a realização das emendas de cabo.

Destacamos que o treinamento, os acompanhamentos em campo, a conscientização dos eletricistas no cumprimento dos procedimentos e a utilização correta dos EPI's contribuem para minimizar o risco de choque elétrico na atividade de emenda de cabos.

Diante do exposto, concluímos que é primordial provocarmos o MTE - Ministério do Trabalho e Emprego e as empresas do setor elétrico no Brasil a analisarem os procedimentos, considerando o risco de choque elétrico demonstrado, para garantirmos a integridade física dos trabalhadores nas atividades de emenda de cabos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CEMIG, 02.111- DT/ED 4002 - *Conjunto de Aterramento Temporário – Desenvolvimento, Especificação e Aplicação* (CEMIG, 1986)
- [2] CEMIG, ED-3.14 – *Estudo de Distribuição – Critérios para Aterramento de Redes de Distribuição* (CEMIG, 1992).
- [3] CEMIG, ED-4002 *Conjunto de Aterramento Temporário – Desenvolvimento Especificação e Aplicação* (CEMIG, 1986).
- [4] CHANCE® *Encyclopedia of Grounding for de-energized construction & maintenance*, 2018. Disponível em <https://hubbellcdn.com/literature/07-0801_Grounding.pdf>. Acesso em Jul. 2023.
- [5] DALZIEL, C.F., "Electric Shock Hazard, IEEE Spectrum Magazine, vol.9, no.2, pp. 41-50, 1972.
- [6] DALZIEL, C.F.; LEE, W. R., "Lethal Electric Currents", IEEE Spectrum, 44-50, February, 1969.
- [7] IEEE Std 1048 – *Guide for Protective Grounding of Power Lines*, 2016.
- [8] IHSA – Infrastructure Health & Safety Association *Temporary Grounding and Bonding Techniques, Safe Practice Guide*, 2011. Disponível em <<https://www.ihsa.ca/pdfs/products/id/SPG16.pdf>>. Acesso em Jul. 2023.
- [9] LTspice. simulator software. SPICE Simulation Program with Integrated Circuit Emphasys. Version 17.1.9 - Analog Devices. Disponível em <<https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltpice-simulator.html>>. Acesso em Jul. 2023.
- [10] Ministério do Trabalho e Emprego. *NR 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade*. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2004.
- [11] OSHA 1910.269 App C - *Protection From Hazardous Differences in Electric Potential* | Occupational Safety and Health Administration. Disponível em <<https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.269ApC>>. Acesso em Jul. 2023.
- [12] OSHA 1910.269(m) *De-energizing Lines and Equipment for Employee Protection*. Disponível em <[https://www.osha.gov/laws-regs/interlinking/standards/1910.269\(m\)\(3\)](https://www.osha.gov/laws-regs/interlinking/standards/1910.269(m)(3))>. Acesso em Jul. 2023.
- [13] OSHA 1910.269(n) *Grounding for the Protection of Employees*. Disponível em <[https://www.osha.gov/laws-regs/interlinking/standards/1910.269\(n\)](https://www.osha.gov/laws-regs/interlinking/standards/1910.269(n))>. Acesso em Jul. 2023.
- [14] OSHA 1926.962 - *Grounding for the protection of employees*. Occupational Safety and Health Administration. Disponível em <<https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1926/1926.962>>. Acesso em Jul. 2023.
- [15] Simulink, MathWorks, Inc. (2022). MATLAB. Disponível em <<https://www.mathworks.com>>. Acesso em Jul. 2023.
- [16] U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Denver – Colorado. *FIST 5-1 Personal Protective Grounding for Electric Power Facilities and Power Lines*. Disponível em <https://www.usbr.gov/power/data/fist/fist5_1/vol5_1a.pdf>. Acesso em Jul. 2023.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

Supervisão de corrente de fuga e falhas de isolamento: Aumento da segurança elétrica preditiva e redução de acidentes

Felipe Marin Gomes

felipe@rdibender.com.br

Kassio Pereira

kassio@rdibender.com.br

Caroline Alves Henrique Bender Rodrigues

cbender@rdibender.com.br

RESUMO

Este artigo visa difundir conceitos elétricos e instrumentos reconhecidos por normas nacionais e internacionais, os quais tem a função de elevar a segurança e confiabilidade das instalações elétricas através da supervisão de isolamento e de corrente de fuga, garantindo, assim, uma maior proteção a colaboradores e a possibilidade de uma manutenção preditiva.

1.0 – INTRODUÇÃO

A manutenção preditiva elétrica é um conceito de suma importância para garantir a segurança dos trabalhadores e das instalações de plantas fabris, usinas, minas, subestações de energia e de qualquer outro ambiente em que a energia pode causar danos à vida humana e ao patrimônio. A definição de manutenção preditiva segundo a ABNT NBR 5462 é:

“Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.”

A manutenção preditiva, portanto, é aquela que precede até mesmo a preventiva, dando dados que são capazes de tornar a manutenção preventiva muito mais rápida, pois já se sabe exatamente onde deve ser realizada a manutenção e, até mesmo, pode-se saber o que deve ser feito. Analisar as grandezas elétricas continuamente, online, com uma comunicação eficiente com as

equipes de manutenção é o que garante a manutenção preditiva e possibilita a redução de acidentes elétricos.

Segundo o anuário estatístico de acidentes de origem elétrica ano base de 2022 da Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade (“ABRACOPEL”), no último período de coleta de dados foram registrados 1828 acidentes envolvendo eletricidade com 686 óbitos. Essas fatalidades poderiam ser reduzidas caso o uso de soluções preditivas fosse disseminado e utilizado em um maior número de instalações, especialmente as mais críticas, onde a vida de colaboradores pode estar em risco.

Nesse sentido, por exemplo, é possível saber da existência de uma falha de isolamento antes de que esse evento cause danos à instalação ou acidentes. Da mesma forma, é possível identificar correntes de fuga em estágios ainda iniciais, possibilitando uma manutenção eficiente, possibilitando melhor planejamento, reduzindo o tempo de reparo e de seccionamento de energia.

Em instalações cujo esquema de aterramento é o IT, o uso do Dispositivo Supervisor de Isolamento (DSI) é obrigatório, exigido pela norma ABNT NBR 5410 item 5.1.2.2.4.4 alínea d). Conforme se verá ao longo desse artigo, o DSI permite que uma primeira falha de isolamento seja identificada e comunicada aos responsáveis pela manutenção antes de qualquer evento danoso.

A utilização do aterramento IT traz o benefício de continuidade a operacional, mesmo com uma falha de isolamento (conexão de um alimentador ao aterramento), sem qualquer prejuízo ou risco, mantendo-se o abastecimento de energia. Somente o uso desse tipo de aterramento já traz grande vantagem para a segurança dos

1/9

colaboradores, pois mesmo com uma falha à terra, não há risco de choque elétrico.

Porém, é fundamental que essa falha seja identificada e corrigida com celeridade, pois múltiplas falhas, podem gerar falsos comandos, desligamentos inesperados, indisponibilidade de fornecimento de energia e graves acidentes. É para isso que serve o DSI, que através de método ativo de medição afere com precisão o valor da resistência entre os alimentadores e o aterramento, possibilitando maior confiabilidade ao sistema e, em conjunto com outros instrumentos, soluciona as deficiências de métodos antigo, a saber:

- (i) Possibilita a localização das falhas de isolamento sem desenergizar os circuitos, através de equipamentos de localização fixos ou com ferramenta portátil, os quais atuam em conjunto com o DSI;
- (ii) Mantém a precisão e sensibilidade em situações com múltiplas falhas, mesmo simétricas;
- (iii) Possui uma resistência interna com alto valor ôhmico, mantendo a alta segurança elétrica do sistema.

No entanto, no Brasil, o esquema de aterramento comumente adotado é o TN. Nesses esquemas, um conceito semelhante de manutenção preditiva pode ser aplicado e ocorre através de um instrumento chamado Dispositivo Supervisor de Corrente Residual (DSCR).

O DSCR pode ser considerado a evolução dos dispositivos DR, pois além de proteção, o sistema ganha supervisão, flexibilidade, possibilitando a manutenção preditiva, podendo ser utilizado para identificar todos os tipos de corrente: Tipo A, Tipo B e Tipo B+.

O DSCR faz a leitura da corrente de fuga, desde pequenos valores (6mA), até valores muito elevados (10A). Com a identificação das correntes de fuga ainda em estágios iniciais, a falha é comunicada às equipes responsáveis pela manutenção que tem tempo para corrigir o problema, melhorando a continuidade operacional e mantendo altos níveis de segurança. Caso necessário, o DSCR possui um segundo nível de alarme que pode ser ajustado em qualquer valor da faixa de leitura, podendo ser utilizado para o seccionamento, garantindo a proteção do sistema.

Nesse artigo iremos abordar como ambas as ferramentas se sobrepõe e superam os métodos hoje utilizados e de que forma isso pode aumentar a segurança elétrica em diversos locais de missão crítica como hospitais, plataformas de petróleo, indústrias e data centers.

2.0 – ESQUEMA DE ATERRAMENTO IT

O esquema de aterramento IT é previsto no item 4.2.2.2. na norma ABNT 5410 (Apêndice 1), no qual a primeira letra é a situação dos alimentadores em relação a terra, o "I" significa que todos os condutores são isolados da terra. A segunda letra é a situação das massas em relação a terra, o "T" significa que as massas são aterradas diretamente.

Nele todos os condutores são isolados da terra ou, um ponto da alimentação é aterrado através de alta impedância. Conforme figura 1.

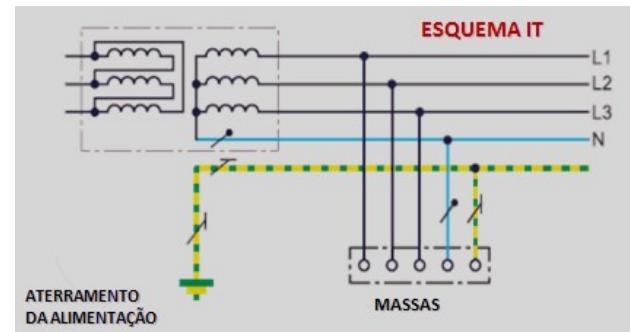


Figura 1 – Esquema de aterramento IT

Este tipo de aterramento geralmente é utilizado em aplicações críticas, nas quais é necessário maior continuidade elétrica em que mesmo sob condição de falta, o processo não pode ser interrompido.

No esquema de aterramento IT isolado, quando uma falha de isolamento ocorre, não há uma corrente elétrica significativa circulando no sistema, justamente por não haver um ponto de retorno entre o aterramento e os alimentadores. Com isso, não há necessidade de interrupção ou desligamento, mitigando o risco de acidentes de origem elétrica e mantendo o sistema em operação.

O correto monitoramento do esquema de aterramento IT é fundamental, pois sua utilização perde o sentido caso a primeira falha não seja encontrada e eliminada antes que ocorram outras falhas. Caso o sistema seja exposto a mais de uma falha simultânea, não há garantia da continuidade elétrica e processos importantes podem ser interrompidos abruptamente, além do aumento do risco de choque e acidente de origem elétrica. Isso ocorre porque uma segunda falha em um condutor distinto da primeira, cria um retorno para a corrente elétrica circular.

Na Monografia: “*Estudo de confiabilidade aplicado ao aumento da disponibilidade da instalação de um laboratório de uma indústria alimentícia*” (Araujo, 2021) é feita a análise sobre a utilização do esquema de aterramento IT, para aumento da confiabilidade e continuidade

operacional. O estudo conclui que a adoção de tal esquema terá ganho relevante, desde que seja utilizado o DSI para o monitoramento do sistema, identificando quando há ocorrência da primeira falta à terra.

A norma ABNT NBR 5410 traz como nota: *"Tendo em vista as razões que normalmente motivam a adoção do esquema IT, a opção por esse esquema na prática perde sentido, se a primeira falta não for localizada e eliminada o quanto antes".* Os principais métodos de monitoramento e localização de falhas serão abordados no decorrer deste artigo.

2.1 – METODOLOGIAS COMUMENTE USADAS NO MERCADO NACIONAL

Os métodos mais antigos de supervisão de esquema de aterramento IT tem como base o desequilíbrio de tensão que ocorre entre alimentador e terra enquanto há uma falta terra em curso. Esses métodos possuem inúmeras deficiências e, talvez por essa razão, o esquema de aterramento IT ainda é pouco utilizado no Brasil.

2.1.1 – Método das lâmpadas

Um dos primeiros métodos desenvolvidos para a detecção de fuga à terra em sistemas com esquema de aterramento IT foi o método das lâmpadas. Ainda hoje muito utilizado em sistemas de corrente contínua, especialmente em comando e controle de subestações.

O conceito é muito simples. Lâmpadas com impedâncias iguais são utilizadas para interligar cada fase (ou polo) ao aterramento. Na figura 2 abaixo verifica-se um exemplo de aplicação para um sistema de corrente contínua em 125Vcc.

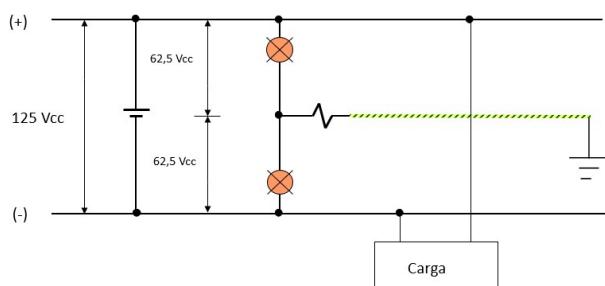


Figura 2 - método das lâmpadas. Sistema sem falhas.

De acordo com esse método, em uma situação sem falhas, temos uma divisão de tensão equilibrada entre cada um dos polos e o ponto de terra, no exemplo, como o sistema de corrente contínua é de 125Vcc, teremos 62,5Vcc de tensão entre cada polo e o ponto terra, com isso as duas lâmpadas ficam acessas com mesma intensidade luminosa. Conforme figura 2.

Quando uma falta à terra ocorre em um dos polos, um desequilíbrio na tensão aparece no sistema, desta forma, a lâmpada do polo com falha irá diminuir a intensidade luminosa enquanto a lâmpada do polo oposto ficará com essa intensidade aumentada, conforme a figura 3.

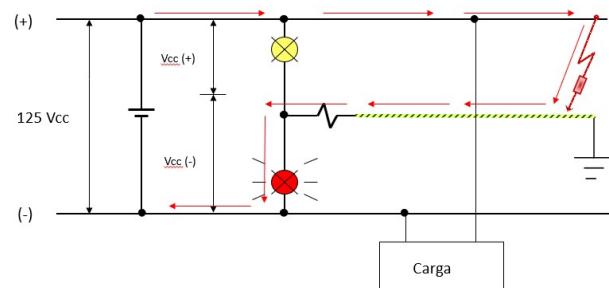


Figura 3 – Método das lâmpadas, sistema com fuga à terra.

2.1.2 – Desvantagens do método das lâmpadas para a detecção de fuga à terra

Esse método de supervisão é muito simples e por isso tem uma série de fragilidades que serão detalhadas abaixo:

1) Imprecisão na medição.

A avaliação da ocorrência ou não de falha depende de uma na análise visual do operador, inserindo um fator subjetivo na equação. Colocar essa responsabilidade sobre operadores deve ser evitado, uma vez que uma avaliação subjetiva e pessoal, passível inclusive de erro, não pode suportar as consequências de uma eventual falha na análise, colocando vidas de outros colaboradores em risco.

A identificação da primeira falha deve ser precisa e automática, sem depender da atuação humana para ser concretizada.

2) Não mede o valor da resistência de falha.

No método de identificação por lâmpadas, não há medição do valor da resistência e nem sinalização de alarmes de falha, o que impossibilita a manutenção preditiva eficiente.

3) Baixa sensibilidade.

A resistência interna das lâmpadas é baixa, cerca de 900Ω , com isso a detecção de falha só ocorre quando a resistência da falha for próxima a este valor.

A recomendação da norma DIN EM 57510 (VDE 0510):1977-01 para sistemas de comando é

que a resistência mínima seja $100\Omega/V$. Para um sistema de 125Vcc, 12.500Ω é um valor crítico, ou seja, as lâmpadas só irão sinalizar quando a resistência de falha for, aproximadamente, 10x menor que o padrão normativo.

4) Não detecta falhas simétricas.

A definição de falha simétrica, traduzindo o texto da norma IEC 61557-8, item 3.1.19 é o seguinte:

"defeito no isolamento de uma instalação ou equipamento elétrico criando um caminho resistivo para a terra tendo aproximadamente a mesma resistência de todos os condutores de fase para a terra."

Com a mesma resistência entre polos e aterramento, a tensão tende a ficar equilibrada, com isso as lâmpadas permanecerão com a mesma intensidade, indicando que não há problema, no entanto, o problema existe. Veja na figura 4.

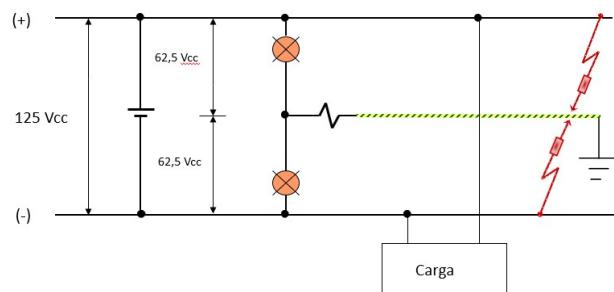


Figura 4 – método das lâmpadas com falhas simétricas.

5) Não localiza o circuito com falha

Esse método não possui qualquer ferramenta que facilite a identificação do circuito/equipamento/local com falha, o que deixa o sistema vulnerável a ocorrência de uma segunda falha à terra simultânea, potencialmente danosa à vida, a operação e ao sistema.

2.1.3 – Relés e cartões de fuga à terra

Os métodos de monitoramento que utilizam relés ou cartões de fuga à terra que tem como princípio de medição o desequilíbrio de tensão, possuem basicamente os mesmos problemas do método de das lâmpadas, pois utilizam o mesmo princípio.

A figura 5 ilustra um cartão de fuga à terra. Observamos que há uma melhoria com relação a impedância, mas não há diferença conceitual, por isso as principais deficiências são:

1) Imprecisão da medição.

Há uma melhora nesse quesito, um relé é acionado quando uma falta à terra é detectada, dessa forma o fator humano subjetivo é retirado da equação.

2) Não mede o valor da resistência de falha.

Este problema persiste inalterado, pois os cartões e relés não são capazes de medir a resistência da falha.

3) Baixa sensibilidade

Há uma melhora, pois a impedância interna sobe para $5k\Omega$ a $7k\Omega$, no entanto o problema não é corrigido pois ainda permanece, aproximadamente, 2x menor que o recomendado pela norma.

4) Não detecta falhas simétricas.

Este problema persiste inalterado em relação ao método das lâmpadas.

5) Não localiza o circuito com falha

Este problema persiste inalterado, pois não há como localizar a origem da falha.

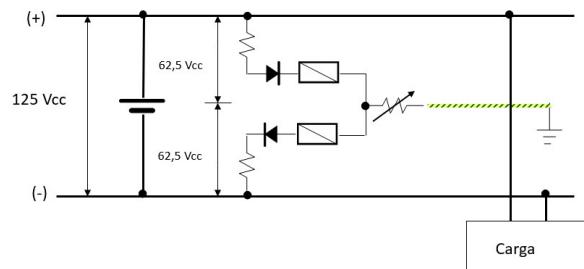


Figura 5 – método do cartão de fuga à terra.

2.2 – MÉTODO DE MEDIÇÃO ATIVO (DSI)

O DSI tem um princípio de funcionamento diferente do tradicional, pois utiliza um método ativo de monitoramento, diferente das formas citadas anteriormente que realizam a medição de uma grandeza do sistema. O DSIativamente injeta um sinal e mede a resistência de isolamento através da leitura deste sinal injetado.

Os métodos de medição utilizados pelos DSI têm como princípio de funcionamento a injeção de uma tensão em corrente contínua entre alimentadores e aterramento, na faixa de 12Vcc a 50Vcc, dependendo da aplicação. Para limitar o valor da corrente de medição é utilizada uma alta resistência (R_i) e para a análise do valor da

resistência de falha (R_F) é usada uma resistência de medição (R_m).

A fim de ilustrar essa questão, na figura 6 temos o diagrama funcional de um DSI que utiliza pulsos de tensão para fazer o monitoramento de cargas em CA e em CC, utilizando o método AMP (Adaptive Mesurement Principal):

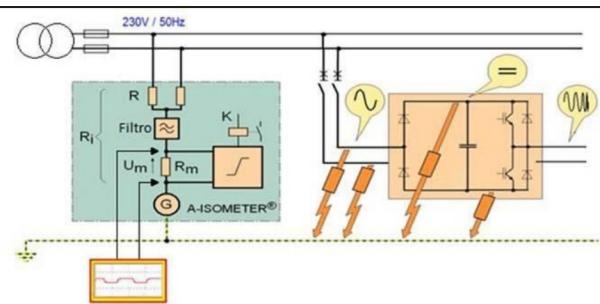


Figura 6 – Diagrama de um DSI de pulsos de tensão c.c. (Hofheinz, 2015)

2.2.1 – Vantagens da utilização de DSI para a detecção de fuga à terra

Quando analisamos os mesmos itens que eram fragilidades para os métodos de desequilíbrio de tensão, observa-se:

1) Precisão da medição

A medição é extremamente precisa com a utilização do DSI, não se limitando à sinalização da falha, mas também com a medição do valor da resistência. Além disso, não depende de qualquer ação humana para ocorrer, garantindo assim maior segurança à instalação e aos colaboradores ali alocados.

2) Medição do valor da resistência de falha

Realiza a medição do valor da resistência de falha, com indicação de dois níveis de alarme, dessa forma, é possível programar uma manutenção preditiva assertiva e eficiente, se dirigindo para o local exato do problema.

3) Sensibilidade

O DSI possui alta sensibilidade, iniciando a leitura em valores de resistência superiores a $1\text{M}\Omega$, cerca de $100x$ acima do valor crítico indicado pela norma DIN EM 57510 (VDE 0510):1977-01. Assim, é possível analisar a curva de tendência da queda da resistência ao longo do tempo, melhorando o parâmetro para a manutenção preditiva ocorrer com informações mais detalhadas e concretas.

4) Detecção de falhas simétricas

O DSI detecta falhas simétricas com a mesma precisão das assimétricas, pois essa uma das condições mínimas impostas pela IEC 61557-8, norma que regulamenta como um DSI deve ser construído.

5) Localização do circuito com falha

A localização do circuito e até do local com falhas é possível com a utilização de localizadores automáticos e portáteis de falha que funcionam em conjunto com o DSI. Para isso, o DSI utiliza um gerador de sinais, exemplificado no diagrama da figura 7.

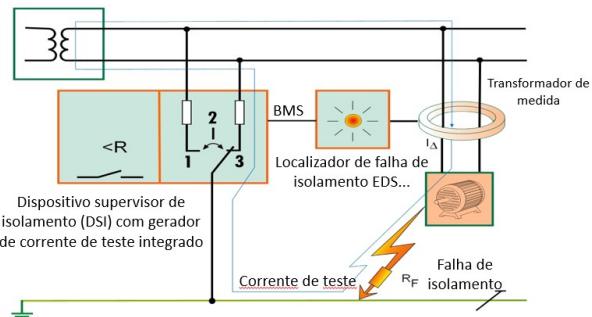


Figura 7 – Diagrama do gerador de sinais.

Quando uma falta à terra é identificada pelo DSI, o gerador de sinais é acionado e uma pequena corrente, limitada pelo DSI, passa pela falha. Com a utilização de TC's ultrassensíveis é possível identificar essa corrente e localizar o circuito com falha, como demonstrado na figura 8.

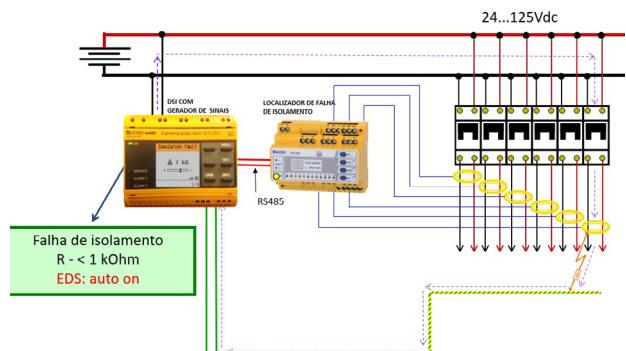


Figura 8 – Localização de Falha, sistema fixo

Existem situações em que quantidade de circuitos é muito grande, ou estes são muito extensos, de forma que é inviável adotar TC's para todos os circuitos. Quando isso acontece é possível utilizar equipamentos de localização portátil, utilizando o mesmo princípio de funcionamento, mas com TC's em forma de garra (similar a um alicate amperímetro), conforme figura 9.

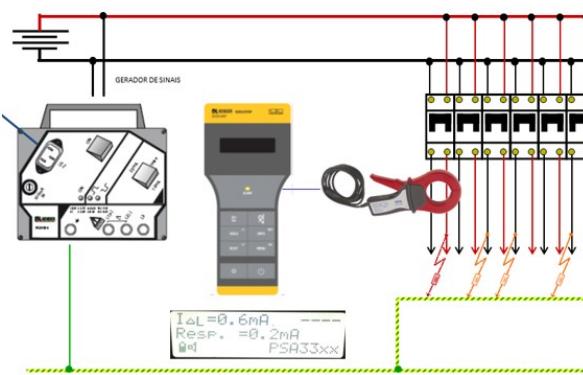


Figura 9 – Localização de Falha, sistema portátil

É importante destacar que todas as informações provenientes dos equipamentos fixos podem ser interligadas ao sistema de automação, via ModBus ou TCP-IP, diminuindo o tempo de ação da equipe de manutenção, aumentando sua eficiência e mitigando os riscos, tanto de acidentes de causa elétrica quanto de natureza operacional.

Conforme se verificou nas seções anteriores, a utilização do esquema de aterramento IT com a supervisão realizada pelo DSI garante uma proteção à instalação muito superior ao que se está acostumado no território brasileiro. Esse tipo de aterramento é mais difundido em locais em que duas situações não podem ocorrer, a saber, não pode haver o seccionamento da energia, bem como a falha elétrica não pode causar danos à vida, à equipamentos ou à instalação.

Nesse sentido, de acordo com a Norma ABNT NBR 13.534:2008 o aterramento IT é exigido em locais críticos de Estabelecimentos Assistenciais de Saúde, ou seja, em Centros Cirúrgicos, Unidades de Terapia Intensiva e em qualquer outro lugar onde a vida do paciente esteja sendo sustentada por equipamentos eletromédicos, como, por exemplo, emergências.

A norma faz tal exigência por uma questão muito simples. Durante um procedimento cirúrgico ou de sustentação de vida a energia não pode ser seccionada por um DR caso uma falha ocorra e, ao mesmo tempo, não é permitido que uma corrente de fuga atinja o paciente ou algum equipamento que esteja sustentando a vida do paciente. Nesses locais, portanto, exige-se a utilização o Sistema IT Médico, que nada mais é do que garantir um esquema de aterramento IT supervisionado por um DSI.

Apesar de muito difundido no segmento hospitalar, o esquema de aterramento IT é pouco utilizado em outras áreas. No entanto, entendemos que caso sua utilização fosse melhor difundida e

aplicada, muitos acidentes de origem elétrica poderiam ser evitados.

3.0 – ESQUEMA DE ATERRAMENTO TN-S

Apesar de entendermos que a utilização do esquema de aterramento IT ser vantajoso no que diz respeito à segurança elétrica e do trabalho, sabemos que a mudança de conceito em projetos pode ser um processo de longo prazo.

Dessa forma, nessa seção falaremos da possibilidade de garantir uma manutenção preditiva mesmo nas instalações que utilizam o esquema de aterramento TN-S.

O esquema de aterramento TN-S é previsto no item 4.2.2.2.1 na norma ABNT NBR 5410 (Apêndice 2), no qual a primeira letra é a situação dos alimentadores em relação a terra, o “T” significa: um ponto diretamente aterrado. A segunda letra é a situação das massas em relação a terra, o “N” significa: massas ligadas ao ponto da alimentação aterrado (em corrente alternada, o ponto aterrado é normalmente o ponto neutro). O “S” significa: funções de neutro e de proteção asseguradas por condutores distintos. Conforme figura 10:

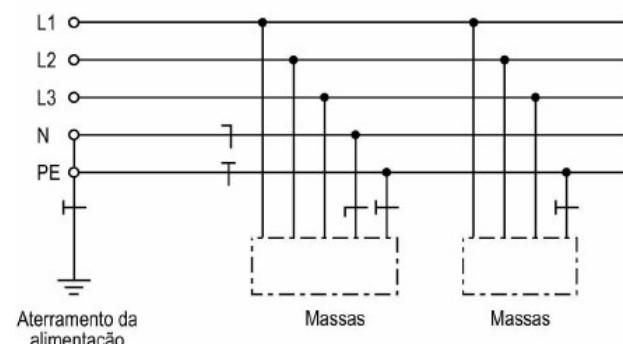


Figura 10 – Esquema de aterramento TN-S

No item 3.2.5, a norma define como dispositivo de proteção a corrente diferencial-residual (formas abreviadas: dispositivo a corrente diferencial-residual, dispositivo diferencial, dispositivo DR): Dispositivo de seccionamento mecânico ou associação de dispositivos destinada a provocar a abertura de contatos quando a corrente diferencial residual atinge um valor dado em condições especificadas.

O termo dispositivo não deve ser entendido como significando um produto particular, mas sim qualquer forma possível de se implementar a proteção diferencial-residual. São exemplos de tais formas: o interruptor, disjuntor ou tomada com proteção diferencial-residual incorporada, os blocos e módulos de proteção diferencial-residual

acopláveis a disjuntores, os relés e transformadores de corrente que se podem associar a disjuntores, etc.

De acordo com a norma ABNT NBR 5410 item 5.1.3.2.1.1, quando a corrente atinge 30mA deve ocorrer o seccionamento da energia para a proteção da vida.

No entanto, existe um dispositivo capaz de prever a falha e avisar que está acontecendo antes de a corrente atingir os 30mA, possibilitando a manutenção antes do seccionamento e garantindo maior credibilidade à instalação.

3.1 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO DSCR

O DSCR, Dispositivo Supervisor de Corrente Residual, tem como função monitorar e garantir a proteção de um circuito, pois além da função de leitura de corrente residual este equipamento pode ser conectado a um disjuntor para seccionamento da alimentação, caso seja necessário.

O princípio de funcionamento do DSCR é o efeito Hall ou efeito de campo magnético. Utilizando-se um TC ultrassensível envolvendo todos os alimentadores de uma determinada carga é possível realizar a leitura com excelente precisão do valor da corrente residual, conforme figura 11:

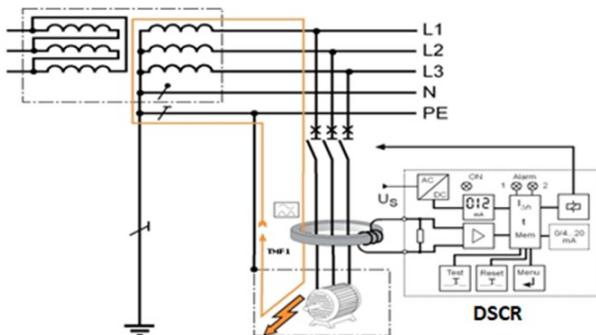


Figura 11 – Princípio de funcionamento DSCR

A medição por efeito Hall exige que haja variação no campo magnético para que a leitura seja feita, para cargas mais simples isso é suficiente, porém quando é necessário realizar o monitoramento e a proteção de cargas que utilizam componentes de corrente contínua, (por exemplo, motor alimentado por inversor) é necessário utilizar um TC diferenciado, com alimentação externa, conforme figura 12 a seguir.

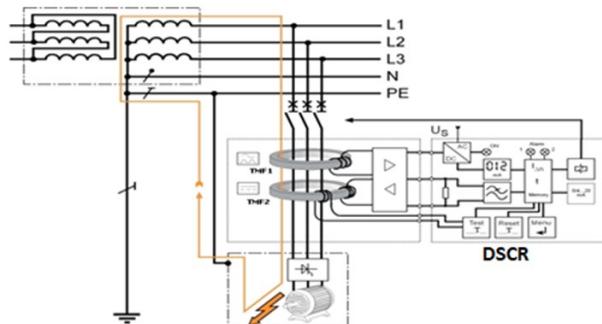


Figura 12 – Princípio de funcionamento DSCR tipo B e tipo B+

3.1.1 – As vantagens do DSCR para a prevenção de acidentes

As principais vantagens do DSCR frente ao DR estão relacionadas a previsibilidade, precisão e flexibilidade e são elas:

- 1) Possibilidade de ajustar nível de pré-alarme. Assim, em casos em que a corrente de fuga, ou corrente residual, cresce gradualmente, o DSCR gera um alarme sonoro e/ou visual como forma de alerta, sendo possível uma atitude antecipada à desconexão.
- 2) Leitura do valor da corrente residual, em tempo real, mostrando toda a distorção harmônica dessa corrente. Isso permite que a equipe técnica tenha conhecimento do real status do que está acontecendo, antes do seccionamento.
- 3) Em geral um DR não aceita mais de 100A a 150A de corrente de carga, já o DSCR não tem essa limitação, podendo ser usados em cargas superiores a 500A, garantindo ampla proteção de colaboradores.
- 4) Para aplicações onde não há contato de pessoas com a carga, o DSCR também permite ajustes de alarme ou seccionamento em correntes de fuga desde 6mA a 10A.
- 5) Todas as informações de ajuste e de leitura são disponibilizadas para o supervisório, sendo possível a completa automação do sistema e comunicação em tempo real com os responsáveis pela manutenção.

Com todas as leituras do DSCR disponibilizadas é possível aumentar a previsibilidade do sistema, consequentemente a segurança elétrica. Isso porque, o número de acidentes com causa elétrica pode ser reduzido

7/9

com o estudo das curvas de tendência das falhas, recorrência e, adoção de manutenção preditiva efetiva e direcionada para os locais onde já se sabe que existe um problema.

4.0 – AS SOLUÇÕES APRESENTADAS E A NR-10

Conforme artigo publicado por BIZZO na NR-10:

“Efetuar uma avaliação de exposição a riscos elétricos é condição intrínseca ao atendimento à NR 10, onde é obrigatório a elaboração do RTI – Relatório Técnico das Instalações Elétricas (...)

(...) Ressalta-se a interface da NR10 com o disposto na NR 1 – disposições gerais, onde a avaliação de fatores de riscos elétricos deve observar o Gerenciamento de Risco Ocupacional (GRO), e consequente PGR – Programa de Gerenciamento de Riscos, com a elaboração do inventário de perigos e riscos elétricos da Organização.”

Ainda de acordo com BIZZO:

“Considerando os “requisitos de gênero” das instalações elétricas, a avaliação de perigos e riscos Elétricos está basicamente dividida em três categorias: choque elétrico, fogo de origem elétrica, e arco elétrico.

Choque elétrico – O choque elétrico ocorre quando há um contato acidental de forma direta ou indireta com partes energizadas em que ocorra circulação de corrente pelo corpo humano. A correta avaliação desse quesito deve considerar as premissas estabelecidas na NBR 5410 BT e NBR 14039 MT,

Porém, visando a correta classificação de riscos elétricos no PGR, é necessário que sejam avaliados criteriosamente os requisitos das instalações elétricas para todas as pessoas expostas ao perigo da eletricidade, considerando as premissas estabelecidas como proteção total e proteção parcial conforme “competência das pessoas – BA” expostas, definidas nas normas técnicas aplicáveis.”

Conforme visto ao longo desse artigo, utilizar esquema de aterramento IT devidamente monitorado por um DSI em locais em que o Relatório Técnico das Instalações Elétricas e o

Programa de Gerenciamento de Risco consideram o risco de choque elétrico elevado, mas que o ambiente não pode ter interrupções no fornecimento de energia, pode ser muito vantajoso e seguro para evitar que correntes elétricas oriundas de falhas de isolamento atinjam os colaboradores e causem choques elétricos.

Através de um transformador de separação a alimentação elétrica de locais específicos pode ser separada e isolada da alimentação convencional, assim como ocorre no ambiente hospitalar com o uso do Sistema IT Médico.

Através desse mecanismo, pode-se analisar com maior cautela e atenção ambientes em que colaboradores estão mais expostos ao risco elétrico. Após o transformador de separação, pode-se criar um aterramento IT no qual a primeira falta não irá causar choque elétrico ou acidentes e, de igual modo, não será interrompida a produção e/ou os processos em andamento.

Caso o uso de um esquema de aterramento IT não seja possível, a utilização de um aterramento TN-S supervisionado por DSCR também garante uma maior proteção dos colaboradores contra choques elétricos e, além disso, fornece dados relativos às tendências de correntes de fuga de toda a instalação. Dessa forma, as equipes de manutenção conseguem analisar os dados e efetuar reparos antes que níveis críticos de ruptura da segurança elétrica sejam atingidos.

Um dos benefícios, inclusive, é a redução de riscos de incêndio de origem elétrica, a saber:

“(...) Fogo de origem elétrica – O fogo de origem elétrica (Classe C) ocorre através de efeito térmico oriundo ou não do circuito elétrico com a ignição de materiais que compõe a instalação. Durante um incêndio poderá haver partes energizadas. O combate a incêndios desse tipo requer técnicas específicas e deve fazer parte das medidas de controle pertinentes a cada cenário elétrico, considerando a realidade existente.

A definição de fogo Classe C corresponde a ocorrências em equipamentos elétricos energizados, como motores, transformadores, quadros de distribuição, fios e demais equipamentos. A avaliação desse requisito é obrigatória na estruturação do inventário de perigos e riscos elétricos no PGR, inclusive na definição de medidas de controle relacionadas a emergências. (...)

Supervisionar circuitos que alimentam motores, transformadores e demais equipamentos (como ar-condicionado) com o DSCR garante exatamente o que a NR-10 exige, ou seja, o tratamento correto dos riscos que o uso da eletricidade traz para os colaboradores. Receber a informação de um problema elétrico com a maior rapidez possível permite que ações preventivas sejam adotadas e não se alcance o nível crítico um incêndio.

5.0 - CONCLUSÃO

Conforme visto ao longo do artigo existe a possibilidade de as instalações elétricas elevarem o nível de segurança e confiabilidade através da adoção de novos esquemas de aterramento, bem como de equipamentos que tenham a capacidade de monitorar em tempo real e online a condição elétrica dos circuitos.

Caso se trate de um ambiente que não pode ter o fornecimento de energia interrompido, em virtude dos processos que ocorrem e que não podem parar, sugere-se o uso do esquema de aterramento IT e a adoção do DSI para a rápida identificação da primeira falta. Com isso, os processos não são interrompidos, bem como nenhum dano é causado as pessoas ou às instalações e equipamentos.

Caso se trate de ambientes menos críticos, onde o seccionamento da energia é tolerável, sugere-se o uso do DSCR para aumentar a confiabilidade das instalações, garantindo uma correta análise de dados e tendências de risco, possibilitando uma manutenção preventiva muito mais assertiva e eficiente.

Com a adoção dessas práticas, o aumento da segurança elétrica para os colaboradores expostos aos riscos elétricos, como choque elétrico ou incêndios de origem elétrica é muito relevante e deve ser almejado.

6.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DE SOUZA, Danilo Ferreira; MARTINHO, Edson; MARTINHO, Meire Biudes; MARTINS JR. Walter Aguiar (Org.). ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ACIDENTES DE ORIGEM ELÉTRICA 2023 – Ano base 2022. Salto-SP: Abracopel, 2023. DOI: 10.29327/5194308

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Instalações elétricas de baixa tensão. NBR 5410. 2004.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Confiabilidade e manutenibilidade. NBR 5462. 1994.

Araujo, B. Estudo de confiabilidade aplicado ao aumento da disponibilidade da instalação de um laboratório de uma indústria alimentícia. Monografia de graduação. (Fortaleza, 2021).

IEC 61557-8, international standard Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1000V_{a.c.} and 1500V_{d.c.} – Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures – Part 8: Insulation monitoring devices for IT systems

Livro: W. Hofheinz: Protective measures with insulation monitoring, 3rd Edition

BIZZO DE ALMEIDA, Aguinaldo. Critérios para avaliação de riscos elétricos – Desafios. Site: O Setor Elétrico:
<https://www.osetoreletrico.com.br/criterios-para-avaliacao-de-riscos-eletricos-desafios/>



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

Determinação do ATPV utilizando calorímetro baseado em sensor óptico

Fernanda C. Salvador Soares
Instituto de Energia e Ambiente da
USP
Escola Politécnica da USP
fcsalvad@iee.usp.br

Márcio Bottaro
Instituto de Energia e Ambiente da
USP
marcio@iee.usp.br

Josemir Coelho Santos
Escola Politécnica da USP
josemir@pea.usp.br

Paulo Futoshi Obsase
Instituto de Energia e Ambiente da
USP
obase@iee.usp.br

Rogério Massaro
Instituto de Energia e Ambiente da
USP
rogerio@iee.usp.br

RESUMO

A determinação da resistência ao arco elétrico de materiais ignífugos para fabricação de vestimentas de proteção individual é feita por meio da medição das energias incidentes e transmitidas, as quais são realizadas por calorimetria por meio de termopares acoplados a discos de cobre durante o evento do arco elétrico. No presente trabalho, foi realizada a montagem de um conjunto de calorimetria para tecidos, consistindo em um painel com dois sensores e dois sensores de monitoramento. Cada um dos quatro calorímetros foi montado com um fio termopar e um sensor óptico instalados, de modo que a elevação de temperatura foi monitorada simultaneamente pelos dois tipos de sensores. Após a aplicação de 22 arcos elétricos, com energias incidentes variando entre 3,0 cal/cm² e 11,7 cal/cm², determinou-se o ATPV (*Arc Thermal Performance Value*) de um tecido de características previamente conhecidas por histórico laboratorial. Os resultados obtidos revelam diferenças entre as medições feitas com os dois tipos de sensores na avaliação de probabilidade de queimaduras de segundo grau tendo como referência a curva padrão de *Stoll*. Como resultado, a resistência ao arco elétrico em termos de ATPV calculado para as medições feitas com o sensor óptico ficou cerca de 27% menor em relação ao valor calculado por meio das medições feitas com termopar, o que poderia alterar inclusive a categoria de risco do EPI sob ensaio. Estes resultados alertam para a importância de investigar a metodologia atualmente utilizada para determinação da resistência ao arco elétrico, de maneira a garantir a medição correta das energias incidentes e transmitidas. Ademais, a alteração na metodologia de medição pode ainda

impactar os estudos de energia incidente por meio de estimativas empíricas como as da IEEE 1584.

1.0 – INTRODUÇÃO

O acidente com arco elétrico é um evento que causa grande dissipação de energia térmica em forma de radiação, convecção e condução de calor. Ele é iniciado quando a isolação entre dois condutores é rompida devido ao envelhecimento, trilhamento, arborescência, e devido a erros humanos durante manutenções em equipamentos elétricos energizados [1, 2]. Como consequência, os trabalhadores do setor elétrico expostos a este risco, podem sofrer queimaduras passíveis de lesões muito graves e, em alguns casos, a morte. Desta forma, tais trabalhadores devem, além de outras medidas de proteção coletivas e administrativas, fazer o uso de equipamentos de proteção individual (EPIS) fabricados com tecidos naturais ou sintéticos com características especiais e associados a distintas tecnologias que lhes conferem propriedade ignífuga.

A caracterização do material com o qual o EPI é fabricado é feita por meio de um valor numérico atribuído ao produto, que descreve o seu desempenho quando exposto a um arco elétrico de ensaio, expresso em kJ/m², ou em cal/cm², denominado Resistência ao Arco Elétrico. A resistência ao arco elétrico pode ser declarada em unidades de ATPV (*Arc Thermal Performance Value*), EBT50 (*Breakopen Threshold Energy*) ou ainda ELIM (*Incident Energy Limit*).

De acordo com a IEC 61482-1-1 [3], o valor de desempenho térmico ao arco elétrico (ATPV) é o valor de energia incidente no qual o calor transferido através das amostras de material é suficiente para atingir o critério de *Stoll* com 50% de probabilidade,

1/7

Determinação do ATPV utilizando calorímetro baseado em sensor óptico

calculado por meio de análise de regressão logística aplicada aos dados obtidos durante o ensaio de um conjunto de pelo menos 20 amostras. Por sua vez, o valor de ATPV atribuído a uma vestimenta é qualquer valor igual ou menor que o do ATPV do material com que ela foi confeccionada.

A metodologia para a determinação deste parâmetro é descrita em normas internacionais como a IEC 61482-1-1 e estrangeiras, como a ASTM F1959 [4]. A Norma IEC, no método A, detalha o *setup* de medição de energias incidentes e transmitidas que é constituído por um barramento de alimentação elétrica, um controlador de arco elétrico, um sistema de aquisição de dados de temperatura, eletrodos de arco elétrico, três painéis com dois sensores internos e dois sensores de monitoramento para cada painel.

A medição da energia incidente é feita por meio de calorímetros instalados nos sensores de monitoramento, enquanto que a energia transmitida pelo material é feita por calorímetros instalados nos painéis. Tais calorímetros são feitos de discos de cobre de grau elétrico com 18 g de massa, 40 mm de diâmetro e 1,6 mm de espessura. Em cada um deles é instalado um termopar tipo K (NiCr – NiAl) ou tipo J (Fe – CuNi) inserido em um orifício na face traseira no centro do disco com profundidade de 1,3 mm. Assim, a elevação de temperatura em função do tempo é registrada durante e após a aplicação do arco elétrico e, utilizando-se as propriedades termofísicas conhecidas do cobre, determinam-se as energias incidentes e transmitidas.

Para a execução do ensaio, são aplicados pelo menos sete arcos elétricos entre os eletrodos, com corrente alternada de $8 \text{ kA} \pm 1 \text{ kA}$, com durações que variam de 0,05 a 1,5 segundos, para que se obtenha um número mínimo de amostras (20 amostras) a serem analisadas estatisticamente. No entanto, devido à elevada corrente, a aplicação dos arcos causa grande interferência eletromagnética no sinal de temperatura dos termopares utilizados nos calorímetros, gerando ruídos durante a aplicação do arco. Na prática, tais ruídos são minimizados por meio do uso de sistema de aquisição de canais isolados e depois são tratados com filtros matemáticos.

Em um estudo feito anteriormente [5] foi possível demonstrar que o uso de um calorímetro com sensor de temperatura a fibra óptica apresentou melhorias significativas na medição de energia incidente com relação à eliminação do ruído proveniente da interferência eletromagnética, além de eliminar a necessidade de filtros matemáticos. Ademais, foi relatada uma diferença no tempo de resposta do sensor a fibra óptica, o que poderia impactar na curva de energia transmitida e alterar a avaliação de probabilidade de queimadura de segundo grau.

Assim, o presente trabalho propõe o uso de calorímetros com sensores termopar e a fibra óptica instalados para comparação da medição do ATPV

de um tecido 100% algodão retardante à chama. Para isso, foi realizada a montagem de um conjunto de calorimetria para tecidos, consistindo em um painel com dois calorímetros para medição de energias transmitidas e dois calorímetros externos para monitorar as energias incidentes durante os ensaios, utilizando a estrutura do Laboratório de Ensaios de Vestimentas do Instituto de Energia e Ambiente da USP (LEVe IEE/USP).

2.0 – MATERIAIS E MÉTODOS

Foram construídos quatro calorímetros de acordo com os requisitos da IEC 61482-1-1 e em cada um deles foi adicionado um sensor de temperatura a fibra óptica, seguindo o método demonstrado anteriormente por Soares et al. [5]. Assim, cada calorímetro ficou montado com um sensor termopar e com um sensor de temperatura a fibra óptica, ambos na mesma profundidade em relação a superfície receptora de calor (0,3 mm), conforme apresenta a Figura 1.

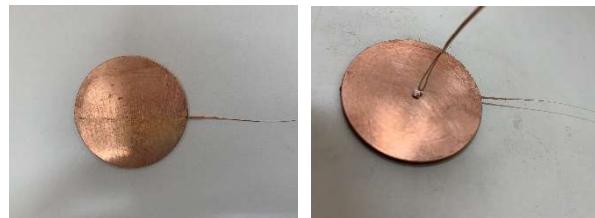


Figura 1 - Calorímetro para determinação do ATPV com sensor óptico acoplado: face frontal (direita) e face traseira (esquerda)

Os sensores a fibra óptica foram conectados a um interrogador óptico sm230 da fabricante Micron Optics, com taxa de amostragem de 500 S/s, e os termopares foram conectados a um módulo para entrada de termopares da fabricante National Instruments, modelo NI-9213, com taxa de amostragem de aproximadamente 100 S/s, ajustada por programação FPGA.

Para estabelecer a relação entre a temperatura e o comprimento de onda dos sensores ópticos, os calorímetros foram calibrados utilizando uma câmara térmica da fabricante Weiss, modelo LabEvent L C/150/40/5, juntamente com um termômetro digital para medição dos valores de referência de temperatura, composto por uma termorresistência padrão PT100 marca Fluke, modelo 5609, e um indicador digital marca Presys, modelo ST-501-1. A calibração foi feita nas temperaturas de 20 °C a 150 °C, em intervalos incrementais de 10 °C.

Dois calorímetros foram montados em sensores de monitoramento para medição de energia incidente e os outros dois foram montados em um painel para medição de energia transmitida. Os sensores e o painel foram confeccionados de Marinite® A e foram pintados com tinta preta com

Determinação do ATPV utilizando calorímetro baseado em sensor óptico

emissividade superior a 0,9. O conjunto foi alinhado na “posição A” dentro da gaiola de ensaios para vestimentas do LEVe IEE-USP a uma distância de 457 mm dos eletrodos e, posteriormente às medições de temperatura, as energias foram calculadas e corrigidas para a posição de 305 mm utilizando-se a regra do inverso do quadrado da distância estabelecida nas normas de referência. Os postos B e C da gaiola ficaram apenas com sensores de monitoramento instalados (Figura 2). Os calorímetros foram identificados como C1 e C2 para medição de energia transmitida e C3 e C4 para energia incidente, mostrados na Figura 3.



Figura 2 - Posicionamento do painel e dos sensores de monitoramento na posição A da gaiola de ensaios para vestimentas do LEVe IEE USP

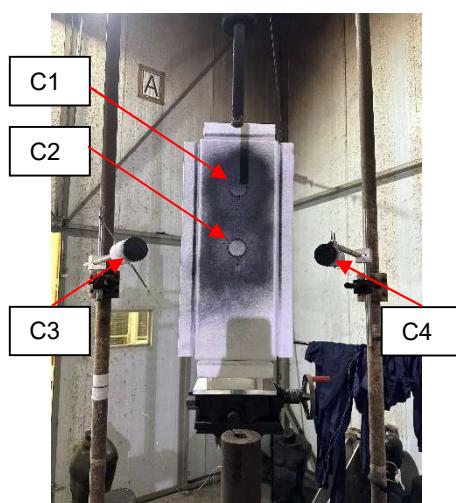


Figura 3 - Painel com calorímetros para medição de energia transmitida (C1 e C2) e sensores de monitoramento (C3 e C4)

Para a determinação das energias incidente e transmitida, foi feito o registro de temperatura durante e após a aplicação do arco elétrico e,

utilizando as equações da Norma IEC 61482-1-1, foram calculadas as energias transmitidas (média dos valores dos calorímetros C1 e C2) e incidentes (média dos valores de C3 e C4). Em seguida, a curva de energia transmitida foi comparada com a curva de probabilidade de queimaduras de segundo grau tendo como referência a curva padrão de *Stoll*, sendo registrado o valor “0” quando a curva de energia transmitida, a partir de 1 segundo até 30 segundos, não excedia a curva de *Stoll* e o valor “1” quando excedia neste mesmo intervalo de tempo.

A medição do ATPV foi feita em amostras de tamanho 700 mm X 350 mm de tecido de características previamente conhecidas por histórico laboratorial, retardante a chama, 100% algodão, com gramatura nominal de 290 g/m², na cor azul marinho.

De acordo com a Norma de referência, para avaliar uma amostra de material é necessária uma série mínima de ensaios capazes de produzir 20 exposições dos corpos de prova, variando-se as energias incidentes. No setup normalizado, levando-se em conta que existem três conjuntos de painel e sensores de monitoramento, esse número mínimo é obtido com a aplicação de sete arcos elétricos. No presente trabalho, porém, como todas as medições foram feitas por um único conjunto de painel e sensores de monitoramento, foi necessário aplicar 22 arcos elétricos, com energias incidentes variando entre 3,0 cal/cm² e 11,7 cal/cm² para atender aos critérios de ensaio estabelecidos na IEC 61482-1-1. Os arcos elétricos foram produzidos com corrente alternada de 8 kA com duração entre 0,08 s a 0,32 s, ou seja, 5 a 19 ciclos de rede.

Com os resultados da avaliação da probabilidade de queimadura de segundo grau de cada um dos 22 arcos elétricos, foi utilizada a análise de regressão logística por meio de um suplemento do Microsoft Excel® que estende os recursos estatísticos padrão do Excel, denominado *Real Statistics Resource Pack* [6]. Então, os resultados do ATPV medidos com o calorímetro a fibra óptica puderam ser comparados com o calorímetro com sensor termopar normalizado.

3.0 – RESULTADOS

Os resultados da calibração dos sensores de temperatura a fibra óptica, ou seja, a relação de resposta em comprimento de onda central (CWL, em nm) foram obtidos por meio de ajuste polinomial de segunda ordem no programa Origin®, com os coeficientes de ajuste mostrados na Tabela 1.

Assim os valores medidos em comprimento de onda puderem ser convertidos em valores de temperatura e então comparados com as medições registradas pelos termopares dos calorímetros C1, C2, C3 e C4 para cada um dos 22 arcos elétricos aplicados.

Determinação do ATPV utilizando calorímetro baseado em sensor óptico

Tabela 1 - Coeficientes dos ajustes polinomiais para

calibração dos sensores a fibra óptica

$$T = A + (B1 * (CWL - CWL_n)) + (B2 * ((CWL - CWL_n)^2))$$

Parâmetro	C1	C2	C3	C4
A	-5,70775	16,27966	26,73297	92,15766
B1	40,11772	38,09871	34,0857	33,93258
B2	-1,24238	-0,98746	-0,80449	-0,72326
CWLn	1541	1540	1560	1560

A Figura 4 apresenta os sinais de temperatura registrados pelos sensores de monitoramento, média dos calorímetros C1 e C2, na aplicação do arco 1 (10 ciclos de rede). É possível verificar que a temperatura máxima medida pelo sensor a fibra óptica é cerca de 1,2 °C maior que a registrada pelo termopar. Ao ampliar a região do início da aplicação do arco elétrico, Ampliação A na Figura 4, é possível observar que a taxa de elevação da temperatura é mais rápida no sensor a fibra óptica em relação à do termopar.

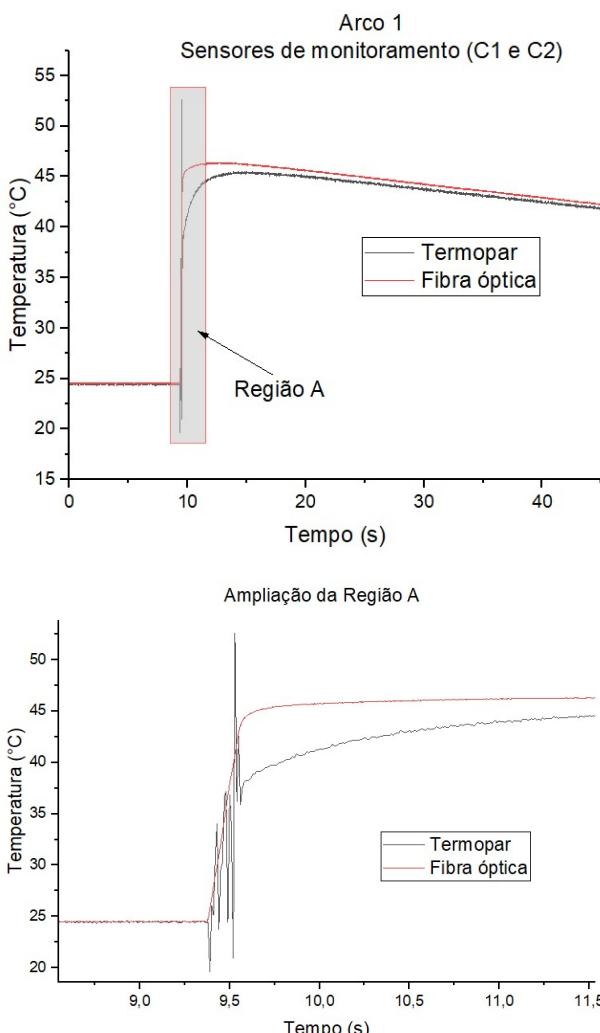


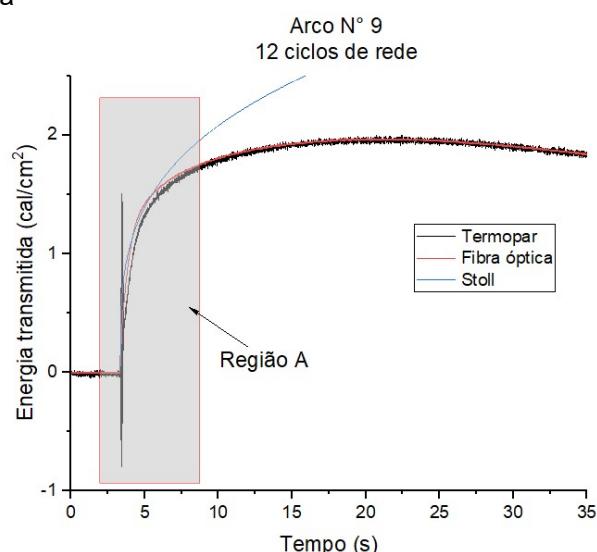
Figura 4 – Medição de temperatura dos sensores de monitoramento (calorímetros C1 e C2) com sensores termopar e à fibra óptica no arco n° 1

Além disso, o sinal registrado pelo sensor termopar carrega um ruído eletromagnético que não é observado no sensor a fibra óptica. Na primeira edição da Norma IEC 61482-1-1, a determinação da temperatura inicial (T_0) era baseada no início da elevação do sinal de temperatura e o ruído apresentado pelo termopar era um problema tratado por meio do uso de filtros digitais. Já na segunda edição da Norma, embora a determinação de T_0 seja feita pelo instante do início da aplicação da corrente, recomenda-se o uso de filtros digitais para remoção o ruído, sendo que estes devem preservar a forma de onda e não devem introduzir uma defasagem no tempo. Assim, o uso de sensores de temperatura livres de interferência eletromagnética poderia eliminar a necessidade de aquisição sincronizada dos sinais de temperatura e corrente de arco elétrico e também a necessidade de filtros digitais.

A partir dos dados de temperatura foram calculadas as energias incidentes e transmitidas. A Tabela 2 mostra o número de ciclos utilizados em cada um dos 22 arcos elétricos e as energias incidentes calculadas a partir dos registros de temperatura.

Durante a aquisição dos dados do arco N° 6, a fibra óptica do calorímetro C4 foi atingida por material expelido pelo arco elétrico e rompeu. Assim, os valores de energia incidente do sensor a fibra óptica dos arcos 6 ao 22 são referentes somente aos valores de temperatura registrados pelo calorímetro C3.

A Tabela 2 também apresenta o resultado da comparação da energia transmitida de cada arco elétrico com a curva de *Stoll* (coluna Critério *Stoll*), onde é possível observar que nos arcos n° 1, 3, 7, 9 e 13 houve diferenças na avaliação de probabilidade de queimaduras de segundo grau. Como exemplo, a



Determinação do ATPV utilizando calorímetro baseado em sensor óptico

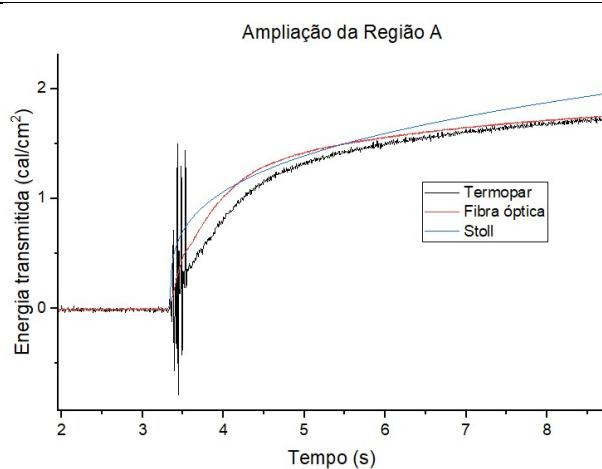


Figura 5 mostra as curvas de energias transmitidas pelo tecido sob avaliação medidas pelos sensores termopar e a fibra óptica e a curva padrão de *Stoll* na aplicação do arco n° 9. É possível observar que a curva de energia transmitida medida com o sensor a fibra óptica excedeu a curva de *Stoll*, o que não ocorreu com a curva registrada com o sensor termopar. Esta diferença é devida ao tempo de resposta da fibra óptica ser melhor que o do termopar.

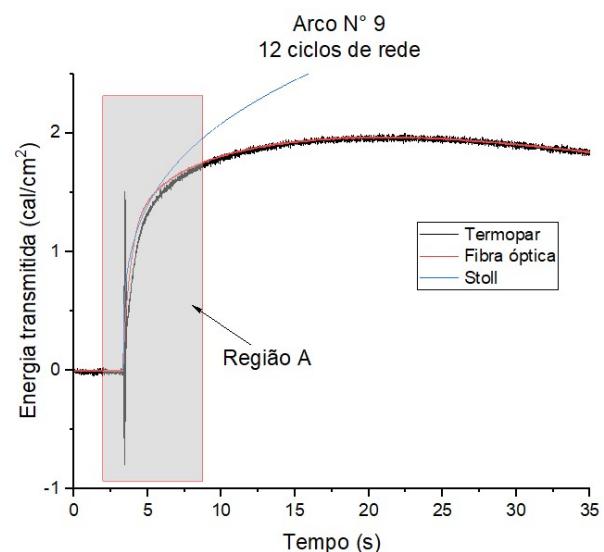
Como resultado, a resistência ao arco elétrico em termos de ATPV calculado para as medições feitas com o sensor termopar foi de 8,1 cal/cm², enquanto que com o sensor a fibra óptica foi de 5,9 cal/cm², ou seja, cerca de 27% menor, conforme mostrado na Figura 6. Esta diferença no resultado de ATPV excede as estimativas de incerteza apresentadas na literatura para esse processo, cerca de 10 % nessa faixa de energia [7], e poderia alterar a categoria de risco 3 para risco 2 do material sob ensaio.

Por fim, para fins de comparação, determinou-se também o fator de atenuação de calor (HAF) do material sob avaliação para os dois tipos de sensores, embora a segunda edição da Norma IEC 61482-1-1 não mencione mais a necessidade deste cálculo. Este fator representa o percentual de energia incidente que é bloqueado por um material em um nível de energia incidente igual ao ATPV e a sua medição era um requisito da primeira edição da Norma IEC 61482-1-1 [8]. O valor médio de HAF para sensor termopar foi de 71,5% e para o sensor a fibra óptica foi de 68,5%. Os resultados do HAF em função das energias incidentes estão mostrados na Figura 7 e na Figura 8, onde também estão mostrados os intervalos de confiança de 95% (linhas vermelhas).

Tabela 2 - Energias incidentes medidas com sensor termopar e com sensor a fibra óptica e a avaliação de probabilidade de queimadura de segundo grau

Arco	Nº de Ciclos	Sensor termopar	Sensor a fibra óptica
------	--------------	-----------------	-----------------------

		Ei (cal/cm ²)	Critério Stoll	Ei (cal/cm ²)	Critério Stoll
1	10	6,27	0	6,50	1
2	11	7,42	1	7,98	1
3	9	6,38	0	6,79	1
4	8	6,41	0	6,67	0
5	8,5	5,03	0	5,25	0
6	9,5	6,85	0	6,11	0
7	10,5	6,19	0	4,89	1
8	11,5	7,23	0	6,78	0
9	12	6,71	0	6,14	1
10	13	8,68	1	7,67	1
11	14	8,61	1	5,30	1
12	11	7,11	1	6,45	1
13	10,5	7,23	0	5,71	1
14	12	6,89	0	5,03	0
15	13	10,06	0	8,15	0
16	16	10,52	1	10,27	1
17	17	10,75	1	10,18	1
18	17	9,78	1	9,32	1
19	19	11,67	1	11,89	1
20	5	3,16	0	2,59	0
21	5	3,15	0	2,41	0
22	5	3,07	0	3,30	0



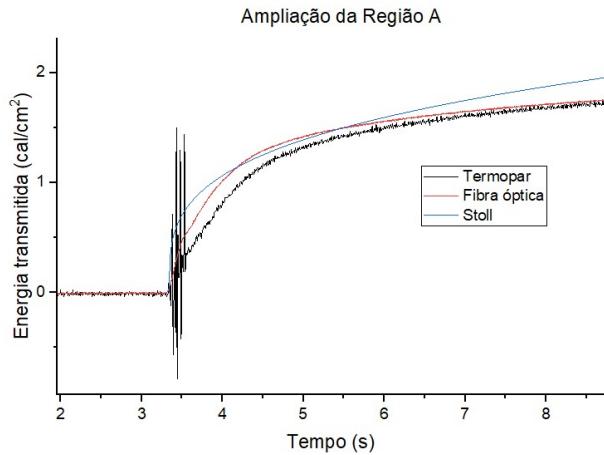


Figura 5 – Energias transmitidas pelo tecido sob avaliação após a aplicação do arco n° 9 medidas pelo termopar e sensor a fibra óptica e a comparação com a curva padrão de Stoll

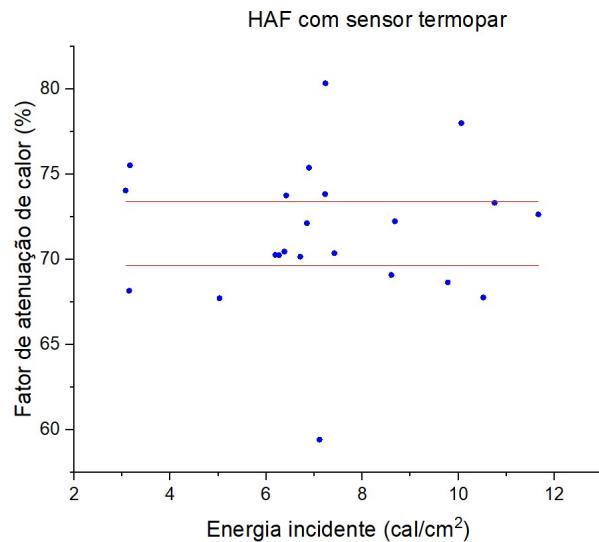


Figura 7 - Fatores de atenuação de calor (HAF) e limites de confiança obtidos por meio de medições com sensor termopar

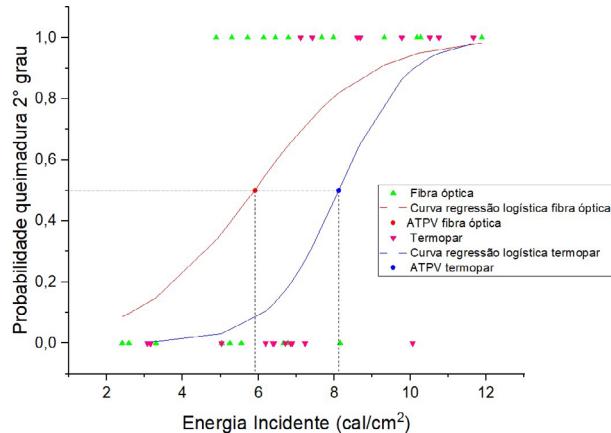


Figura 6 - Curva de regressão logística com base na avaliação de probabilidade de queimadura de segundo grau de medições com sensor termopar e com sensor a fibra óptica

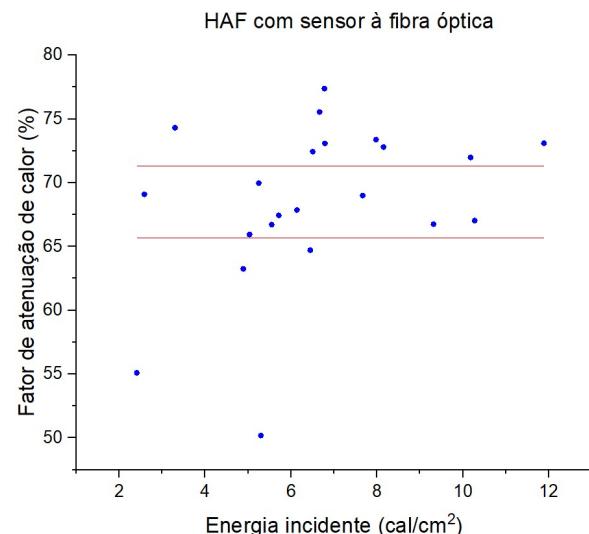


Figura 8 - Fatores de atenuação de calor (HAF) e limites de confiança obtidos por meio de medições com sensor a fibra óptica

6.0 – CONCLUSÕES

Os resultados obtidos da curva de elevação de temperatura confirmaram resultados previamente publicados para medições de energia incidente com sensor a fibra óptica, ou seja, ele possui capacidade de detecção de uma transição de temperatura mais rápida e livre de ruídos causados por interferência eletromagnética, quando comparada com a medição feita com o termopar.

Observou-se também que a comparação da elevação de temperatura média transmitida pelos tecidos para os calorímetros internos revela diferenças na avaliação de probabilidade de

queimaduras de segundo grau tendo como referência a curva padrão de *Stoll*, em uma mesma energia incidente de um mesmo arco elétrico. Como resultado, a resistência ao arco elétrico em termos de ATPV calculado para as medições feitas com o sensor óptico ficou cerca de 27% menor em relação ao valor calculado por meio das medições feitas com termopar, o que poderia alterar inclusive a categoria de risco do material sob ensaio e posteriormente a classificação da vestimenta de proteção que o trabalhador está utilizando.

Nas próximas etapas, serão feitos sensores de monitoramento mais robustos, de modo que a fibra óptica não fique diretamente exposta ao arco elétrico e seja diminuído o risco de danos durante o ensaio. Além disso, serão feitas novas baterias de ensaios com outros tipos de composições de tecido, possibilitando avaliar o comportamento do sensor proposto com diferentes materiais.

O presente trabalho demonstrou a importância de investigar a metodologia atualmente utilizada para determinação da resistência ao arco elétrico, de maneira a garantir a medição correta das energias incidentes e transmitidas e, consequentemente, a segurança do trabalhador que faz uso dos equipamentos de proteção individual. Melhorias nessas medições podem ainda impactar os estudos de energia incidente por meio de estimativas empíricas, como os da IEEE 1584.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Std 1584-2018 (Revision of IEEE Std 1584-2002): *IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*. IEEE, 2018. Open WorldCat, <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8563137>.
- [2] DAS, J. C. *Arc flash hazard analysis and mitigation*. Second edition, Wiley-IEEE Press, 2021.
- [3] IEC 61482-1-1. *Live working – Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc – Part 1-1: Test methods – Method 1: Determination of the arc rating (ELIM, ATPV and/or EBT50) of clothing materials and of protective clothing using an open arc*. Edition 2.0. 2019.
- [4] ASTM 1959. *Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing*. ASTM F 1959/F 1959M – 06a.
- [5] SOARES, Fernanda C. Salvador; BOTTARO, Márcio; SANTOS, Josemir Coelho. Desenvolvimento de calorímetro baseado em sensor óptico para determinação do ATPV. In: *VIII IEEE ESW-Brasil 2019*. Anais. Salto, 7 p.
- [6] ZAIONTZ, Charles. *Real Statistics Using Excel*. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.real-statistics.com/>. Acesso em: 6 mar. 2023.

- [7] BOTTARO, M., EICHINGER H. Uncertainties in the heat energy calculation process and influences on determination of arc thermal performance value (ATPV) of heat- and flame-resistant materials tests. *Measurement*, Volume 123, July 2018, pp. 275-284.
- [8] IEC 61482-1-1. *Live working – Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc – Part 1-1: Test methods – Method 1: Determination of the arc rating (ATPV or EBT50) of flame resistant materials for clothing*. Edition 1.0. 2009.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

Proteção de Terra em Sistemas Elétricos Industriais - Estudo de Caso

Filipe Barcelos Resende
VALE SA
filipe.resende@vale.com

Gabriel Figueiredo
SM&A
gabriel.figueiredo@sma-eng.com.br

Helberth Gonçalves
VALE SA
helberth.goncalves@vale.com

RESUMO

Sabe-se que o correto ajuste da proteção de terra de um circuito é fundamental para garantir a segurança das pessoas e equipamentos. Os níveis de curto-círcuito monofásico de um sistema elétrico irão definir os valores de tensão de passo e toque para a instalação [1], sendo que, deve-se eliminar as faltas o mais rapidamente possível. Este trabalho apresenta um estudo de caso em 13,8 kV de um sistema elétrico industrial de uma unidade mineradora. O caso envolve uma falta à terra associada a dois circuitos de 13,8 kV distintos. A avaliação inicial do evento levou a um diagnóstico impreciso, que, caso fosse seguido, levaria a medidas desnecessárias, como troca de equipamentos (TCs, resistores de aterramento, relés de proteção) e revisão dos ajustes de proteção. Após uma segunda avaliação, que incluiu a análise de quatro oscilografias de diferentes relés, foi possível diagnosticar corretamente a falha e entender o comportamento da proteção ao longo do evento.

1.0 – INTRODUÇÃO

Sabe-se que em um sistema industrial as faltas à terra são os tipos de curto-círcuito mais frequentes [2]. O curto-círcuito monofásico tem uma maior relevância no que se refere à proteção das pessoas. Os valores de tensão de passo e toque dependem diretamente da magnitude dessas correntes [1]. Dessa forma, a redução dos níveis das correntes de falta à terra, bem como a rápida eliminação do curto-círcuito, deve ser uma premissa para os estudos de proteção. Não deve ser, contudo, desconsiderada a seletividade do sistema elétrico.

Em um ambiente industrial, os eventos que envolvem um curto-círcuito são seguidos por uma análise dessa ocorrência. Esta análise envolve normalmente um time de profissionais com

experiência na área de proteção, produzindo ao seu final um plano de ação. Dessa forma, é fundamental que a análise do evento seja bem realizada, de maneira que o plano de ação gerado após o evento, seja assertivo. Não é raro que um plano de ação, oriundo de uma ocorrência envolvendo um curto-círcito, inclua iniciativas para alteração de ajustes de proteção e substituição de equipamentos. Essas iniciativas são ainda mais comuns quando se constata que um dispositivo de proteção não atuou como deveria ou que algum equipamento falhou. Uma análise inadequada pode gerar ações desnecessárias, como alterar ajustes de proteção e substituir equipamentos. Vale destacar que ações de alteração de ajustes, especialmente ajustes de proteção de terra, podem elevar os níveis de tensão de passo e toque de uma instalação, além de eventualmente violar a suportabilidade dos equipamentos elétricos.

2.0 – PROTEÇÃO DE TERRA

Duas formas comuns de se realizar a proteção de terra são: conexão ground sensor e conexão residual [3]. A conexão ground sensor consiste em um TC toroidal onde passam internamente as três fases do circuito. Essa configuração produz um fluxo magnético no interior do núcleo. Para um sistema equilibrado este fluxo será próximo de zero. Em caso de curto-círcito monofásico, um fluxo resultante promoverá uma corrente secundária no TC que acionará o relé de proteção. A segunda forma de proteção à terra pode ser feita através do somatório das correntes das fases, formando uma corrente residual (corrente de sequência zero). De forma similar ao somatório dos fluxos na conexão ground sensor, a corrente residual será nula se não houver nenhum tipo de fuga à terra e diferente de zero caso ocorra alguma corrente de fuga [3]. A figura 1 mostra os dois esquemas de ligação. O sistema elétrico

Proteção de Terra em Sistemas Elétricos Industriais - Estudo de Caso

avaliado nesse estudo de caso possui as duas formas de proteção de terra.

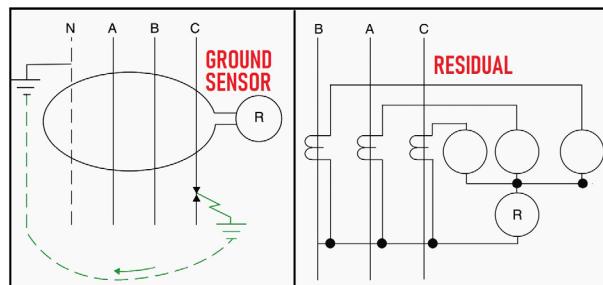


Figura 1 – Formas de proteção de terra

3.0 – EVOLUÇÃO DO CURTO-CIRCUITO

Os curtos-circuitos ocorrem pela falha de isolamento entre uma fase e a terra ou entre as fases. Normalmente, as faltas envolvendo duas ou três fases ocorrem pela evolução de um curto-círcito monofásico [2].

Para sistemas que possuem resistor de aterramento no neutro do transformador, a corrente de falta à terra fica limitada pelo valor do próprio resistor, reduzindo bastante a magnitude do curto-círcuito [4]. Para sistemas industriais de média tensão, a corrente do resistor varia de poucas dezenas de amperes a algumas centenas de amperes [2], [4]. Dessa forma, um curto-círcito que se inicie monofásico e evolua posteriormente para uma falta bifásica ou trifásica apresentará uma variação significativa da magnitude da corrente no instante em que a falta envolver a segunda fase [2]. Esse comportamento pode ser observado em registros oscilográficos gerados pelos relés de proteção microprocessados. A figura 2 mostra uma oscilografia onde um curto monofásico, limitado por um resistor de aterramento de 300 A, evoluiu para bifásico cerca de 100 ms após o início da falta. Nota-se a variação da corrente de falta, alcançando valores superiores a 2 kA de pico após a evolução da falta.

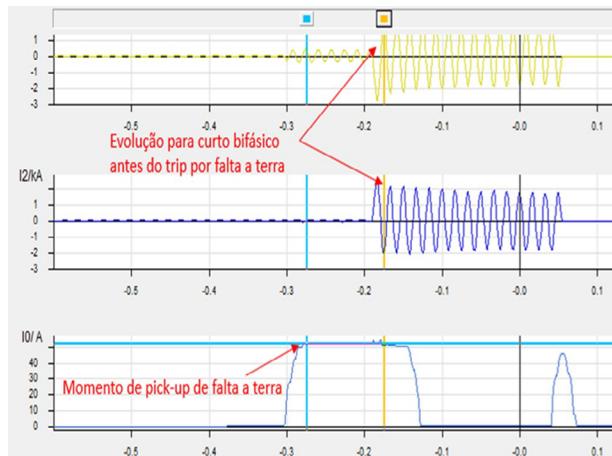


Figura 2 – Evolução da corrente de falta

Outra informação relevante na figura 2 é o valor da corrente de sequência zero (último gráfico da figura). A corrente de sequência zero praticamente se anula após a falta se tornar bifásica, levando inclusive o elemento de proteção de terra do relé "sair" do pick-up, atrasando a eliminação da falta. Esta percepção é bastante importante durante uma análise, especialmente para não levar a um diagnóstico, incorreto, de falha do relé de proteção.

4.0 – ESTUDO DE CASO

Para entender o comportamento da proteção de terra quando se tem uma falta envolvendo mais de um circuito, será analisada uma ocorrência envolvendo dois alimentadores de 13,8 kV. O sistema em análise é composto por uma subestação principal que recebe energia da concessionária em 138 kV. A subestação possui dois transformadores de 40 MVA que rebaixam a tensão para 13,8 kV. Cada transformador alimenta um conjunto de manobras de média tensão. O conjunto A possui sete cubículos e o conjunto B possui 13 cubículos. Os dois transformadores possuem esquema de ligação delta-estrela, com o neutro aterrado através de um resistor de 400 A. A figura 3 apresenta um diagrama unifilar simplificado da subestação indicando apenas o transformador envolvido na análise. Os dois circuitos relativos ao evento estão indicados na figura 3 por Alim. 1 e Alim. 2. Os demais circuitos da barra estão indicados de forma simplificada como Demais Cargas. Estão indicados também os relés de proteção envolvidos no evento, sendo a proteção de terra dos alimentadores e do neutro do transformador realizada através de TCs ground sensor e a proteção geral da barra pelo esquema residual.

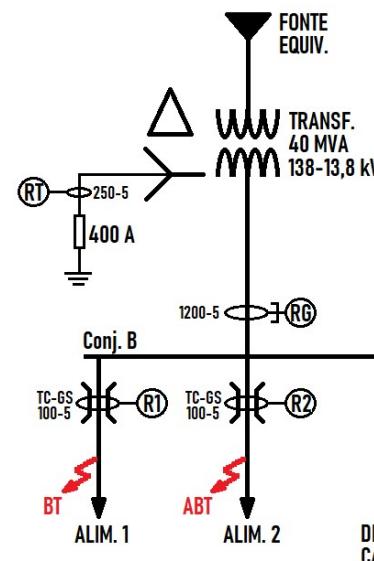


Figura 3 - Diagrama Unifilar simplificado

2/6

Proteção de Terra em Sistemas Elétricos Industriais - Estudo de Caso

4.1 – FALTA NO ALIMENTADOR 1

O Alimentador 1 é um circuito com cabo isolado de 70 mm² de aproximadamente 50 m de comprimento. Este circuito é responsável por fornecer energia para uma subestação secundária que compõe o processo de beneficiamento de uma usina de tratamento de minério. Durante a operação normal do sistema ocorreu uma falta à terra, apresentada pela oscilografia da figura 4. Nota-se que a corrente de falta (IN) chegou a 370A (gráfico em vermelho), conforme esperado para um sistema com resistor de aterramento do neutro de 400 A. A figura 4 mostra que o relé entrou em pick-up pelo primeiro elemento de terra (50N1P) no instante 7:56:26.723 e pelo segundo elemento de terra (50N2P) cerca de 12,5 ms depois.

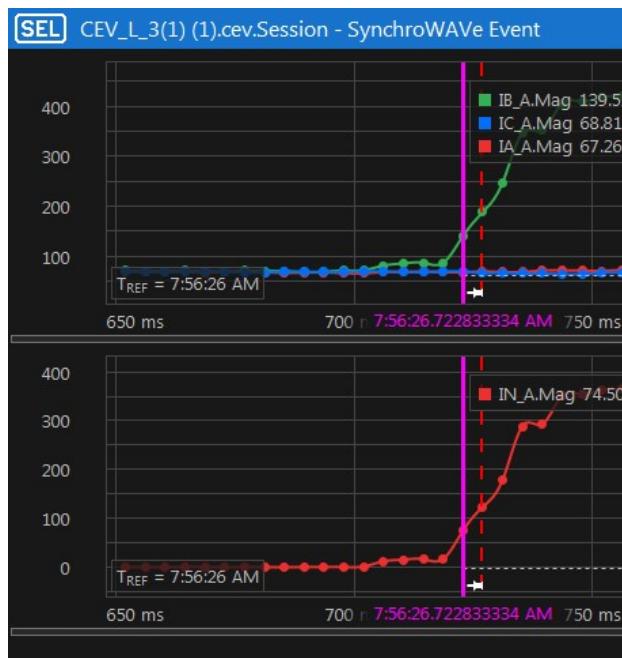


Figura 4 – Oscilografia (pick-up) da falta fase-terra no alimentador 1

A figura 5 é uma oscilografia extraída do mesmo relé de proteção (Alimentador 1). Percebe-se que cerca de 280 ms depois de entrar em pick-up o relé dá trip pelo elemento 2 da proteção de terra (50N2T) e a corrente zera cerca de 75 ms depois. Apesar da atuação da proteção e eliminação do defeito, o valor da corrente de falta apresentado pela oscilografia da figura 5 é um valor estranho, uma vez que atinge valores próximos de 3000 A. Uma corrente dessa magnitude não guarda coerência com um resistor de aterramento do neutro de 400 A, podendo indicar que o resistor foi de alguma maneira curto-circuitado durante a falta.

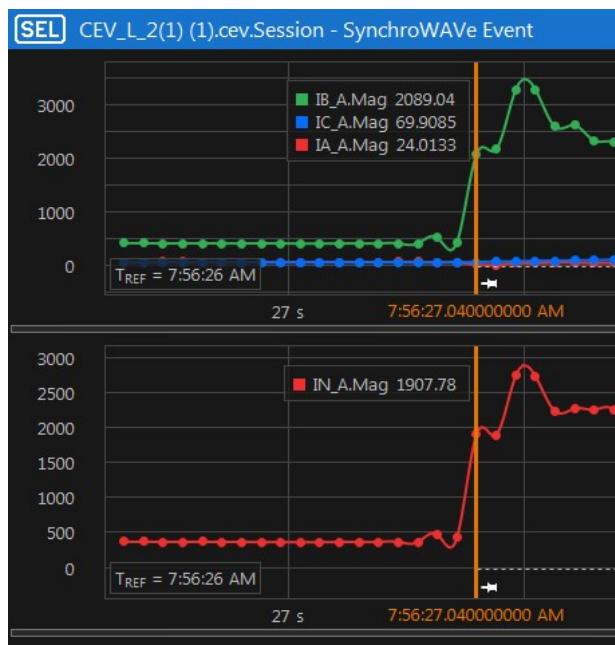


Figura 5 – Oscilografia (trip) da falta fase-terra no alimentador 1

4.2 – FALTA NO ALIMENTADOR 2

O Alimentador 2 é uma rede aérea convencional com cabo CAA 336,4 MCM e múltiplas derivações. O circuito possui aproximadamente 7,5 km de extensão (somando tronco e derivações). Este circuito é responsável por fornecer energia para uma britagem primária e três usinas de pequeno porte mais próximas a área de lavra.

O desligamento do alimentador 1 foi acompanhado do desligamento de cargas mantidas pelo alimentador 2, conforme relato dos operadores. Após constatar a atuação do relé de proteção do alimentador 1, observou-se que o relé do alimentador 2 sensibilizou para o pick-up das funções 50N1 e 50N2. A figura 6 mostra a oscilografia correspondente ao defeito no alimentador 2. Trata-se de uma falta monofásica que evolui para uma falta bifásica. A oscilografia indica que o relé entrou em pick-up às 7:40:35.046. Contudo, os relógios internos dos relés (Alim. 1 e Alim. 2) não estavam sincronizados. Após calcular manualmente a diferença de tempo, certificou-se que os eventos realmente ocorreram de forma simultânea. Observa-se pela oscilografia da figura 6 que o relé envolvido no evento sensibiliza para o pick-up de 50N, mas não evolui para o disparo de trip. Isto aconteceu, pois um relé instalado na entrada de uma subestação a jusante deste alimentador sensibilizou para esta falta, com uma temporização inferior a programada no relé do alimentador, eliminando o trecho defeituoso deste circuito.

Proteção de Terra em Sistemas Elétricos Industriais - Estudo de Caso

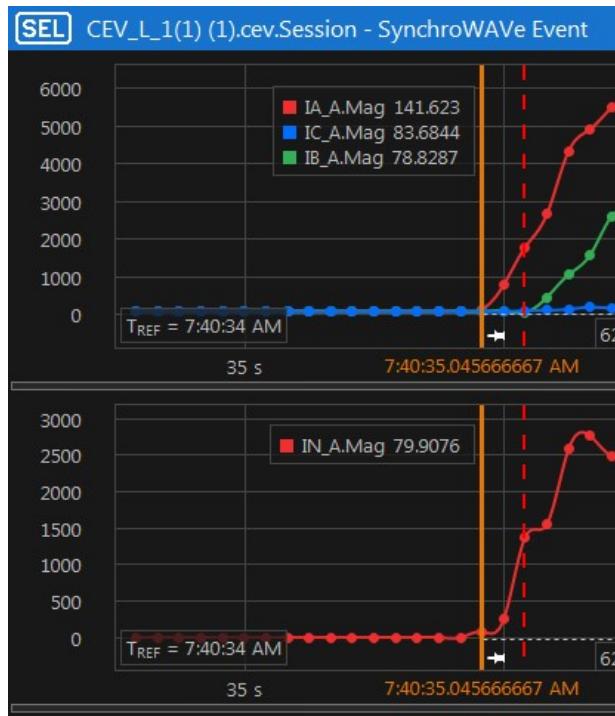


Figura 6 – Oscilografia (pick-up) da falta fase-terra no alimentador 2

O ponto que chama a atenção na figura 6 é também a magnitude da corrente de falta (IN), que alcança quase 3000 A, de maneira similar ao que ocorreu no evento do Alimentador 1. Destaca-se que o resistor de aterramento do neutro limitaria essa corrente em 400 A. Uma corrente de falta à terra de 3000 A seria mais um indício que o resistor de aterramento teria sido curto-circuitado durante o defeito.

4.3 – ANÁLISE COMPLEMENTAR

Após os eventos descritos nos itens 4.1 e 4.2, foi feita uma inspeção no resistor de aterramento do transformador e não foi encontrada nenhuma avaria no equipamento. Foi feita também a medição da resistência ôhmica e o valor encontrado foi de 20,1 Ω, ficando muito próximo do valor de placa (19,9 Ω). A figura 7 mostra os elementos resistivos do equipamento e uma foto da medição da resistência.

Para complementar a análise, buscou-se outros registros que pudessem contribuir para o estudo. Assim, observou que os relés RT e RG (conforme figura 3) haviam também registrado oscilografias. Esses registros contribuíram bastante para esclarecer o evento e são apresentados nas figuras 8 e 9.



Figura 7 – Resistor de aterramento do neutro (400 A)

A figura 8 apresenta a oscilografia do relé do neutro do transformador (RT conforme figura 3). Pode-se observar que o valor da corrente não ultrapassa os 400 A, ficando próximo de 177 A e caindo para próximo de 110 A após a elevação das correntes de fase. Ressalta-se que o relé RT na realidade é um relé diferencial que faz a proteção do transformador e recebe também o sinal de corrente do TC ground sensor do neutro. Dessa forma, é possível plotar na oscilografia (figura 8) a corrente de neutro e também as correntes de fase.

A figura 9 apresenta a oscilografia do relé que faz a proteção geral da barra de 13,8 kV (RG conforme figura 3). Vê-se que o comportamento é similar ao da figura 8, indicando uma corrente IN que decai quando as correntes de fase se elevam.

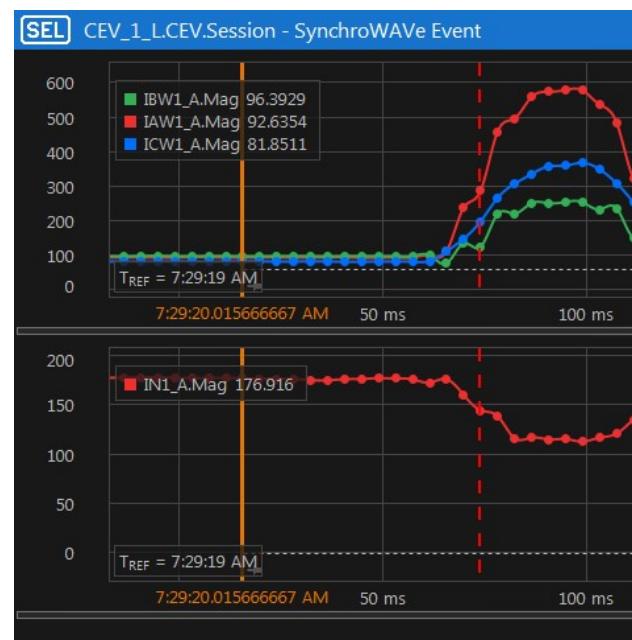


Figura 8 – Oscilografia do relé (RT) de neutro do transformador

Proteção de Terra em Sistemas Elétricos Industriais - Estudo de Caso

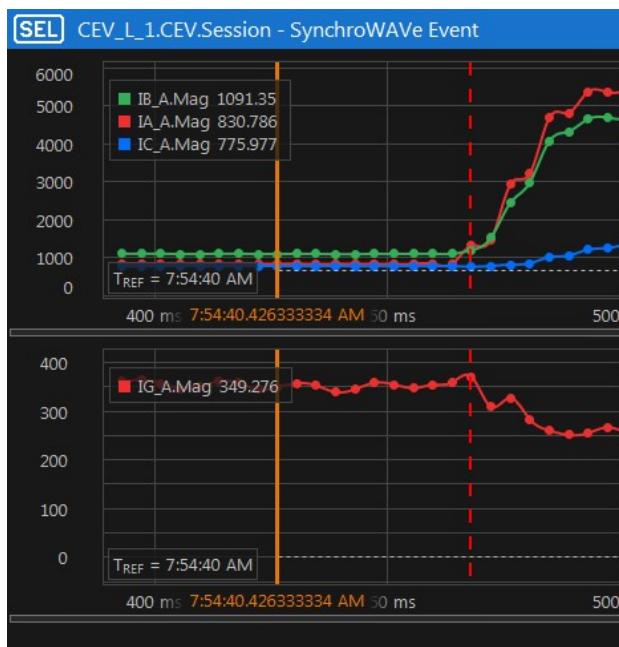


Figura 9 – Oscilografia do relé (RG) de entrada da barra de 13,8 kV

A análise das figuras 8 e 9 mostram que a corrente de neutro não chegou aos valores medidos pelos relés dos alimentadores. Unindo as informações das quatro oscilografias, observa-se que tratou-se na realidade de uma falta fase-fase envolvendo mais de um circuito. A falta fase-terra (BT) no alimentador 1 evoluiu para uma falta fase-fase-terra (ABT), contudo o curto-círcuito ocorreu com a fase A do alimentador 2, impedindo que o TC ground sensor medisse a corrente de neutro corretamente. Tem-se portanto uma falta fase-fase-terra, sendo a fase A do alimentador 1 e a fase B do alimentador 2. Posteriormente a falta também tornou-se ABT no alimentador 2, mas manteve-se somente na fase B para o alimentador 1. A corrente de neutro real do circuito se dá pela diferença entre a corrente IN medida em cada um dos alimentadores.

A diferença das correntes de neutro entre as oscilografias das figuras 8 e 9 também foi investigada. A figura 8 mostra uma corrente de 177 A medida pelo relé RT (conexão ground sensor) e a figura 9 mostra uma corrente de 349 A pelo relé RG (conexão residual). Apesar da conexão ground sensor apresentar maior precisão em relação à conexão residual, não era esperado uma diferença tão elevada, haja vista que uma medição (177 A) é praticamente metade da outra (349 A). Após uma verificação em campo e posterior consulta ao fabricante, constatou-se que a relação de transformação do TC de neutro (inserida no relé de proteção), indicado na figura como 250-5, estava incorreta. A relação de transformação real está entre 100-5 e 200-5, sendo necessário ensaiar o equipamento para confirmação. Esse ensaio não foi realizado até a data da elaboração desse

trabalho. Dessa forma, pode-se justificar a diferença entre os valores de corrente medidos pelos relés RG e RT.

No que se refere a variação da corrente IN em cada relé, de 177 A para 110 A e 349 A para 250 A, deve-se considerar que a redução da corrente de neutro quando uma falta evolui para bifásica é comum, uma vez que o caminho preferencial da corrente passa a ser a segunda fase envolvida no curto-círcuito. Esse comportamento pode ser visualizado também na figura 2.

6.0 – CONCLUSÃO

O estudo de caso descrito neste artigo, buscou destacar a importância de uma análise assertiva e sistêmica no momento de ocorrências de curto-círcuito para terra na média tensão de instalações elétricas industriais, principalmente quando temos vários alimentadores supridos por uma mesma fonte.

Ficou clara a necessidade de se ter o máximo de insumos possíveis (registros de oscilografias e eventos de todos os relés envolvidos na ocorrência) para que se chegue a um diagnóstico adequado do ocorrido e para que não sejam disparadas ações desnecessárias (como, por exemplo, substituição de equipamentos e alteração de ajustes de proteção).

Este artigo também buscou destacar a grande importância de equipamentos envolvidos na proteção de terra em sistemas elétricos industriais. Em especial, destaca-se o resistor de aterramento que permite uma redução considerável da magnitude da corrente durante ocorrência de faltas fase-terra, contribuindo assim para que se tenha valores aceitáveis de tensão de passo e toque na instalação.

No caso tratado neste artigo, uma análise mais imediatista poderia direcionar para uma ação errônea de substituição do resistor de aterramento, já que a corrente de falta fase-terra nos alimentadores envolvidos superou em muito o valor de limitação de corrente do resistor. Ao fazer uma análise mais detalhada e sistemática do evento em questão, observou-se que esta elevada magnitude de corrente se deu pela interação entre as correntes de falta dos dois alimentadores envolvidos na ocorrência.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Std 80-2013 - Guide for Safety in AC Substation Grounding.
 - [2] *Industrial Power System Grounding Design Handbook*. John R. Dunki-Jacobs, Francis J.

Proteção de Terra em Sistemas Elétricos Industriais - Estudo de Caso

Shields, Conrad St. Pierre. Impresso por Thomson-Shore, 2007.

[3] IEEE Std 242-2001 Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems

[4] IEEE Std 3003.1-2019 - Recommended Practice for System Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

LINHAS DE VIDA E A PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

H.E. Sueta - L.E. Caires - R. Zilles
Instituto de Energia e Ambiente
sueta@iee.usp.br
luis@iee.usp.br
zilles@iee.usp.br

Jobson Modena
Guismo Eng.
Jobson.modena@gmail.com

J. Barbosa de Oliveira
Sentinell Eng.
barbosa@sentinell.com.br

RESUMO

A instalação de linhas de vida é essencial para trabalho em altura. Essas linhas de vida são instaladas em geral nas coberturas das estruturas e servem para que o trabalhador prenda o seu EPI (cinto de segurança, talabarte) durante o trabalho em altura, de forma que, se ocorrer uma queda, a linha de vida em conjunto com os EPIs, evite ou atenua um acidente com o trabalhador.

Como ficam expostas, as linhas de vida podem ser atingidas pelas descargas atmosféricas. Neste caso, será que elas continuam a manter as características de uma linha de vida?

Este trabalho apresenta um estudo experimental onde são simuladas componentes da descarga atmosférica (no caso, componentes de corrente de continuidade que apresentam maiores efeitos térmicos) em amostras de linhas de vida e são verificadas as características mecânicas e visuais após as simulações laboratoriais.

Foram ensaiados dois tipos de amostras de linhas de vida: cabos de aço de seção 5/16", 6 x 19, sendo 4 amostras com alma de aço e 4 amostras com alma de fibra.

Uma de cada tipo de amostra foi considerada amostra cobaia e não foram submetidas às simulações da corrente de continuidade. Em todas as amostras foram feitas medições de resistência elétrica e cada tipo de amostra foram submetidas a pulsos de corrente contínua com 150 C +/- 20% (Coulombs); 225 C +/- 20% e 300 C +/- 20%, uma aplicação em cada amostra.

Após esses ensaios, as amostras foram inspecionadas visualmente e foram repetidas as medições da resistência elétrica de cada amostra. Foram realizados ensaios mecânicos (estático de tração e ensaios dinâmicos). No ensaio estático de

tração, por falha dos equipamentos de ensaio, a amostra cobaia com alma de fibra rompeu.

Nos ensaios dinâmicos, onde as amostras foram submetidas a uma massa de 100 kg presa em um dos lados da amostra, elevada a um metro do ponto de estabilização e solta instantaneamente, as amostras com alma de aço (cbaia e a submetida a 150 C) suportaram o ensaio. A amostra cobaia com alma de fibra não foi submetida ao ensaio dinâmico pois foi rompida durante o ensaio estático. As demais amostras romperam durante o ensaio dinâmico.

Este resultado mostrou que linhas de vida se forem atingidas por descargas atmosféricas com componentes de corrente de continuidade podem perder as suas características mecânicas e colocarem em risco os trabalhadores que as estiverem utilizando.

A norma brasileira não cita especificadamente a proteção das linhas de vida, no entanto, o estudo mostrou esta fragilidade.

As linhas de vida devem ser instaladas dentro do volume de proteção do SPDA, caso este seja necessário. Sempre devem ser inspecionadas cuidadosamente no sentido de verificar marcas ou qualquer tipo de dano que possa colocar em risco o trabalhador que a estiver utilizando.

1.0 – INTRODUÇÃO

As linhas de vida (linhas de vida horizontais), nome popular de um dos sistemas de proteção contra quedas, são compostas essencialmente por cabos de aço ancorados nas coberturas das estruturas (ver Figura 1) cujo objetivo é minimizar os danos ao trabalhador em caso de queda.



Fig. 1: Detalhe de uma linha de vida

No Brasil, toda atividade a ser realizada em altura superior a 2 metros do nível da base (normalmente no solo), onde haja risco de queda, é considerada “trabalho em altura” e deve obedecer aos requisitos de segurança contidos na Norma Regulamentadora nº 35 (NR-35) do Ministério do Trabalho e Previdência Social [1].

A NR-35 [1] estabelece que o uso de sistema de ancoragem é obrigatório quando não for possível evitar atividades ou trabalhos em altura.

Um dos sistemas utilizados em coberturas estruturais é a linha de vida horizontal. Este sistema é constituído por elementos fixados de forma permanente na estrutura onde podem ser ligados um ou mais dispositivos de ancoragem ou equipamentos de proteção individual (EPI) (ver Figura 2).



Fig. 2: Exemplo de EPI

Normalmente, as linhas de vida horizontais ficam expostas às descargas atmosféricas ou, ocasionalmente, podem estar dentro do volume de proteção gerado pelo SPDA (Sistema de Proteção contra Descarga Atmosférica) instalado na estrutura.

Este trabalho apresenta alguns experimentos preliminares desenvolvidos em laboratório onde amostras de linhas de vida horizontais foram submetidas a pulsos de correntes contínuas [2-3] e posteriormente a ensaios de resistência mecânica (ensaios dinâmicos).

Este estudo inicial foi desenvolvido com um número limitado de amostras em testes específicos.

2.0 – DESENVOLVIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1 – AMOSTRAS

Foram ensaiadas e analisadas oito amostras de cabos de aço com diâmetro nominal de 5/16", 6x19. Quatro amostras com alma de aço (amostras 01, 02, 03 e 04) e quatro amostras com alma de fibra (amostras 05, 06, 07, e 08), cada amostra com comprimento de um metro, as quais foram submetidas aos seguintes ensaios: ensaios de tração, medição de resistência elétrica e aplicação de pulsos de corrente contínua para simular os componentes de corrente de continuidade [2-3].

As amostras 01 a 04 possuem as seguintes características técnicas: diâmetro 5/16"; construção 6 x 19; tipo de alma AACI; composição SEALE; com pré-treinamento; torção direita regular; carga de trabalho 0,7 Ton; Resistência do fio IPS; livre de lubrificação; acabamento galvanizado; fator de segurança 5:1; normas aplicáveis NBR 13541-1 [4] e NBR 11900 [5] (ver Figura 3).



Fig. 3: Amostras tipo alma de aço (AACI)

As amostras 05 a 08 possuem as seguintes características técnicas: diâmetro 5/16"; construção 6 x 19; tipo de núcleo de fibra artificial; composição SEALE; com pré-treinamento; torção direita regular; carga de trabalho 0,7 Ton; Resistência do fio IPS; livre de lubrificação; acabamento galvanizado; fator de segurança 5:1; normas aplicáveis NBR 13541-1 [4] e NBR 11900 [5].

Para simular os efeitos do raio na linha de vida horizontal, foi escolhida a corrente de continuidade, que é um componente do raio cujo efeito térmico é mais pronunciado e facilmente reproduzido em laboratório.

Não há muitas publicações sobre a combinação de linhas de vida e raios. As publicações que mais se aproximam são as que mostram cabos OPGW (Optical-fiber Composite Overhead Ground Wire) e sua interação com raios [06-08]. As normas e documentos sobre o assunto mostram como devem ser realizados os testes nestes cabos cuja principal função é proteger as linhas de transmissão contra descargas atmosféricas e encaminhar fibras ópticas para

telecomunicações. Como o foco nesses casos de cabos é o dano devido a efeitos térmicos, os testes utilizam componentes de correntes de continuidade para simular o efeito do raio. Em relação aos danos relacionados a descargas atmosféricas principalmente em elementos metálicos, existem muitos trabalhos [09-12] e livro [13] sobre danos em aeronaves devido a descargas atmosféricas. Esses estudos mostram tipos de ensaios a serem feitos em chapas metálicas utilizadas em aeronaves e formas de onda de correntes para simulação de descargas atmosféricas em laboratório, que incluem componentes de correntes de continuidade juntamente com outros componentes. Tanto nos ensaios em aeronaves como nos realizados nas amostras de linha de vida, os arcos ficaram confinados no vão entre o eletrodo de ensaio e o elemento em ensaio, mas na realidade o arco estaria em movimento, quer pelo movimento da aeronave ou devido aos efeitos do campo eletromagnético, situação que, para fins térmicos, seria menos crítica que a confinada.

2.2 – ENSAIOS REALIZADOS

Inicialmente, todas as amostras foram identificadas e um trecho de 50 centímetros foi marcado para medição da resistência elétrica. O aparelho utilizado para esta medição foi um microohmímetro, quatro terminais (método Kelvin), escala de 0 a 100 A.

As amostras 01 e 05 são “cobaias” e foram submetidas apenas a ensaio dinâmico e medição de resistência elétrica.

As amostras 02 e 06 foram submetidas a pulsos de corrente contínua em forma de arco, simulando os componentes da corrente de continuidade. Pulsos com 150 C (+/- 20%) foram aplicados.

As amostras 03 e 07 também foram submetidas a pulsos de corrente contínua em forma de arco, simulando os componentes da corrente de continuidade. Pulsos com 225 C (+/- 20%) foram aplicados.

As amostras 04 e 08 também foram submetidas a pulsos de corrente contínua em forma de arco, simulando os componentes da corrente de continuidade. Pulsos com 300 C (+/- 20%) foram aplicados.

Os valores de 150 C, 225 C e 300 C (+/- 20%) foram adaptados da Tabela 3 e Tabela C.2 da Norma Brasileira de Proteção contra Descargas Atmosféricas, ABNT NBR 5419-1:2015 [2], que foi feita com base na IEC 62305-1 [3] e representam os valores máximos das cargas de descarga atmosférica para os níveis de proteção III-IV, II e I, respectivamente.

Os testes foram realizados no Laboratório de Altas Correntes do Instituto de Energia e Ambiente. Um transformador trifásico de 3 MVA e uma ponte retificadora de onda completa foram usados como fonte. Este pulso foi aplicado como

arco elétrico na parte central da amostra instalada em um aparelho, esticado, mas não tracionado.

As amostras foram fixadas ao aparelho conforme Figura 4a), e o arco foi estabelecido em um gap de 3 centímetros entre o Eletrodo de Aço SAE 1020 e a amostra. O retorno da corrente para a fonte é feito por 4 tubos condutores equidistantes do local do gap para confinar o arco no mesmo. O início do arco no vão foi feito através de um pequeno fio de cobre que se vaporiza na passagem da corrente (Figura 4b). Estas condições de teste foram utilizadas de acordo com as características do laboratório utilizado operando em baixa tensão e alta corrente.



Fig. 4: a) Montagem do ensaio - b) gap e fio para estabelecimento do arco



Fig. 5: Aplicação do pulso CC



Fig. 6: Amostra com alma de fibra artificial após a aplicação de pulso CC.

A corrente de ensaio foi de aproximadamente 500 A e a carga foi ajustada pelo tempo de duração do pulso. Um pulso foi aplicado a cada amostra (Figura 5).

A Tabela I mostra os valores aplicados nos testes com pulsos de corrente contínua.

TABELA I – ENSAIO COM PULSO DE CORRENTE CONTÍNUA

C.P	Tipo	Corrente (A)	Duração (ms)	Carga (C)	Foto (Nº)
02	Alma de aço	535	318	170	7a)
03	Alma de aço	519	426	221	8a)
04	Alma de aço	634	643	343	9a)
06	Alma de fibra	532	318	169	7b)
07	Alma de fibra	521	426	222	8b)
08	Alma de fibra	516	631	325	6 e 9b)



Figs 7: Carga Nominal 150C – a) alma de aço – b) alma de fibra



Figs 8: Carga Nominal 225C – a) alma de aço – b) alma de fibra



Figs 9: Carga Nominal 300C – a) alma de aço – b) alma de fibra

Após os testes com pulsos de corrente contínua, todas as amostras foram novamente submetidas à medição de resistência elétrica.

As medidas das resistências elétricas das amostras foram feitas da seguinte forma:

Nas amostras 01 e 05 (cobaias) foram feitas cinco medidas de resistência elétrica para cada amostra (ver Tabela II).

TABELA II – MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DAS AMOSTRAS COBAIAS

Descrição	Amostra 01 (alma de aço)	Amostra 05 (alma de fibra)
Med. 01 (R1)	3.50 mΩ	4.09 mΩ
Med. 02 (R2)	3.53 mΩ	4.09 mΩ
Med. 03 (R3)	3.47 mΩ	4.04 mΩ
Med. 04 (R4)	3.52 mΩ	4.14 mΩ
Med. 05 (R5)	3.53 mΩ	4.15 mΩ
Valor médio (Rmed)	3.51 mΩ	4.10 mΩ
Variância (σ)	0.025	0.044
Fator de cobertura (k)	2.57	2.57
R (mΩ)	3.51 ± 0.06	4.10 ± 0.11

O estudo estatístico de amostras que não foram submetidas a testes com pulsos de corrente contínua foi utilizado para verificar incertezas de medição (que dependem dos instrumentos utilizados, do operador e das amostras).

Para as amostras que foram submetidas a ensaios com pulsos de corrente contínua (amostras 02, 03, 04, com alma de aço e amostras 06, 07 e 08, com alma de fibra), a Tabela III apresenta os valores das medidas das resistências elétricas antes e depois dos testes de corrente. Para cada amostra, foi feita uma medição antes e outra após o teste.

TABELA III – MEDIÇÃO DAS RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS ANTES E APÓS OS ENSAIOS COM PULSOS DE CORRENTE CONTÍNUA

AMOSTRAS	Antes do pulso (mΩ)	Após o pulso (mΩ)	Diferença (mΩ)	Diferença (%) (Nota 2)
02	3.48	3.52	0.04	1.15
03	3.47	3.56	0.09	2.59
04	3.49	3.59	0.10	2.87
06	3.85	4.05	0.20	5.19
07	4.13	4.08	-0.05	-1.21
08	4.05	4.18	0.13	3.21

Nota 1: A incerteza normalizada para a medição da resistência foi estimada em ± 0.5 mΩ.

Nota 2: Em relação ao valor medido antes do pulso.

Como pode ser observado pelos valores da Tabela III, o efeito da aplicação do pulso não é evidente do ponto de vista da variação da resistência elétrica, medida no comprimento de 0,5m da amostra.

Isso porque o dano ocorreu em um espaço limitado das amostras; portanto, a variação da resistência observada é pequena em relação ao comprimento total do corpo de prova.

A forma utilizada para melhorar a sensibilidade do método de avaliação de danos é determinar a resistência no trecho danificado por unidade de comprimento ($m\Omega/m$) e comparar com o que foi inicialmente determinado em toda a amostra (ver Tabela IV).

Observou-se que o dano ficou restrito a um trecho de aproximadamente 10 cm (0,1m) e esse valor foi considerado para as determinações.

TABELA IV – MEDAÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA ANTES E APÓS OS ENSAIOS COM PULSOS DE CORRENTE ($m\Omega/m$)

AMOSTRAS	Antes do pulso ($L=0,5m$) ($m\Omega/m$)	Após o pulso ($L=0,1m$) ($m\Omega/m$)	Diferença ($m\Omega/m$)	Diferença (%) (Nota)
02	6.96	7.95	0.99	14.22
03	6.94	8.23	1.29	18.59
04	6.98	8.37	1.39	19.91
06	7.70	9.04	1.34	17.40
07	8.07	7.79	-0.28	-3.47
08	8.12	9.14	1.02	12.56

Nota: Em relação ao valor medido antes do pulso.

Com esse critério, as variações ficam mais evidentes. Também foram realizados trechos de amostras intactas de 0,1m e os valores observados foram compatíveis com os medidos antes do pulso.

Quase todas as amostras apresentaram aumento no parâmetro de controle, exceto a amostra 07, cujo resultado aparentemente mostra uma diminuição da resistência, mas com um valor muito baixo quando comparado às demais.

Isso sugere que houve uma variação muito baixa do ponto de vista elétrico com diminuição da resistência. Uma hipótese para esse resultado é que a fusão do material pode ter criado um melhor caminho para a corrente no cabo. Objetivamente é um resultado considerado estatisticamente disperso e pode ser desconsiderado.

Assim, a verificação do dano pela variação da resistência pode ser útil em condições de laboratório, mas para aplicação em campo é pouco reveladora. Além disso, exige mais atenção na avaliação dos valores, sem resultar em resultados mais conclusivos.

Por exemplo, os números observados para amostras com alma de aço indicam uma relação de proporcionalidade entre a carga aplicada e o dano (diferença). Porém, no caso da alma de fibra a relação seria inversamente proporcional ou não haveria relação.

A detecção de danos em cabos pode ser realizada com equipamentos mais sofisticados que operam eletricamente, mais especificamente por indução eletromagnética, utilizados na indústria aeroespacial para inspeção de fuselagens, tubos e componentes relacionados, mas isso tornaria a avaliação muito cara, sem necessariamente levar para uma resposta definitiva.

Assim, para completar a avaliação, foram realizados ensaios mecânicos estáticos e dinâmicos, sendo estes últimos mais conclusivos por serem mais definitivos do ponto de vista da avaliação da segurança do cabo.

Testes estáticos foram realizados nas amostras com alma de fibra e testes dinâmicos em todas as amostras. Os ensaios estáticos foram realizados no "Laboratório de Estruturas e Materiais - LEM" de Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP. Foi utilizada uma máquina de teste, MFL Prüf und Meßsysteme GmbH D-6800 Mannheim, onde as amostras foram instaladas e processadas, e os valores de força aplicada e valores de deslocamento foram registrados para verificar a deflexão das amostras para cada valor de força. A máquina utilizada está na Figura 10.



Fig. 10: Ensaio estático de tração

Os ensaios estáticos foram realizados nas amostras 05, 06, 07 e 08, que são as amostras com alma de fibra.

Por uma falha de operação na máquina de teste, perdemos a amostra 05 (cobaia) que quebrou em um valor não observado pelo Sistema de Controle e Ajuste. Para as demais amostras, podemos verificar os valores de resistência em kgf, distância de deslocamento e alongamento em relação ao valor anterior na Tabela V.

TABELA V: ENSAIO ESTÁTICO

AMOSTRA	Força aplicada (kgf)	Distância de deslocamento (mm)	Alongamento em relação ao valor anterior (mm)
06	50	62.40	-
06	100	61.75	0.65
06	150	61.05	0.70
07	50	56.95	-
07	100	56.45	0.50
07	150	56.30	0.15
08	50	58.8	-
08	100	58.15	0.65
08	150	57.95	0.20

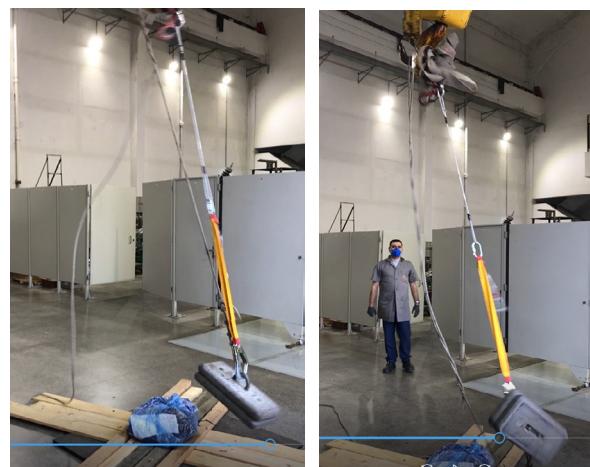
Como os pontos ensaiados estavam no início da escala da máquina de ensaio utilizada, as incertezas nos valores da força aplicada são da ordem de 15%. A distância de deslocamento foi medida entre dois pontos da máquina por meio de paquímetro.

O teste dinâmico foi realizado em todas as amostras exceto na amostra 05 que rompeu durante o teste estático.

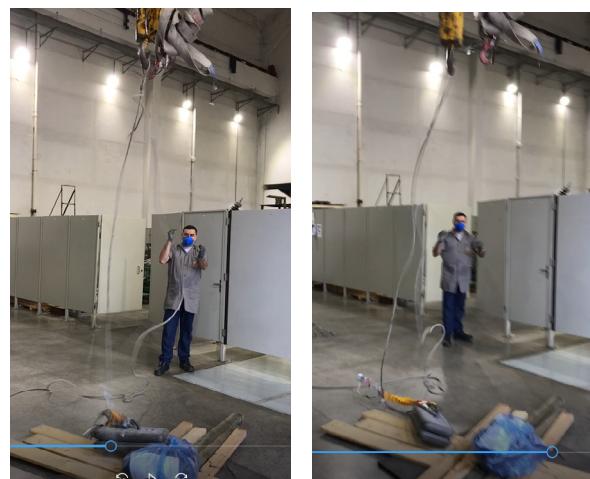
O teste dinâmico foi realizado no Serviço Técnico de Alta Potência do IEE USP, com massa de 100,6 kg. Utilizando dois ganchos de uma ponte rolante de 20 Ton, a montagem foi feita da seguinte forma: gancho para 20 ton + argola de aço + mosquetão para 26 kN, classe B + corpo de prova + mosquetão 25 kN, NBR 15837: 2010/B + Talabart duplo com impacto ABS, Tam III + duas garras do talabart em paralelo, para 25 kN, classe A + Massa de 100,6 kg.

Este conjunto, esticado com a massa de 100,6 kg a aproximadamente 25 centímetros do chão (protegido para impacto com carpete de borracha, madeira e tecido). Com o auxílio do outro gancho da ponte rolante, a massa foi içada por meio de uma corda com deslocamento vertical de 100 centímetros. Nessa corda, a massa foi amarrada com um nó que pode ser desatado instantaneamente. Quando o nó é desatado, a massa desce rapidamente, tracionando a amostra dinamicamente.

As amostras 01 e 02 não quebraram nos testes dinâmicos (Figuras 11 e 12). As demais amostras (03, 04, 06, 07 e 08) romperam nos ensaios dinâmicos (Figuras 13 e 14).



Figuras 11 e 12: Amostra 01 e amostra 02 – Não romperam



Figuras 13 e 14): Exemplos de amostras que romperam, neste caso, amostras 03 e 04.

Os testes mostraram que os trechos das linhas de vida, nas condições testadas, não suportaram esforços dinâmicos após serem submetidas por simulação de corrente de continuidade. Os resultados mostraram que as amostras com alma de aço romperam com cargas superiores a 170 C e as amostras com alma de fibra, não suportaram os ensaios mesmo com cargas inferiores a 170 C. Neste estudo, nenhum ensaio foi realizado com um trecho novo de cabo com alma de fibra (não submetido ao teste de corrente de continuidade).

As amostras foram preparadas de acordo com as normas ABNT NBR 13541-1 e NBR 11900 [4, 5].

Os testes realizados foram baseados nos procedimentos da norma brasileira ABNT NBR 16325-2:2015 [14].

3.0 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

O objetivo deste estudo foi verificar o que acontece com as linhas de vida horizontais atingidas por descargas atmosféricas.

Este estudo é inicial e foi feito com poucas amostras, de apenas uma seção (utilizado para

6/8

linhas de vida no Brasil) e com dois tipos de alma (alma de aço e alma de fibra). Trabalhos futuros serão realizados com amostragem maior e outros tipos de cabos.

Os testes com pulsos de corrente contínua para simulação dos componentes de corrente de continuidade (verificação de efeitos térmicos) apresentaram marcas e perdas de material.

Pequenas chamas foram observadas nas amostras de núcleo de fibra durante os testes, que se mostraram auto extingüíveis.

Essas chamas geralmente não são perigosas quando o sistema é instalado no telhado em um ambiente aberto. Eventualmente pode ser uma fonte de incêndio se algum material combustível estiver muito próximo ao local onde ocorre o raio neste tipo de cabo.

Nos ensaios com pulsos de corrente contínua, nota-se que o arco permaneceu restrito a um pequeno trecho das amostras, o que é uma situação crítica. Se, por efeitos eletromagnéticos, essa descarga percorresse um trecho maior no cabo, o dano poderia ser mais superficial.

Foi realizada uma análise dos valores de resistência elétrica medidos antes e depois dos testes com corrente para verificar os danos.

A avaliação pela variação da resistência elétrica das amostras foi menos reveladora, pois exigiu mais trabalho de análise dos dados coletados nos testes a fim de evidenciar visualmente os danos observados. Tampouco mostrou claramente uma relação de proporcionalidade entre o dano e a carga aplicada no ensaio, de forma que a medição da resistência elétrica dos cabos não parece ser a mais recomendada para avaliar a situação de um sistema de linha de vida.

Isso corrobora a ideia de que o efeito ficou confinado em uma pequena porção do comprimento da amostra e, de forma semelhante a um processo de cisalhamento, pouco material foi erodido no processo. Por se tratar de um estudo preliminar, este mostrou a necessidade de estabelecer um método mais específico para avaliar a quantidade de material erodido que deverá ser feito em trabalhos futuros.

Uma avaliação adequada do estado dos cabos é importante para monitorar o desgaste dos materiais submetidos a diversos eventos e assim dimensionar os intervalos de inspeção desses equipamentos.

A favor da segurança, ao menor sinal de dano por fusão elétrica por descargas atmosféricas, visível na inspeção dos cabos, estes elementos devem ser substituídos.

Este estudo inicial mostrou que as correntes de continuidade do raio podem comprometer a robustez mecânica das linhas de vida. Isso indica a recomendação de que as linhas de vida devam ficar dentro do volume de proteção do SPDA.

Este estudo não contemplou a capacidade das linhas de vida em conduzir parcelas da corrente da descarga atmosférica, principalmente em interligações com elementos do SPDA, onde podem ocorrer alta densidade de corrente.

Para tirar conclusões mais precisas, estudos futuros com diferentes materiais serão realizados.

4.0 – CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo preliminar sobre a proteção de linhas de vida horizontais contra descargas atmosféricas.

São analisados os cabos de aço utilizados nesses sistemas submetidos a pulsos de corrente contínua simulando a corrente de continuidade.

As características mecânicas e elétricas das amostras são analisadas para diferentes cargas de corrente de continuidade e para amostras não submetidas aos pulsos de corrente.

Os testes realizados nas amostras disponíveis mostraram que elas perdem suas características mecânicas após serem atingidas por descargas atmosféricas com componentes de corrente de continuidade.

É altamente recomendável que as linhas de vida permaneçam dentro do volume de proteção do SPDA.

5.0 – AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Acro Steel Cables, em especial ao engenheiro Sérgio Castanheira, pelo fornecimento das amostras para testes; Laboratório LEM da EPUSP para os ensaios mecânicos estáticos: Rui Coelho Jacomini, Antonio Coelho Jacomini, Ivan Tassarolo e os professores Leila Cristina Meneghetti Valverdes e Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti.

Agradecemos também aos funcionários do Serviço Técnico de Alta Potência do IEE USP pelos testes realizados: Ivan Bueno Raposo (Ensaio com correntes e teste dinâmico) e Rogério Massaro.

6.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *Ministério de Trabalho e Previdência, “Norma Regulamentadora Nº 35 (NR-35)”, D.O.U, Diário Oficial da União de 31/07/2019, Portaria SEPRT, Nº 915 de 30 de julho de 2019.*
- [2] *Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, “ABNT NBR 5419-1: 2015, Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 1 – Princípios Gerais”, 2015.*
- [3] *International Electrotechnical Committee – IEC, “IEC 62305-1: 2010 Lightning protection - Part 1: General principles”, 2010.*

- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, “ABNT NBR 13541-1, Linga de cabo de aço - Parte 1 - Requisitos e Método de ensaio”, 2013.
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, “ABNT NBR 11900, Extremidades de laços de cabos de aço”, 1991.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, “ABNT NBR 14074, Cabos para-raios com fibras ópticas (OPGW) para linhas aéreas de transmissão – Requisitos e métodos de ensaio”, 2015.
- [7] The Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE, “IEEE1138 – IEEE Standard for testing and performance for optical ground wire (OPGW) for use on electric utility power lines”, 2009.
- [8] Tiancang Du, Yao Zhang, Wenbo Xia, “Study on problem of lightning strike OPGW”, in 2006 International Conference on Power System Technology, 2006.
- [9] A. Kalair, N. Abas, N. Khan, “Lightning Interactions with Humans and Lifelines”, Journal of Lightning Research, 2013, 5, 11-28.
- [10] H. E. Sueta, “Proteção de aeronaves contra as descargas atmosféricas” – Revista “Potência”, Sessão Artigo – Raios e aviões, Ano XV, Nº 196, april 2022, pgs. 50-69.
- [11] L. Chermartin, P. Lalande, B. Peyrou, A. Chazottes, P.Q. Elias, C. Delalondre, B.G. Cheron, F. Lago, “Direct Effects of Lightning on Aircraft Structure: Analysis of the Thermal, Electrical and Mechanical Constraints”, Journal Aerospace Lab, Issue 5, December 2012, p. 1-15 <hal-01184416>.
- [12] F. Lago, “Lightning in aeronautics”, 13th High-Tech Plasma Processes Conference (HTPP-2014), Journal of Physics: Conference Series 550 (2014) 012001, doi: 10.1088/1742-6596/550/1/012001.
- [13] F. A. Fisher, J. A. Plumer, R. A. Peralta, “Lightning Protection of Aircraft”, Lightning Technologies Inc., 1990.
- [14] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, “ABNT NBR 16325, Proteção contra quedas de altura – Parte 2: Dispositivos de ancoragem tipo C”, 2015.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

Aplicação de Medida de Controle de Engenharia para a Redução dos Níveis de Energia Incidente em uma Planta de Mineração – Estudo de Caso Real

Henrique Fantoni Primo
SM&A Sistemas Elétricos e
Automação
henrique.fantoni@sma-
eng.com.br

Filipe Barcelos Resende
VALE
filipe.resende@vale.com

Israel Resende Rodrigues
SM&A Sistemas Elétricos e
Automação
israel.rodrigues@sma-
eng.com.br

Giuliano de Oliveira Carnevali
SM&A Sistemas Elétricos e
Automação
giuliano.carnevali@sma-
eng.com.br

RESUMO

As normas OHSAS 18001 e ISO 45001 estabelecem requisitos relacionados à Gestão da Segurança e Saúde Ocupacional e recomendam que as Medidas de Controle para Redução do Risco da ocorrência de Arcos em Sistemas Elétricos devem obedecer, preferencialmente, uma hierarquia. Nessa hierarquia os Controles de Engenharia são prioritários em relação as Medidas Administrativas, Alertas/Sinalização e Utilização de EPI. Dentro desse contexto, este artigo apresenta a implantação de duas medidas de controle de engenharia em um painel de média tensão, realizadas com a instalação de um relé de proteção contra arcos elétricos e um religador trifásico, para a redução da energia incidente em uma planta de mineração.

Através da análise da oscilografia, de um evento real, gerada por um relé de arco, idêntico ao utilizado neste estudo de caso, porém instalado em outro painel, pode-se comprovar o baixo tempo de atuação desses dispositivos de proteção. Considerando o baixo tempo de atuação, temos confirmada a eficácia da solução adotada, garantindo a segurança do operador, bem como minimizando os danos físicos aos equipamentos em caso de ocorrências de curtos-circuitos e arcos elétricos dentro de um painel.

1.0 – INTRODUÇÃO

Em 1982 o engenheiro Ralph H. Lee publicou um artigo na IEEE [1] abordando que em instalações elétricas existe um outro perigo além do choque elétrico, tão importante quanto, que é o arco elétrico. No trabalho foi apresentada pela primeira vez uma modelagem matemática consistente para o cálculo da energia incidente, definida na norma NFPA 70E [2] como a quantidade de energia impressa em uma superfície, a certa distância da fonte, gerada durante um evento de arco elétrico. A partir do artigo supracitado, diversas metodologias foram e estão sendo desenvolvidas para se obter os níveis de energia incidente em sistemas de corrente alternada e contínua.

As empresas e indústrias no mundo tem aumentado a preocupação com a segurança de trabalhos realizados em instalações elétricas, devido as severas consequências provocadas pela exposição dos profissionais a um arco elétrico. Entretanto, muitas empresas estão preocupadas em apenas adequar as vestimentas de segurança dos profissionais em relação aos níveis de energia incidente calculados.

O presente artigo tem como objetivo destacar a importância da adoção de medidas de controle de engenharia para redução dos níveis de energia incidente.

Inicialmente, será apresentado um breve resumo da normalização e a contextualização sobre o assunto, de forma a embasar a importância das medidas de controle de engenharia, descritas anteriormente. Na sequência será apresentado o estudo de caso desenvolvido em uma mineradora, apresentando as características do sistema elétrico em questão e a comparação entre os resultados dos níveis de energia incidente obtidos antes e após a instalação de um relé de proteção contra arcos elétricos no painel de média tensão analisado e de um religador na rede aérea que o alimenta. O baixo tempo de atuação desse relé de arco é comprovado por meio da análise de uma oscilografia, gerada por outro dispositivo de proteção idêntico (mesmo modelo e fabricante) ao utilizado nesse estudo de caso, após a ocorrência de um evento real de curto-círcuito dentro de um painel de baixa tensão em outra subestação dessa mesma mineradora.

No final do artigo é concluída a eficácia das medidas de controle de engenharia adotadas para reduzir os níveis de energia incidente, garantindo a segurança dos profissionais e minimizando os danos físicos aos equipamentos.

2.0 – NORMALIZAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

No Brasil, o Ministério do Trabalho e Emprego, por meio da Comissão Tripartite Paritária Permanente (CTPP), elabora e atualiza normas regulamentadoras, com objetivo de melhorar as condições e o meio ambiente do trabalho. Essas Normas Regulamentadoras (NR) são disposições complementares ao Capítulo V (Da Segurança e da Medicina do Trabalho) do Título II da Consolidação das Leis do Trabalho (CLT) e consistem em obrigações, direitos e deveres a serem cumpridos por empregadores e trabalhadores com o objetivo de garantir trabalho seguro e sadio, prevenindo a ocorrência de doenças e acidentes de trabalho. No caso específico de trabalhos em instalações elétricas e serviços em eletricidade destacam-se as seguintes NRs:

- NR-06 [3] que estabelece os requisitos para aprovação, comercialização, fornecimento e utilização de Equipamentos de Proteção Individual – EPI;
- NR-10 [4] que estabelece as condições mínimas para a segurança e saúde do trabalhador em instalações elétricas e serviços em eletricidade. Ela determina os parâmetros necessários para prevenção e controle dos riscos no ambiente de trabalho;
- NR-26 [5] que NR estabelece medidas quanto à sinalização e identificação de segurança a serem adotadas nos locais de trabalho.

Com relação aos níveis de energia incidente, o item 10.3.9 da NR-10 [4] apresenta os itens mínimos de segurança que devem estar presentes no memorial descritivo do projeto, dentre eles uma especificação técnica das características relativas à proteção contra choques elétricos, queimaduras e outros riscos adicionais.

A norma técnica ABNT NBR IEC 61482 [6] apresenta recomendações e orientações para utilização de vestimenta de proteção contra riscos térmicos de um arco elétrico para trabalhos em instalações energizadas (com tensão), obedecendo ao disposto na NR-06 [3].

O item 10.10.1 da NR-10 [4] informa que nas instalações e serviços em eletricidade deve ser adotada sinalização adequada de segurança, destinada à advertência e à identificação, obedecendo ao disposto na NR-26 [5].

Além dos trechos apresentados, outras normas nacionais e internacionais, tais como ABNT NBR 16384 [7], NFPA-70E [2], OSHA 29 [8] e NESC [9], também recomendam que todas as empresas devem calcular, armazenar, divulgar e sinalizar os níveis de Energia Incidente em todos os locais nos quais os profissionais podem realizar trabalhos em sistemas energizados.

Os padrões de vestimentas de segurança antichamas (contra arcos elétricos) dos profissionais são definidos pela empresa de acordo com os níveis de energia incidentes calculados. Normalmente, adota-se que os profissionais estão aptos a trabalhar em locais cuja energia incidente calculada seja igual ou menor ao valor do ATPV (Arc Thermal Protection Value) de suas vestimentas padrões. Para trabalhos em locais com energia incidente superior ao ATPV padrão, devem ser utilizadas vestimentas complementares (com valores de ATPV superiores). O indicador ATPV foi definido na norma técnica ASTM F1959 [10] em 1999 pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM - American Society for Testing and Materials) para medir o desempenho dos tecidos contra arco elétrico, sendo o valor máximo da energia incidente sobre o tecido que resulta numa probabilidade de 50% de que o calor transferido provoque uma queimadura do segundo grau, ou seja, 5 Joules por cm^2 (1,2 cal/ cm^2). Este valor é obtido mediante ensaios realizados pelo fabricante, utilizando a metodologia definida nessa mesma norma.

Diante do exposto acima, pode-se observar que, ao utilizar uma vestimenta antichamas cujo valor de ATPV indicado seja igual aos níveis de energia incidente calculados naquele local, o profissional estará sujeito a uma probabilidade de 50% de chance de ter uma queimadura de 2º grau em caso de ocorrência de arcos elétricos. Dessa

forma, medidas de controle tem sido cada vez mais utilizadas para reduzir os níveis de energia incidente e proporcionarem uma maior segurança para os profissionais.

O item 10.2.1 da NR-10 [4] determina que em todas as intervenções em instalações elétricas devem ser adotadas medidas preventivas de controle do risco elétrico e de outros riscos adicionais, mediante técnicas de análise de risco, de forma a garantir a segurança e a saúde no trabalho.

A norma OHSAS 18001 [11], cuja sigla significa Occupational Health and Safety Assessment Services, é um padrão internacional que estabelece requisitos relacionados à Gestão da Segurança e Saúde Ocupacional. O objetivo é proteger e assegurar que os colaboradores de uma organização tenham um ambiente de trabalho saudável e seguro. Essa norma concentra-se em controlar os perigos e fornece uma estrutura para o gerenciamento eficaz da saúde e segurança no trabalho, incluindo todos os aspectos do gerenciamento de riscos e conformidade legal.

A norma ISO 45001 [12] é a nova norma ISO para saúde e segurança ocupacional e foi estabelecida para melhorar drasticamente os níveis de segurança e produtividade no local de trabalho. Com ênfase no compromisso de gerenciamento, envolvimento dos trabalhadores e controle de riscos, a ISO 45001 visa prevenir lesões, doenças e mortes relacionadas ao trabalho, especificando requisitos para um sistema de gerenciamento de saúde e segurança ocupacional. Essa norma, diferente da OHSAS 18001 que se concentra exclusivamente em riscos, e não em soluções, adota uma abordagem proativa que requer a avaliação e a remediação de riscos de perigo antes que eles causem acidentes e lesões.

Em comum, essas duas normas OHSAS 18001 e ISO 45001 estabelecem requisitos relacionados à Gestão da Segurança e Saúde Ocupacional e recomendam que as Medidas de Controle para Redução do Risco devem obedecer preferencialmente a hierarquia apresentada na Figura 1. Essas normas também ressaltam que todas as medidas de controle possíveis, para o sistema analisado, deverão ser implementadas em conjunto, ou seja, ao mesmo tempo.

Pode-se observar na Figura 1 que a utilização de EPI é a última medida recomendada pelas normas. Nessa mesma figura, verifica-se que os alertas/sinalizações e as medidas administrativas são consideradas menos eficientes que os controles de engenharia.



Figura 1 - Hierarquia das Medidas de Controle.

3.0 – ESTUDO DE CASO

O estudo de caso apresentado nesse artigo se refere à implantação de duas medidas de controle de engenharia em um painel de média tensão, realizadas com a instalação de um relé de proteção contra arcos elétricos e um religador, para a redução da energia incidente em uma planta de mineração.

3.1 – SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO

O sistema elétrico analisado nesse artigo, aborda os cálculos da energia incidente no painel de média tensão QD-02, instalado na Subestação Secundária de uma planta de mineração. Esse painel é alimentado pelo QD-01, instalado na Subestação Principal, via uma rede aérea de 13,8 kV, conforme diagrama unifilar simplificado apresentado na Figura 2.

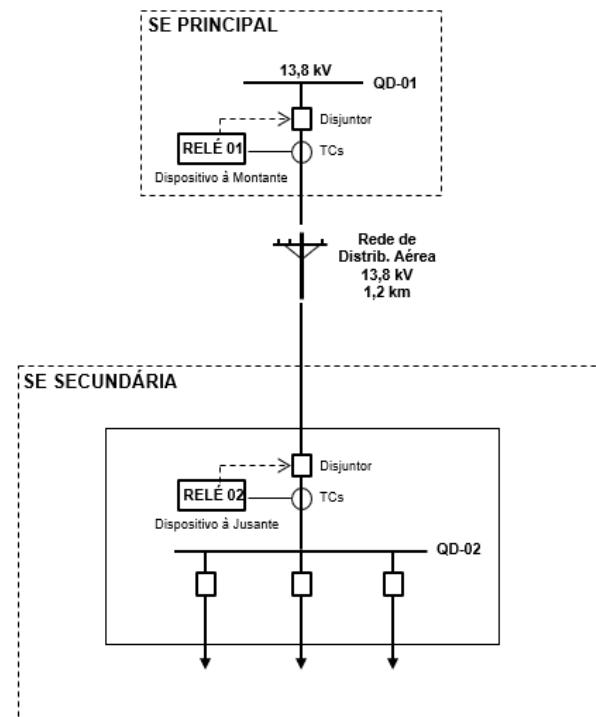


Figura 2 – Diagrama Unifilar Simplificado.

Utilizando as premissas e as metodologias de cálculo definidas na norma IEEE 1584 [13] e os dados principais do sistema informados na Tabela 1 foram obtidos os níveis de energia incidente no painel QD-02 apresentados na Tabela 2.

Tabela 1 - Dados do sistema analisado.

V _{nom} (kV)	I _{cc} Máx (kA)	Config. Eletrodos QD-02	Tempo atuação Relé 02 (ms)	Tempo atuação Relé 01 (ms)
13,8	15	HCB	400	600

Conforme diretrizes dessa norma IEEE 1584 [13], os cálculos da energia incidente foram realizados para duas configurações:

- Line Side, referente aos compartimentos de entrada de cabos e do disjuntor (destacados em **verde** na Figura 3);
- Load Side, referente aos barramentos e compartimentos dos demais cubículos desse painel (destacados em **vermelho** na Figura 3).



Figura 3 – Painel com destaque de Zona 1: Line Side e Zona 2: Load Side.

Tabela 2 - Níveis de Energia Incidente no QD-02.

Config.	I _{arc} (kA)	T Relés (ms)	T DJ (ms)	A _{FB} (mm)	E (cal/cm ²)
Line Side	13,6	600	80	5870	26,16
Load Side	13,6	400	80	4758	18,47

Pode-se observar na Tabela 2 que os níveis de energia incidente obtidos no QD-02 estão extremamente elevados nas duas configurações analisadas.

De acordo com os Padrões Normativos internos dessa mineradora, as intervenções ou manobras nesse painel só poderão ser realizadas quando ele estiver desenergizado ou quando os profissionais estiverem utilizando vestimentas antichamas complementares, uma vez que os níveis de energia incidente calculados foram superiores a 8 cal/cm².

3.2 – MEDIDA DE CONTROLE DE ENGENHARIA

De forma a viabilizar que os profissionais realizem as intervenções e manobras no QD-02 energizado, utilizando a vestimenta antichamas padrão com ATPV 10,1 cal/cm², foi definida uma medida de engenharia contemplando a instalação de um relé de proteção contra arcos elétricos no cubículo de entrada desse painel. Conforme apresentado no catálogo do relé utilizado [14], o fabricante garante que a faixa do tempo máximo de atuação da proteção contra arcos elétricos varia de acordo com a informação transcrita da Figura 4:

- De 2 a 5 ms quando da utilização das saídas digitais rápidas;
- De 7 a 13 ms quando da utilização das saídas digitais convencionais.

SEL-751 arc-flash protection is exceptionally fast. Typical relay operating times are in the order of 2–5 ms when equipped with the optional fast hybrid (high-speed) output card. With standard, electromechanical outputs, tripping time increases to 7–13 ms. Fault clearing time is typically longer, determined by the breaker operating time, which often adds three to five cycles.

Figura 4 – Catálogo relé SEL-751.

O relé de arco foi instalado no cubículo de entrada do QD-02, sendo configurado para duas zonas de proteção (Zona 1: Line Side e Zona 2: Load Side) e para atuação nas saídas digitais rápidas.

Entretanto, devido à grande distância e a impossibilidade de lançamento de fibra ótica entre as Subestações Principal e Secundária, a atuação (TRIP) das duas zonas de proteção do relé de arco foram direcionadas para o respectivo disjuntor, instalado no cubículo de entrada do QD-02, conforme diagrama simplificado apresentado na Figura 5.

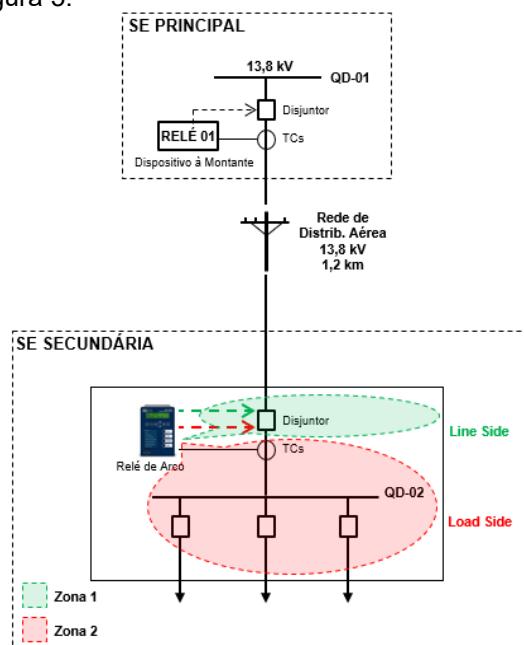


Figura 5 – Diagrama Unifilar Simplificado.

A Tabela 3 apresenta os níveis de energia incidente no painel de média tensão QD-02, considerando a instalação do relé de arco.

Tabela 3 - Níveis de Energia Incidente no QD-02.

Avaliação	Iarc (kA)	T (ms)	T disp (ms)	AFB (mm)	E (cal/cm ²)
Line Side	13,6	600	80	5870	26,16
Load Side	13,6	5	80	1674	3,27

Pode-se observar que apesar da instalação do relé de arco, os níveis de energia incidente no cubículo de entrada do QD-02, referentes à análise de Line Side, permaneceu inalterado, uma vez que o tempo de atuação utilizado (600 ms) foi mantido como sendo do dispositivo à montante (Relé 01, instalado no QD-01).

Para adequar os níveis de energia incidente para essa configuração (Line Side), foi necessária a definição de outra medida de controle de engenharia. Nesse caso, foi realizada a instalação de um religador no último poste da rede aérea antes da descida para a entrada dos cabos isolados na Subestação Secundária, que são conectados no QD-02, ver Figura 6. Dessa forma, a atuação da Zona 2 (Line Side) de proteção do relé de arco foi direcionada para a abertura do religador, conforme diagrama unifilar simplificado apresentado na Figura 7.



Figura 6 – Religador instalado no poste.

A Tabela 4 apresenta os níveis de energia incidente no painel de média tensão QD-02 após a instalação do relé de arco e do religador.

Tabela 4 – Níveis de Energia Incidente no QD-02.

Avaliação	Iarc (kA)	T (ms)	T disp (ms)	AFB (mm)	E (cal/cm ²)
Line Side	13,6	5	80	1674	3,27
Load Side	13,6	5	80	1674	3,27

Pode-se observar na Tabela 4 que os níveis de energia incidente obtidos no QD-02 (3,27 cal/cm²) são inferiores ao limite de 8 cal/cm², permitindo que os profissionais realizem intervenções ou manobras nesse painel quando ele estiver energizado, utilizando apenas as vestimentas antichamas padrões da empresa com ATPV de 10,1 cal/cm².

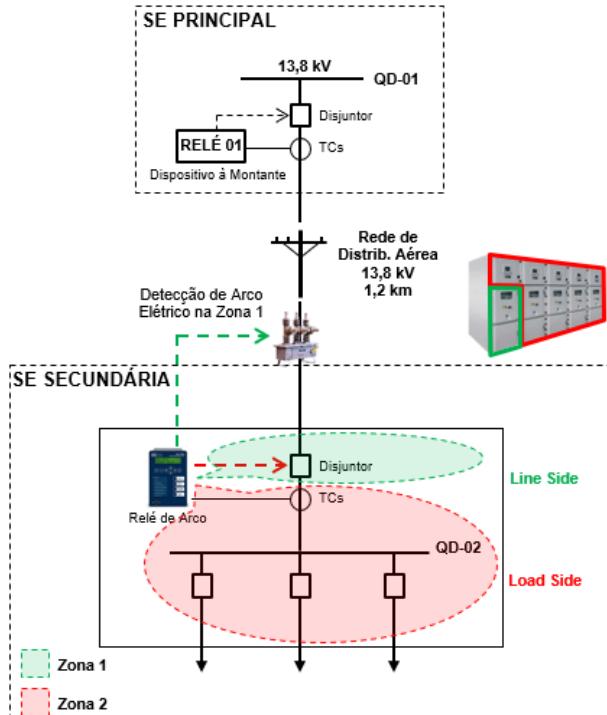


Figura 7 – Diagrama Unifilar Simplificado.

3.3 – OSCILOGRAFIA DE EVENTO REAL

A Figura 8 apresenta uma oscilografia registrada por outro relé de arco, idêntico ao utilizado nesse artigo (mesmo modelo e fabricante), após a ocorrência de um evento real de curto-circuito dentro de um painel de baixa tensão, instalado em outra subestação dessa mesma mineradora.

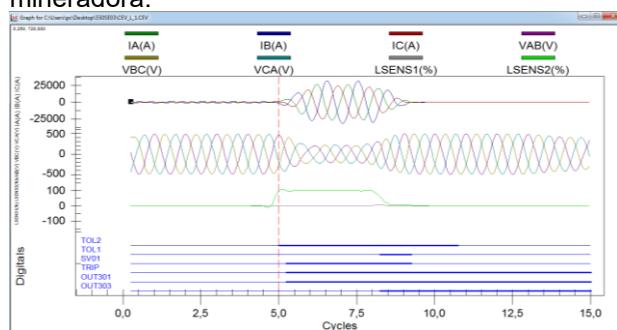


Figura 8 – Oscilografia gerada pelo relé de arco.

Pode-se observar na oscilografia que o relé atuou (TRIP) com um tempo de aproximadamente 0,25 ciclos (em torno de 4,17 ms), dentro da faixa de 2 a 5 ms garantida pelo fabricante, considerando a utilização das saídas rápidas. Verifica-se também nessa oscilografia que o tempo de abertura/extinção do arco pelo disjuntor de baixa tensão foi de aproximadamente 4 ciclos (em torno de 66,7 ms).

A Tabela 5 apresenta os níveis de energia incidente no painel de média tensão QD-02 considerando o tempo real de atuação dos contatos de saídas rápidos do relé, obtido pela oscilografia da Figura 8. Os tempos de

abertura/extinção do arco pelo disjuntor foram mantidos, uma vez que os valores obtidos na oscilografia se referem a um dispositivo de baixa tensão.

Tabela 5 – Níveis de Energia Incidente no QD-02.

Avaliação	Iarc (kA)	T (ms)	T disp (ms)	AFB (mm)	E (cal/cm ²)
Line Side	13,6	4,17	80	1664	3,24
Load Side	13,6	4,17	80	1664	3,24

4.0 – CONCLUSÕES

O artigo apresentou inicialmente um breve resumo da normalização e contextualização sobre conceitos de energia incidente e indicadores de vestimentas (ATPV), de forma a embasar a importância da adoção de medidas de controle de engenharia.

Foi apresentado um estudo de caso real desenvolvido em uma mineradora, no qual foram calculados os níveis de energia incidente no painel de média tensão QD-02, considerando o projeto original, ou seja, os dispositivos de proteção atuando com temporização definida para a filosofia de coordenação convencional (Relé 01 com $t = 600$ ms e Relé 02 com $t = 400$ ms). Nesse caso, os resultados obtidos foram 26,16 cal/cm², para análise Line Side, e 18,47 cal/cm², para Load Side, sendo eles superiores ao limite definido nos Procedimentos Normativos internos da empresa (8 cal/cm²). Para adequar os níveis de energia incidente ao valor limite, foi adotada uma medida de controle de engenharia, que é a mais utilizada atualmente, a qual contempla a instalação de um relé de proteção contra arcos elétricos no cubículo de entrada do QD-02. Entretanto, essa medida não se mostrou suficiente, pois não alterou o valor de energia incidente calculado para a análise da configuração Line Side.

A solução final adotada nesse estudo de caso, capaz de reduzir os níveis de energia incidente em todas as configurações analisadas, foi a implementação de mais uma medida de controle de engenharia, porém nada comum. Essa medida contempla a instalação de um religador no último poste da rede aérea antes da descida para a entrada dos cabos isolados na Subestação Secundária, que são conectados no QD-02. Dessa forma, com a atuação da zona de proteção da Line Side do relé de arco sendo direcionada para a abertura do religador, o nível da energia incidente calculado para essa configuração foi de 3,27 cal/cm², igualando ao valor obtido para Load Side.

Diante de tudo o que foi apresentado, pode-se concluir que o artigo obteve êxito ao comprovar, utilizando cálculos e a análise de uma oscilografia de um evento real, a importância e a

eficácia da utilização em conjunto das duas medidas de controle de engenharia. Estas definidas para a redução dos níveis de energia incidente no painel analisado, garantindo a segurança dos profissionais e minimizando os danos físicos aos equipamentos.

5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lee, Ralph H. "The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-18, Issue: 3, May/June 1982.
- [2] Norma técnica NFPA-70E:2023 – "Standard for Electrical Safety in the Workplace".
- [3] Norma Regulamentadora NR-6 de 28/07/2022 – "Equipamento de Proteção Individual - EPI".
- [4] Norma Regulamentadora NR-10 de 30/07/2019 – "Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade".
- [5] Norma Regulamentadora NR-26 de 06/09/22 – "Sinalização de Segurança".
- [6] Norma técnica ABNT NBR IEC 61482:2023 – "Trabalho Sob Tensão - Vestimenta de Proteção contra Perigos Térmicos de um Arco Elétrico".
- [7] Norma técnica ABNT NBR 16384:2020 – "Segurança em Eletricidade — Recomendações e orientações para trabalho seguro em serviços com eletricidade".
- [8] Norma técnica OSHA 29 CFR 1910 – "Occupational Safety and Health Standards".
- [9] Norma técnica National Electrical Safety Code (NESC):2023.
- [10] Norma Técnica ASTM F1959/F1959M:22 – "Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing".
- [11] Norma Técnica OHSAS 18001:2007 – "Occupational Health and Safety Assessments Series".
- [12] Norma Técnica ISO 45001:2018 PT – "Sistemas de Gestão de Saúde e Segurança Ocupacional - Requisitos com orientação para uso".
- [13] Norma Técnica IEEE 1584:2018 – "Guide For Performing Arc-flash Hazard Calculation".
- [14] SEL-751 Feeder Protection Relay – "Instruction manual".



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

SEGURANÇA ELÉTRICA EM CANTEIRO DE OBRAS

João Gilberto Cunha

Instituto Mi Omega

joao.cunha@institutomiomega.com.br

RESUMO

Em canteiros de obras, é fundamental adotar os mesmos princípios de segurança aplicados às instalações permanentes, no que se refere à proteção contra choques elétricos e à prevenção de sobrecargas e curtos-circuitos. No entanto, devido aos riscos aumentados inerentes aos trabalhos realizados nesses locais e às influências externas especificamente neles existentes, era necessário estabelecer requisitos específicos — além daqueles prescritos pela norma de requisitos gerais para instalações elétricas de baixa tensão, a ABNT NBNR 5410 [1] — agora contemplados na nova norma a ABNT NBR 17018 - "Instalações elétricas de baixa tensão — Requisitos para instalações em locais especiais — Instalações para canteiros de obras de construção e de demolição", que traz diretrizes específicas para essas instalações temporárias, fixas ou móveis, destinadas a serem retiradas de serviço após a conclusão dos trabalhos. Em canteiros de obras devem ser observados os mesmos princípios de segurança aplicados às instalações permanentes, no que se refere à proteção contra choques elétricos e à prevenção de sobrecargas e curtos-circuitos. Mas, dados os riscos aumentados inerentes aos trabalhos realizados nesses locais e as influências externas especificamente neles existentes, eram necessários os requisitos específicos — além daqueles prescritos pela norma de requisitos gerais para instalações elétricas de baixa tensão, a ABNT NBNR 5410 [1] — agora contemplados na nova norma a ABNT NBR 17018 - "Instalações elétricas de baixa tensão — Requisitos para instalações em locais especiais — Instalações para canteiros de obras de construção e de demolição", que traz diretrizes específicas para essas instalações temporárias, fixas ou móveis, destinadas a serem retiradas de serviço após a conclusão dos trabalhos. O objetivo deste trabalho é esclarecer alguns pontos da nova

norma, que se baseia em uma norma IEC e incorpora prescrições já implantadas em outros países. Aproveitar a experiência desses países é de extrema importância para a melhor aplicação dos requisitos em nosso país.

1.0 – INTRODUÇÃO

As instalações elétricas nos canteiros de obra no Brasil, desde o ano 1978, foi regulamentada pelo capítulo 21 da NR-18 de 1978 e atualmente no capítulo 6, desde 2020. Na primeira edição desde em 1978 até a edição de 2018, a NR-18 percebeu-se uma falta de alinhamento claro com as normas técnicas brasileiras elaboradas pela ABNT. Na realidade ela estava em conflito até mesmo com a NR-10 [3], ambas elaboradas no âmbito do mesmo órgão governamental. Com a edição de 2018, o problema com a NR-10 [3] foi resolvido e melhorou muito o alinhamento com as normas técnicas, aliás este deve ter sido o grande motivador da revisão. Entretanto, a norma técnica ainda aplicável nos canteiros de obras permanecia sendo a ABNT NBR 5410 [1], que é uma norma de requisitos gerais, sem especificidade para esse tipo de local. Em 2023 foi publicada pela ABNT a Norma ABNT NBR 17018 - "Instalações elétricas de baixa tensão — Requisitos para instalações em locais especiais — Instalações para canteiros de obras de construção e de demolição", que traz diretrizes específicas para essas instalações temporárias, fixas ou móveis, destinadas a serem retiradas de serviço após a conclusão dos trabalhos. Em canteiros de obras devem ser observados os mesmos princípios de segurança aplicados às instalações permanentes, no que se refere à proteção contra choques elétricos e à prevenção de sobrecargas e curtos-circuitos. Mas, dados os riscos aumentados inerentes aos trabalhos realizados nesses locais e as influências externas especificamente neles existentes, eram necessários os requisitos

específicos — além daqueles prescritos pela norma de requisitos gerais para instalações elétricas de baixa tensão, a ABNT NBR 5410 [1] — agora contemplados na nova norma. Fazem parte do escopo da NBR 17018 locais em que se realizam:

- construção de novas edificações;
- reparo, modificação, extensão ou demolição de edificações existentes ou partes destas edificações;
- obras públicas;
- trabalhos de terraplenagem; e
- trabalhos similares.

A própria norma ressalva que seus requisitos não se aplicam às instalações elétricas de locais administrativos dos canteiros de obras (por exemplo, escritórios, vestiários, salas de reuniões, cantinas, restaurantes, dormitórios e banheiros), as quais têm de atender à ABNT NBR 5410 [1], uma vez que os riscos e influências externas destes locais não diferem daqueles dos demais locais de mesma natureza.

Baseada na IEC 60364-7-704:2017 [2], a NBR 17018, como toda norma de requisitos particulares, determina que seu conteúdo deve ser lido em conjunto com o da NBR 5410 [1], e inclusive adota os mesmos termos e definições desta. Na verdade, o que a NBR 17018 faz é adaptar, com modificações e inclusões, determinadas partes da norma geral de instalações para atender às demandas específicas dos locais de obras.

2.0 – Proteção contra choques elétricos

Um dos principais objetivos da NBR 17018 é garantir a segurança do trabalho nesses ambientes com risco aumentado. A segurança é tratada tanto diretamente, com prescrições na seção 5, quanto por meio da especificação de dispositivos que melhorem as funções desejadas.

Contatos diretos — Na parte que trata de proteção básica (proteção contra contatos diretos), a norma delimitou as medidas de proteção que são permitidas em canteiros. A esse respeito, modifica o texto da seção 5.1.2.5.1 da NBR 5410 [1], determinando que, independentemente da tensão nominal, em circuitos de corrente alternada e de corrente contínua, o requisito de proteção básica deve atender à aplicação de:

- isolação básica; ou
- barreiras ou invólucros.

E ainda, na seção que trata da proteção parcial contra choques, a norma proíbe expressamente o uso de obstáculos e de colocação fora de alcance como proteção básica (seção 5.1.5.1).

E qual a razão dessas restrições? A proteção contra choques por contato direto é tratada, tanto na NBR 5410 [1] quanto na NR-10 [3], como dependente do nível de conhecimento do usuário

quanto aos perigos da eletricidade. No caso da proteção total, a eficácia das medidas de isolamento básica ou de uso de barreiras ou invólucros independe do conhecimento do trabalhador. Já para a proteção parcial, o uso de obstáculos e de colocação fora de alcance só é eficaz quando o trabalhador tem conhecimento suficiente para evitar os perigos da eletricidade. Assim, tendo em vista a diversidade de profissionais no canteiro de obra, com diferentes graus de conhecimento quanto aos perigos da eletricidade (indo do conhecimento pleno ao conhecimento zero ou quase isso), a NBR 17018 só admite a proteção total.

Contatos indiretos — Com relação a proteção supletiva (contra contatos indiretos), a norma fez também uma restrição quanto à adoção de algumas medidas. Por meio da nova seção 5.1.2.101, ela determina que não podem ser utilizadas em canteiros de obras as medidas de:

- locais não condutivos;
- ligação equipotencial não conectada à terra; e
- separação elétrica para a alimentação de mais de um equipamento de utilização.

Isto, no entanto, só tem sentido formal, uma vez que tais medidas já haviam sido excluídas do elenco das medidas de proteção prescritas pela ABNT 5410 [1] na edição de 2004.

No que se refere à aplicação das medidas de proteção contra choques elétricos, tratadas de forma genérica na seção 5.1.4 da NBR 5410 [1], a NBR 17018 introduziu dois conjuntos de prescrições relativas às instalações temporárias dos canteiros de obras. No primeiro caso, sobre circuitos que alimentem tomadas de corrente ou equipamentos móveis ou portáteis com corrente nominal menor ou igual a 32 A (seção 5.1.4.101), a norma determina que estes devem:

- ser protegidos por dispositivos DR com corrente diferencial-residual nominal igual ou inferior a 30 mA; ou
- ser alimentados em extraíbaixa tensão (SELV ou PELV); ou
- utilizar separação elétrica individual — cada tomada ou equipamento elétrico portátil sendo alimentado por um transformador de separação individual ou por enrolamentos separados de um transformador de separação.

No segundo caso (seção 5.1.4.102), a norma prescreve que, para o seccionamento de circuitos que alimentam tomadas de corrente com corrente nominal superior a 32 A, convém utilizar dispositivos de proteção a corrente diferencial-residual, ou, alternativamente, dispositivos de proteção contra sobrecorrentes, desde que atendidas as condições de seccionamento estabelecidas na seção 5.1.2.2.4 da ABNT NBR 5410 [1].

2.1 – Linhas elétricas

Dadas as características desses ambientes muito agressivos e em frequente modificação, linhas móveis em canteiros de obras devem usar cabos unipolares ou multipolares, os quais possuem cobertura que protege a isolação contra agressões mecânicas e químicas. A norma específica que esses cabos devem atender a norma ABNT NBR NM 287-4, tipo 287 NM 66 [4]. Como alternativa, também são admitidos cabos em conformidade com a ABNT NBR 7286 [5] e ABNT NBR 7288 [6]. Ressalte-se, aqui, que os condutores para ligação de equipamentos, como também acontece na norma de requisitos gerais, têm seu uso vetado nessas instalações. Tais cabos são os que em conformidade com a norma ABNT NBR NM 247-5 [7], conhecidos no mercado como “cabos PP”.

As linhas móveis são, na maioria das vezes, instaladas diretamente sobre o solo. Consequentemente, convém que seus condutores elétricos não cruzem ruas ou vias de passagem, para que não sofram danos. Se essas travessias forem inevitáveis, deve ser prevista medida de proteção especial contra danos mecânicos e contatos com as máquinas dos canteiros de obras. Esta proteção é constituída de dispositivos, montados sobre os cabos, que resistem ao peso dos veículos que circulam pelo canteiro.

No caso das linhas aéreas, a proteção mais eficaz é sua altura de instalação. Inclusive a norma apresenta uma prescrição de ordem geral, na seção 4.101, que estabelece que as alturas a serem respeitadas para as linhas aéreas que passam sobre os canteiros de obras devem ser definidas em acordo com o distribuidor de energia elétrica e com base nas dimensões das máquinas dos canteiros de obras (por exemplo, guindastes) e dos equipamentos (por exemplo, escadas e andainas) a serem utilizados.

2.2 – Conjuntos (quadros e painéis)

No quesito conjuntos, termo genérico usado na normalização brasileira e internacional para se referir a quadros e painéis (a propósito: a expressão “painéis” não existe formalmente na terminologia brasileira, embora seja de uso corrente na prática), a norma NBR 17018 formalizou, na seção 6.5.4.101, a obrigatoriedade de uso de conjuntos para canteiros de obras (CCO), os quais devem atender aos requisitos da ABNT NBR IEC 61439-4 [8], que é uma norma de produto, isto é, que deve ser observada pelos fabricantes de conjuntos. Agora, com a publicação da ABNT NBR 17018, que é uma norma de instalação e prescreve as proteções e os componentes que são exigidos para atender as características desses locais, a seção 6.5.4.101 obriga explicitamente que todos os quadros e painéis dos canteiros estejam de acordo com a norma do produto.

Embora a norma de instalações não prescreva explicitamente, a norma do produto CCO [8] prescreve que o grau de proteção deste conjunto deve ser pelo menos IP 44 quando todas as portas estiverem fechadas e todos os painéis removíveis e placas de recobrimento estiverem instalados.

Além disso, a NBR 17018 determina algumas características particulares para alguns conjuntos no canteiro de obras. Uma prescrição importante é a de que cada CCO deve ter um dispositivo que permita seccionar a alimentação do conjunto, dispositivo este que pode ser um disjuntor-seccionador ou uma chave seccionadora. Isto é frequentemente implementado com uso de um disjuntor geral, uma vez que os disjuntores usados no País têm também função de seccionamento. Mas é importante ressaltar que a função exigida pela norma é a de seccionamento.

Outro requisito dado na norma em relação aos CCOs (seção 6.3.7.2.102) é que os dispositivos de seccionamento do alimentador do conjunto para canteiro de obras devem poder ser bloqueados, exigência esta que facilita a aplicação da NR-10 [3] nos canteiros.

2.3 – Tomadas de corrente

Na seção referente a tomadas de corrente, a nova norma explicita os tipos de tomadas com base na normalização brasileira aplicável. Para as tomadas de corrente até 20 A, podem ser usados produtos segundo o padrão brasileiro de tomadas para uso doméstico e análogo, segundo a ABNT NBR 14136 [9], ou produtos segundo o padrão industrial, atendendo a ABNT NBR IEC 60309-2 [10]. Para correntes de 20 A até 125 A, devem ser usadas tomadas industriais segundo a ABNT NBR IEC 60309-2 [11], e para correntes acima de 125 A, tomadas industriais que atendam à ABNT NBR IEC 60309-1 [12]. Portanto, a única faixa para a qual é possível escolher entre dois tipos de tomadas é aquela até 20 A, em que se admitem as de uso doméstico ou as de uso industrial, e nesta escolha é muito importante considerar as influências externas.

2.4 – Verificação

A norma de requisitos gerais, a ABNT NBR 5410 [1], apresenta no capítulo 7 os requisitos para a verificação final em uma instalação permanente de uso residencial, comercial ou industrial. Essa verificação é muito importante para garantir a conformidade da instalação com os requisitos normativos. Mas embora seja prescrita desde a edição de 1980 da norma, a verificação final nem sempre é realizada.

Os canteiros de obras mudam constantemente e essas mudanças podem provocar danos à instalação elétrica temporária ou tornar a sua utilização perigosa. Portanto, além de ser submetida a uma verificação final como estabelece

a norma geral (em tempo: na próxima revisão da NBR 5410 [1], a verificação inicial passará a ser chamada de “verificação inicial”), é muito importante que se faça uma verificação periódica frequente — “diariamente, semanalmente ou mensalmente, conforme apropriado”, diz a NBR 17018. Esta norma lista exemplos de itens a serem inspecionados:

- adequação das conexões e estado dos condutores de proteção;
- estado dos condutores flexíveis e de suas conexões aos equipamentos portáteis;
- características nominais e estado dos fusíveis, bem como ajustes de disjuntores, para garantir que não sejam alterados indevidamente; e
- funcionamento dos dispositivos a corrente diferencial-residual.

3.0 – Conclusão

O canteiro de obras é um local de trabalho muito particular e as características de sua instalação elétrica devem levar em conta o maior risco elétrico. A regulamentação tem tratado deste assunto na NR-18 [13], mas faltava uma norma técnica que fornecesse diretrizes mais modernas e com alinhamento internacional para a execução destas instalações. Graças à NR-18 e alguns esforços locais, como o da comissão tripartite do Estado do Pernambuco que, sob a liderança da Fundacentro-PE, tornou obrigatório o uso de dispositivos DR de alta sensibilidade nos canteiros de obras daquele estado, com o tempo as instalações elétricas desses locais vêm tornando-se menos inseguras. Agora, com a publicação da norma técnica ABNT NBR 17018, fruto do esforço do GT de locais especiais da CE-64.01, espera-se uma aceleração no ritmo de melhoria das condições dessas instalações.

Cordões e cabos flexíveis (IEC 60245-4:2004 MOD).

[5] ABNT NBR 7286:2022 – “Cabos de potência com isolação extrudada de borracha etilenopropileno (EPR, HEPR ou EPR 105) para tensões de 1 kV a 35 kV – Requisitos de desempenho”.

[6] ABNT NBR 7288:2018 – “Cabos de potência com isolação sólida extrudada de cloreto de polivinila (PVC) ou polietileno (PE) para tensões de 1 kV a 6 kV – Especificação”.

[7] ABNT NBR NM 247-5:2009 (confirmada em fevereiro de 2022) – “Cabos isolados com policloreto de vinila (PVC) para tensões nominais até 450/750 V, inclusive – Parte 5: Cabos flexíveis (cordões) (IEC 60227-5, MOD)”.

[8] ABNT NBR IEC 61439-4:2019 – “Conjuntos de manobra e comando de baixa tensão – Parte 4: Requisitos particulares para conjuntos para canteiro de obras (CCO)”.

[9] ABNT NBR 14136:2012 Versão Corrigida 5:2021 – “Plugues e tomadas para uso doméstico e análogo até 20 A/250 V em corrente alternada – Padronização”.

[10] ABNT NBR IEC 60309-2:2017 – “Plugues e tomadas para uso industrial – Parte 2: Requisitos de intercambiabilidade dimensional para acessórios com pinos e contatos tubulares”.

[11] ABNT NBR IEC 60309-2:2017 – “Plugues e tomadas para uso industrial – Parte 2: Requisitos de intercambiabilidade dimensional para acessórios com pinos e contatos tubulares”.

[12] ABNT NBR IEC 60309-1:2015 – “Plugues e tomadas para uso industrial – Parte 1: Requisitos gerais”.

[13] NR-18 - Norma Regulamentadora nº 18 – “Condições e meio ambiente de trabalho na indústria da construção”. Ministério do Trabalho (última atualização: Portaria SEPRT 3.733, de 10/02/2020).

4.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT NBR 5410:2004 + Errata 1:2008 – “Instalações elétricas de baixa tensão”.
- [2] IEC 60364-7-704:2017 – “Low-voltage electrical installations – Part 7-704: Requirements for special installations or locations – Construction and demolition site installations”.
- [3] NR-10 - Norma Regulamentadora nº 10 – “Instalações e Serviços de Eletricidade”. Ministério do Trabalho (última modificação: Portaria SEPRT 915, de 30/07/2019).
- [4] ABNT NBR NM 287-4:2009 (confirmada em fevereiro de 2022) – “Cabos isolados com compostos elastoméricos termofixos, para tensões nominais até 450/750 V, inclusive – Parte 4:



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

Riscos elétricos em espaços públicos recreativos

José Carlos Martinez Melero
USP – Instituto de Energia e
Ambiente - PPGE
jose.melero@usp.br

Elvo Calixto Burini Jr.
USP – Instituto de Energia e
Ambiente
elvo@iee.usp.br

Emerson R. Santos
Grau Técnico, Eletrotécnica,
Lapa, SP, Brazil
emmowalker@gmail.com

RESUMO

Este artigo pretende apresentar os resultados de pesquisa baseados em referências bibliográficas e na experiência acumulada na gestão de iluminação pública, adotando como objetivo central a segurança elétrica em instalações de iluminação em praças e parques, considerando seus espaços de uso permanente e de uso temporário para a realização de eventos sociais e culturais.

A relevância desta investigação está no fato de que um número elevado de pessoas utiliza esses espaços públicos para realizar atividades de lazer e no fato de terem sido identificados vários casos de estruturas metálicas energizadas e do número de acidentes registrados.

O artigo identifica as principais vulnerabilidades das instalações e propõe possíveis soluções, sempre com o foco nos usuários destes espaços públicos e o provável desconhecimento destas pessoas, quanto aos riscos elétricos existentes.

1.0 – INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é apresentar o resultado de uma investigação sobre os riscos de choque elétrico em instalações de iluminação pública em: praças, parques e outras áreas públicas utilizadas para a realização de práticas esportivas (quadras e campos) e eventos temporários como, por exemplo, apresentações artísticas.

A motivação deste trabalho é o fato de as instalações de iluminação serem uma fonte de riscos de acidentes [1] e [2], e a fase de modernização tecnológica pela qual está passando a iluminação pública. A migração da tecnologia de lâmpadas à descarga elétrica em gases para a tecnologia a LEDs está baseada principalmente na maior eficiência energética desta fonte de luz e no fato de que a fatura de energia elétrica ser a

segunda maior despesa municipal, porém em muitos casos a substituição vem sendo realizada sem a observação de medidas de segurança responsáveis pela minimização dos riscos, principalmente para as pessoas e animais que frequentam esses locais públicos e estão expostos aos acidentes elétricos.

Sempre que possível a modernização é realizada mantendo-se a infraestrutura existente, principalmente postes metálicos, cabos elétricos, conexões e dispositivos de comando e proteção. A adoção desta solução atende principalmente o requisito de menor custo de projeto e execução, porém essa modernização pode resultar na introdução de riscos elétricos que exigem avaliação para a adoção de medidas de controle nas fases de projeto, execução e manutenção preventiva.

As pessoas não advertidas interagem com componentes da iluminação pública (ver Figura 1), principalmente com as estruturas que suportam as fontes de luz, e estão expostas aos riscos de choque elétrico com consequências prejudiciais à sua integridade física.

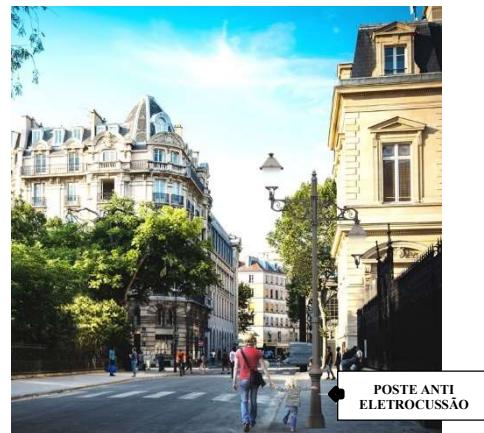


Figura 1 – O contato de criança em poste do sistema de Iluminação Pública.

Fonte:
<https://www.atpiluminacion.com/files/paginas/street-lighting-with-no-electrical-risk.html>.

A norma brasileira ABNT NBR 5410:2008, em processo de revisão, exclui as instalações de iluminação pública de seu escopo [3], o que gera dúvidas quando tratamos de especificações de projetos e execução, principalmente em um ambiente de poder público, uma vez que uma grande maioria dos municípios brasileiros não contam com profissionais que possuam formação técnica compatível, o que dificulta a realização de fiscalização preventiva e periódica nas instalações elétricas. Essa norma estabelece que as instalações elétricas de baixa tensão devem ser protegidas contra riscos de choques elétricos em decorrência do contato acidental com partes vivas perigosas, ou, através de falhas que possam eventualmente colocar uma massa sob tensão.

Segundo o Anuário Estatístico de Acidentes de Origem Elétrica 2022 [2] publicado pela ABRACOPEL, em 2021 o Brasil registrou 898 acidentes com choque elétrico que resultaram em 674 mortes.

Para a elaboração do presente trabalho foi obtida uma pesquisa bibliográfica nacional e internacional sobre as causas dos acidentes elétricos envolvendo instalações de iluminação pública, suas causas, e soluções disponíveis no mercado nacional que possam oferecer medidas de controle destes riscos. O trabalho também está baseado na experiência profissional na gestão do setor de iluminação pública de município da grande São Paulo.

Na Figura 2 são ilustrados os principais componentes das instalações de iluminação pública em praças e parques.



Figura 2 – Componentes principais do sistema de iluminação pública disponível em praças e parques. Fonte: Adaptado pelos Autores, 2023.

Na Figura 2 é possível verificar que o poste metálico se encontra na proximidade dos passeios utilizados pelas pessoas e existem elementos alheios à iluminação (cesto de lixo) que utilizam os mesmos postes para fixação.

A segurança elétrica neste tipo de instalação passa pelo fato de que o trabalho com iluminação é visto pelos supervisores como básico e fácil e, por isso, acabam sendo realizados por eletricistas sem capacitação que garanta a compreensão dos riscos e a adoção das melhores técnicas [1].

Outro fator importante é que os sistemas de iluminação pública não possuem um controle físico de acesso e é configurado por um número elevado de cargas distribuídas em uma grande área, e que são protegidas de forma coletiva [4]. Segundo essa mesma referência, existe uma tendência mundial para a adoção de equipamentos Classe II nos sistemas de iluminação pública.

Durante a pesquisa bibliográfica foram identificadas investigações internacionais sobre acidentes de origem elétrica com aves e mamíferos envolvendo circuitos aéreos de distribuição de energia elétrica [5], [6] e [7]. Embora este trabalho não tenha definido como objeto esses acidentes entendemos que o tema possui relevância uma vez que as áreas de parques e praças são frequentados por animais da fauna local, e por isso deverá ser abordado em estudos futuros.

1.1 – LESÕES POR ELETRICIDADE

As lesões em tecidos da pele humana por exposição à eletricidade são principalmente causadas pela conversão da energia elétrica em calor, resultando em lesões térmicas. A gravidade da lesão é resultante da quantidade de energia calórica dissipada, devido ao valor da corrente elétrica e sua duração, e os tecidos com alta resistência tendem a sofrer o maior dano. A resistência do corpo (medida em ohm/cm²) é provida principalmente pela pele, pois todos os tecidos internos (exceto os ossos) oferecem resistência insignificante. Espessura e secura cutânea aumentam a resistência; pele seca, bem queratinizada e intacta tem em média valor de 20 k a 30 kΩ/cm². Nas palmas das mãos e plantas dos pés espessas e calosas, a resistência pode ser de 2 a 3 MΩ/cm²; por outro lado, pele fina e úmida oferece resistência de cerca de 500 Ω/cm². A resistência em pele perfurada (por exemplo: corte, abrasão, furo de agulha) ou mucosa úmida (por exemplo: boca, reto, vagina) pode ser abaixo de 200 a 300 Ω/cm². Se a resistência da pele for alta, mais quantidade de energia elétrica pode ser dissipada na pele, resultando em grandes queimaduras, mas menos lesões internas. Se for baixa, a queimadura da pele será menos extensa ou ausente, e a quantidade de energia elétrica dissipada para órgãos internos poderá ser maior. Portanto, a ausência de queimaduras externas não é um prognostico sobre ausência de dano elétrico, e a gravidade de queimaduras externas não dimensiona a gravidade do dano elétrico.

1.2 – TENSÃO PARASITA (STRAY VOLTAGE)

A tensão parasita, por exemplo, pode ter causa devido a lenta deterioração das camadas de isolamento ao redor do condutor ou cabo de energia elétrica. A deterioração pode ocorrer como resultado do desgaste normal, cabeamento de baixa qualidade, esforços e muitos outros motivos. Depois que o isolamento se desgasta, o contato com o metal subjacente permite que a corrente elétrica alcance o ambiente circundante. A nova conexão entre as duas superfícies cria uma corrente entre duas superfícies condutoras que circula continuamente se não for interrompida. Juntamente com a deterioração das camadas de isolamento, existem muitas outras causas potenciais de tensão parasita: equipamento elétrico ou fiação defeituosa, envelhecida, condições de aterramento insatisfatórias, cargas desbalanceadas, conexão defeituosa no sistema de fio neutro ou terra.

2.0 – AS INSTALAÇÕES DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA EM PRAÇAS E PARQUES NO BRASIL

Neste tópico serão apresentados os equipamentos e instalações típicas utilizadas na iluminação pública de praças e parques. Também serão abordados os riscos elétricos relacionados com a exposição dos usuários destes espaços públicos ao choque elétrico.

2.1 – LUMINÁRIAS E PROJETORES

O Brasil possui um processo de certificação compulsória para as luminárias públicas para uso viário, sejam as que utilizam lâmpadas de descarga em gases e as que são baseadas na tecnologia LED.

O INMETRO estabeleceu na Portaria N.º 62, publicada em 17 de fevereiro de 2022 os requisitos de segurança e de desempenho destes equipamentos. Dessa forma, caso sejam utilizadas luminárias denominadas de uso viário estas deverão cumprir com os requisitos estabelecidos. No caso dos projetores, não existe um processo de certificação estabelecido no Brasil.

As luminárias representam a maior quantidade instalada. Os projetores possuem aplicação destinada à iluminação de destaque de espaços como fontes e monumentos, e para iluminação de espaços destinados a prática esportiva, por isso, a sua especificação deverá considerar as condições específicas do local onde o projetor será instalado.

Na Figura 3 são apresentados dois exemplos de: luminária e projetor.



(a)

(b)

Figura 3 – Exemplos dos equipamentos: (a) luminária e (b) projetor. Fonte: Autores, 2023.

Uma condição no fornecimento destes equipamentos é o comprimento do cabo do tipo "PP" que conecta a alimentação do dispositivo com o circuito elétrico. Essa condição é importante, uma vez que exige uma conexão elétrica que ficará interna ao poste e que poderá em caso de perda da isolação e, em contato com o poste metálico, estabelecer uma condição favorável ao choque elétrico.

A fixação dos projetores é geralmente realizada em estruturas metálicas que, dependendo de suas características, pode expor a isolamento dos cabos em condições favoráveis de corte ou ruptura, podendo também criar condições favoráveis à energização indevida destas estruturas metálicas.

Os equipamentos são instalados externamente e estão sujeitos aos efeitos da água da chuva, dos raios ultravioletas e outros agentes agressivos presentes na atmosfera. Os materiais isolantes presentes nas luminárias, projetores e circuitos elétricos sofrem degradação e em determinadas situações podem estabelecer contato com a estrutura metálica, que dependendo das condições de aterramento, representam uma fonte de risco de eletrocussão.

2.2 – AS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

No Brasil, os sistemas de distribuição de energia elétrica em baixa tensão não são padronizados, assim é possível que tenhamos circuitos de alimentação da iluminação pública constituídos por dois condutores: Fase-Fase ou Fase-Neutro para a tensão nominal de 220 V, com um sistema de proteção baseado em disjuntores eletromagnéticos para cada circuito de iluminação, e um aterramento geral no quadro geral de alimentação. Os pontos de iluminação podem possuir aterramentos individualizados ou agrupados. Estes aterramentos são realizados normalmente com a instalação de hastes de aterramento nas caixas de passagem de cada poste.

Na Figura 4 é apresentada uma ilustração do quadro geral típico exigido pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica brasileiras.

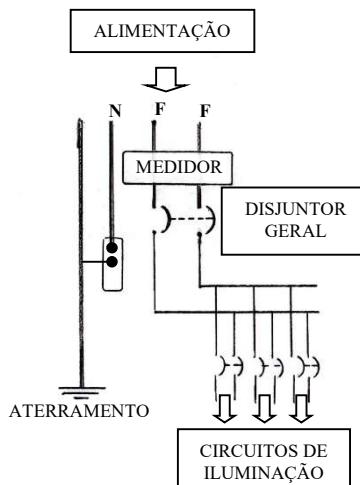


Figura 4 – Quadro geral típico utilizado em praças e parques. Fonte: Autores, 2023.

Cada circuito de iluminação é responsável pela alimentação de uma quantidade de pontos de iluminação e essa carga define a corrente nominal dos disjuntores. Como é mostrado na Figura 4, o sistema de proteção é composto por disjuntores eletromagnéticos e o comando normalmente é realizado por unidades individuais instaladas nas luminárias. No caso do comando de projetores é comum a instalação de dispositivos temporizadores que controlam o período em que esses equipamentos permanecerão energizados.

Os postes metálicos podem ser do tipo engastado ou flangeado, em ambos os casos a fixação é concluída com a utilização de concreto.

Na Figura 5 está ilustrado um poste típico engastado utilizado na iluminação pública.

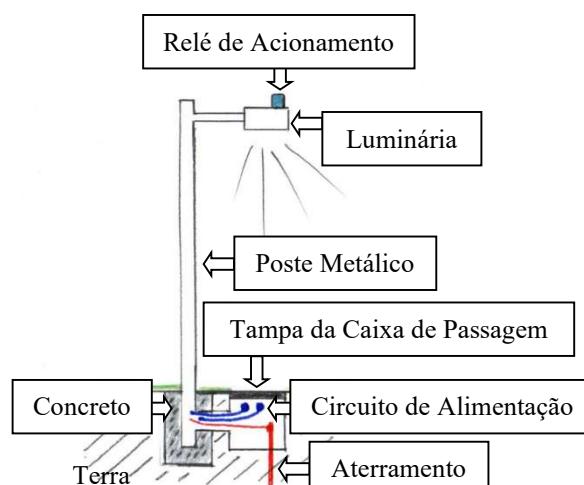


Figura 5 – Detalhamento da instalação de poste engastado. Fonte: Autores, 2023.

Dois aspectos críticos desta instalação, quando consideramos os riscos elétricos, são:

- As conexões entre o circuito de alimentação e o ramal de alimentação da luminária. Estas

conexões estarão localizadas no interior da caixa de passagem; e

- A conexão entre o ramal de alimentação e o cabo que é fornecido com a luminária. Esta conexão ficará interna ao poste.

A arquitetura típica apresentada para os circuitos de iluminação mantém os cabos elétricos e elementos de conexão energizados até o dispositivo de acionamento, portanto se o dispositivo de ligar e desligar a luminária estiver junto a este equipamento, o circuito permanecerá permanentemente energizado independentemente do estado da luminária (ligada ou desligada). Essa condição precisa ser considerada na elaboração dos projetos, pois a interpretação dos usuários em geral sempre será de que se a luminária estiver desligada não existindo o risco de energização das estruturas metálicas (postes e telas de proteção).

3.0 – RISCOS ELÉTRICOS TÍPICOS EM PRAÇAS E PARQUES, POSSÍVEIS CAUSAS E MEDIDAS MITIGADORAS

Como o objeto de estudo é a identificação de possíveis causas de acidentes que resultam do contato de pessoas com equipamentos que compõe um sistema de iluminação pública que se encontram indevidamente sob tensão, estes equipamentos têm a finalidade de assegurar que um espaço público pensado e projetado para atividades de lazer que ofereçam iluminação adequada para que as pessoas possam usufruir-las, mesmo no período em que a luz natural não seja suficiente.

Os projetistas e instaladores tendem a olhar para a iluminação pública, como uma forma de oferecer luz na quantidade e qualidade adequadas e podem tender a não observar com o rigor necessário as condições de segurança elétricas destas instalações.

As praças e parques também são utilizados para a realização de eventos esporádicos e o fornecimento da energia elétrica tipicamente é realizado a partir de uma derivação improvisada do sistema de iluminação, criando condições provisórias que, muitas vezes, acabam sendo incorporadas permanentemente, o que introduz riscos adicionais aos equipamentos e instalações elétricas.

A eletrocussão é o risco mais importante ao qual estão expostos os usuários de praças e parques. E a questão a ser respondida é: quais as causas da eletrocussão nas instalações de iluminação pública de praças e parques? Esta resposta permitirá propor as medidas de controle deste risco.

A principal razão desta preocupação é o fato de existência de acidentes nestas instalações, envolvendo as pessoas e os pontos de ocorrência que são os postes metálicos de iluminação e as grades de proteção normalmente instaladas no entorno de quadras esportivas. A causa é a

energização indevida destes dois pontos, em razão de um contato direto ou indireto dos circuitos elétricos e as estruturas metálicas, as quais se encontram em áreas de fácil acesso de pessoas.

O desafio consiste em eliminar a possibilidade de contato direto ou indireto entre os equipamentos e os circuitos elétricos, e as estruturas metálicas, e, caso isso ocorra, os dispositivos de proteção devem ser capazes de desenergizar o circuito que apresentou falha.

3.1 – MEDIDAS MITIGADORAS

Neste item serão apresentadas as possíveis medidas mitigadoras para os riscos de energização indevida de postes e grades de proteção.

A – O projeto de aterramento

O projeto típico do aterramento nas instalações elétricas de iluminação prevê um aterramento isolado do aterramento do sistema de alimentação. Esta situação insere uma impedância elevada no circuito de retorno ao condutor terra, o que limita a corrente elétrica de defeito fase terra, no caso de contato entre o circuito energizado e o poste. Nesta condição, a corrente elétrica pode não ser suficiente para sensibilizar o disjuntor eletromagnético e o poste permanecerá energizado.

Na Figura 6 é apresentado um sistema de alimentação dos circuitos de iluminação com um aterramento comum (Sistema TN-S), o qual interligar os condutores neutro e terra reduzem a impedância para ocorrências de contato direto entre o condutor fase e as partes metálicas (poste ou grade). Esta configuração melhora o desempenho da proteção do disjuntor e possibilita a instalação de IDR nos circuitos de iluminação.

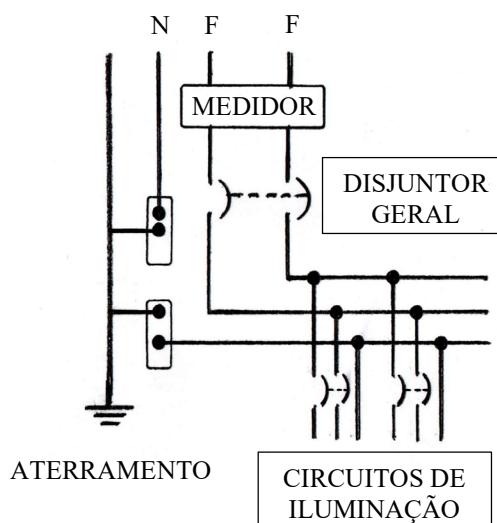


Figura 6 – Diagrama simplificado do quadro geral com a utilização do aterramento. Fonte: Autores, 2023.

Na Figura 7 é apresentado o detalhe do sistema recomendado para cada ponto de iluminação. O circuito de iluminação é composto de dois condutores fase e um condutor de aterramento. Na caixa de passagem haverá uma derivação, através de conexões elétricas que garantam a isolação dos condutores mesmo na presença de água, que alimentará a luminária e fará o aterramento das massas. Nesta configuração poderão ser instaladas hastes de aterramento para melhorar o desempenho do sistema de proteção, possibilitando a circulação de correntes mais elevadas a partir de diminuição das resistências ôhmicas dos circuitos.

Essa configuração ainda permite a instalação de um disjuntor termomagnético em cada ponto de iluminação, possibilitando uma desenergização apenas do defeito. Essa opção não é típica no Brasil em razão do número elevado de furtos de cabos a partir de um acesso no poste.

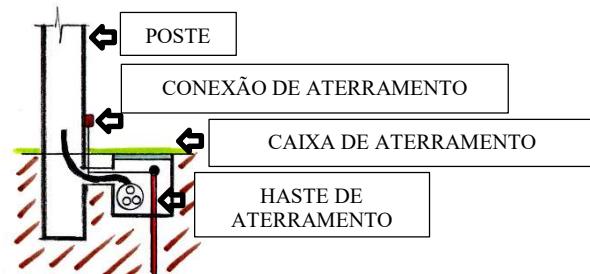


Figura 7 – Detalhe da conexão do circuito de iluminação com a alimentação da luminária. Fonte: Autores, 2023.

É preciso especificar adequadamente a conexão do aterramento, evitando a utilização de materiais que apresentem corrosão precoce e que não permitam substituições.

A utilização de dispositivos de proteção do tipo IDR – Interruptor Diferencial Residual em circuitos de iluminação pública não é uma prática comum. Este dispositivo possui uma sensibilidade de corrente de 30 mA, sendo apropriado para detecção de correntes baixas, porém sua utilização deve ser avaliada considerando-se as especificidades da instalação.

B – Postes isolados

Outra medida de controle é a previsão no projeto de utilização de estruturas não metálicas de sustentação de luminárias e projetores. No Brasil, já existem casos de utilização de postes de fibra de vidro e na Espanha há a possibilidade de utilização de postes com uma cobertura isolante. Esta cobertura é referida como sendo um polímero denominado S7 pelo fabricante espanhol (<https://www.atpiluminacion.com/antielectrocucion-eng.html>). Esta denominação (S7) foi encontrada na

literatura para referência como sendo o material polimérico denominado poliéster.

O fator limitante de custo é a principal razão para a não utilização destas soluções. Como exemplo, um poste de aço galvanizado com altura total de 7 metros e diâmetro de 6 centímetros possui o custo de referência de R\$ 600,00 enquanto um poste de fibra de vidro possui o custo de R\$ 800,00.

C – Conexões elétricas

As conexões elétricas são responsáveis pela continuidade dos circuitos elétricos e exigem uma atenção especial, uma vez que devem ser protegidas por materiais isolantes com o objetivo de garantir o nível de isolamento compatível com a instalação e suportar os esforços mecânicos e as condições atmosféricas às quais as emendas estão expostas.

As emendas mais comuns são realizadas a partir da torção dos condutores e a utilização de fita isolante e/ou fita de alta fusão, as quais quando submetidas a esforços de tração e ação de água da chuva e raios ultravioletas apresenta degradação rápida vindo a soltar-se ou romper-se, propiciando o contato direto ou indireto com as estruturas metálicas. O uso desta solução é ainda mais comum quando consideramos instalações provisórias de ponto de iluminação ou tomadas para alimentação de equipamentos elétricos.

O problema com conexões se agrava quando estas estão localizadas em locais sujeitos a umidade constante, como são as caixas de passagem instaladas em terrenos úmidos, sem drenagem eficiente. Por isso, são indicadas para as instalações externas emendas com grau de proteção IP-68, as quais podem ser do tipo seco ou a base de gel.

Na Figura 8 são mostrados modelos de: (a) emenda seca com IP-68 e (b) emenda com utilização de gel.



Figura 8 – Modelos de conexões de diferentes fabricantes: (a) Techno do Brasil e (b) Etelec do Brasil.

Estas conexões oferecem a segurança elétrica necessária para realização de emendas em circuitos elétricos instalados em áreas externas.

Na Figura 9 é mostrada uma conexão elétrica do tipo seco de projetor instalado em suporte fixado no solo.



Figura 9 – Conexão elétrica para projetor instalado no solo. Fonte: Autores, 2023.

D – Circuitos elétricos

Deve-se utilizar cabos condutores com dupla isolação e não realizar o enterramento diretamente no solo.

Deve-se adequar os dispositivos de proteção às condições elétricas dos circuitos. Esta ação deve ser observada nos projetos de modernização de tecnologia, que implica na redução da corrente elétrica dos circuitos.

E – Manutenção preventiva

Estabelecer um programa de manutenção preventiva nas instalações de iluminação pública é fundamental para avaliar: (a) as condições de funcionamento, (b) a comprovação de possíveis fugas de corrente elétrica e (c) a presença de tensão elétrica em estruturas metálicas.

Quando se trata de instalações de iluminação pública é difícil considerar um plano de manutenção que esteja comprometido em realizar verificações periódicas e permanentes das condições de funcionamento, mesmo que as ações não resultem em investimentos elevados e que possam ser realizadas por uma equipe reduzida, porém a sua execução é capaz de evitar condições de mau funcionamento e prevenir acidentes.

Ações de manutenção preventiva recomendadas são:

- Realização de verificação da presença de tensão elétrica em postes e grades de proteção. Utilização de detector de tensão, também conhecido como *caneta teste de tensão* fazendo uma alusão ao formato do instrumento.
- Realização de ensaio e isolação nos circuitos elétricos. Aplicação de tensão elétrica para verificação da existência de correntes de fuga.
- Inspeção visual das condições mecânicas dos aterramentos: presença de corrosão e aperto dos conectores.
- Identificação de pontos de aquecimento no quadro geral de distribuição. Utilização de imagem térmica.

As instalações de iluminação sofrem ações de vandalismo e principalmente furtos de cabos, que muitas vezes deixam expostas pontas energizadas, que podem entrar em contato com as estruturas

6/7

metálicas. Os serviços de manutenção corretiva são realizados com o objetivo de restabelecer a iluminação, no entanto podem alterar as condições de segurança elétrica e isso pode ser detectado nas inspeções elétricas periódicas.

F – Capacitação

Por mais simples que possam parecer as instalações de iluminação em praças e parques é preciso que os trabalhos sejam executados observando-se a segurança elétrica das próprias equipes de manutenção e dos usuários, que na sua grande maioria, são pessoas que não possuem conhecimentos sobre os riscos elétricos presentes nestas instalações.

Uma capacitação técnica que apresente e discuta as medidas de segurança que devem ser adotadas na implantação e manutenção contribuem na redução dos riscos.

A elaboração de ARMS – Análise de Riscos e Medidas de Segurança para cada atividade, também é uma importante ferramenta de prevenção de acidentes.

4.0 – CONCLUSÕES

Este trabalho buscou explorar a partir da experiência profissional, identificando fontes dos riscos e possíveis soluções para minimização estes riscos.

Os projetos de iluminação pública têm a característica de dar maior ênfase aos indicadores luminotécnicos, os quais são estabelecidos com a finalidade de assegurar a capacidade de visualização e, como consequência, propiciar um ambiente em que os usuários possam realizar as atividades de lazer com total segurança.

A segurança elétrica das luminárias é uma condição exigida para a sua comercialização, porém podem ocorrer problemas de origens diversas que inviabilizam seus próprios materiais ou, até mesmo, seus sistemas de proteção gerando os acidentes de elétricos.

O uso de postes isolantes pode se tornar uma realidade em áreas de grande permanência de pessoas, porém o preço final ainda pode ser uma barreira. Além disso, destaca-se que na avaliação total do custo não são considerados possíveis adaptações (acrescentando, por exemplo, novos componentes) e tampouco o custo de outras medidas ou equipamentos de controle.

As ações de manutenção são importantes medidas de controle, e a simples utilização de um detector de tensão elétrica, com a utilização de um instrumento de baixo investimento, pode evitar acidentes com graves consequências.

Este evento possibilita que o conhecimento tenha maior alcance e possibilite que ações de prevenção de acidentes sejam adotadas nas fases

de projeto, instalação e operação dos sistemas de iluminação.

5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] KOVACIC, Michael; CUNNINGHAM, Karl. Lighting Jobs: Easy Work or Easy Death. In: *2020 IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW)*. IEEE, 2020. p. 1-8., 2020.

[2] MARTINHO, Meire Biudes; MARTINHO, Edson; DE SOUZA, Danilo Ferreira (Org.).

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ACIDENTES DE ORIGEM ELÉTRICA 2022 ano base 2021.

Salto-SP: Abracopel, 2022. DOI: 10.29327/560614.

[3] ABNT NBR 5410:2008 – Instalações elétricas de baixa tensão.

[4] Parise, G., Martirano, L., Mitolo, M.. Electrical Safety of Street Light Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, IEEE, v. 26, n.º 3, p. 1952-1959.

[5] Gobierno de Aragón. *Proyect Life-Nature (LIFE00NAT/E/0034) Improvement of Power Lines in Zepes in Aragon*. Acessado em 30/06/2023 de: https://www.aragon.es/documents/20127/674325/Layman_report.pdf/bbe0acce-03b6-4624-a29a-fe33aad3bb16

[6] *Birds and power lines. From conflict to solution*. Miguel Ángel Ferrer Baena. Editora Fundación MIGRES, 2012, Sevilha, Espanha.

[7] NIFS. *Annual Report Review 2020*. Acessado em 30/06/2023 de: <https://www.nifs.ac.lk/sites/default/files/2021-06/Annual%20Research%20Review%202020%20EN.pdf>



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÃO PARA REALIZAÇÃO DE MANOBRAS ELÉTRICAS REMOTAS DE INSERÇÃO E EXTRAÇÃO EM DISJUNTORES E CONTATORES EM SUBESTAÇÕES

Leonardo Elias Moschen Chisté
Vale S/A
leonardo.chiste@vale.com

Edmilson José de Castro
Vale S/A
edmilson.jose@vale.com

Rafael Araújo Bornachi
Vale S/A
rafael.bornachi@vale.com

Márcio Azevedo dos Santos
Vale S/A
marcio.azevedo.santos@vale.com

Marcos Tadeu Pereira
Vale S/A
marcos.tadeu@vale.com

Valter Clá Diaz
RECAF Ltda
valter@recaf.com.br

RESUMO

A interação com o sistema elétrico está presente em todas as etapas dos processos produtivos, desde a geração, transmissão, distribuição, até a utilização da energia elétrica na operação de equipamentos e instalações. Neste contexto, a interface com os componentes, sobretudo os integrantes do Sistema Elétrico de Potência (SEP) pode representar uma fonte potencial de perigo devido a perda de contenção da energia elétrica, o que, em muitos casos, resulta em lesões graves provocadas por arcos ou choques elétricos. Nesse contexto, um dos momentos de maior exposição dos profissionais a esses riscos é o das manobras elétricas, ou seja, ao se ligar e desligar algum equipamento, ou, ao se inserir e extraír elementos de seccionamento em painéis. Diante desse cenário, a VALE, por meio de suas equipes técnicas, de engenharia e de segurança, encontrou em um fornecedor nacional (RECAF) a parceria necessária para customizar uma solução de mercado já desenvolvida para atender aos requisitos mínimos de segurança definidos pela VALE para as operações de inserção e extração de disjuntores e contatores de alta e baixa tensão com sistema rotativo, padronizando essa solução para todas as suas instalações que ainda não possuam esse recurso. Este trabalho tem por objetivo apresentar o histórico desse desenvolvimento, as vantagens dessa ação e as possibilidades de redução da

exposição aos riscos elétricos que a adoção de tal recurso pode trazer.

1.0 – INTRODUÇÃO

As normas técnicas nacionais e internacionais, normas de segurança e boas práticas de mercado preveem a realização de intervenções nas instalações elétricas sem que haja energia presente, ou seja, em circuitos desenergizados, como descrito na norma regulamentadora nº10 em vigor no Brasil há algumas décadas [2]. Essa premissa é uma regra de conhecimento de todo profissional que atue no ramo elétrico, seja ele de qualquer das etapas da energia elétrica. Contudo, para que se alcance esse estado, há a necessidade da interação do homem com os equipamentos ou sistemas que permitem que se alcance essa condição em qualquer que seja o ponto de trabalho, sendo essa interação maior ou menor, a depender da tecnologia disponível na instalação. Essa interação, quando os recursos embarcados nos painéis e equipamentos de seccionamento de energia não são suficientes para que seja realizada de forma remota ou à uma distância segura, provoca uma exposição considerável aos profissionais que têm essa função, de forma que eles precisem se colocar diante desses elementos de manobra que, em muitos casos, possuem níveis de energia incidente máxima calculada suficientes para provocar lesões graves, mesmo que estejam presentes outras medidas de controle ou de

1/4

mitigação dos efeitos da perda da contenção dessa energia.

Como forma de se reduzir a exposição dos profissionais da área elétrica da VALE a esses agentes de risco, várias áreas da empresa se mobilizaram na busca e desenvolvimento de soluções que permitissem resultados satisfatórios.

O resultado desse processo foi uma parceria com uma empresa nacional (RECAF) que já possuía uma solução com a maioria dos requisitos mínimos, porém, assim como outras soluções identificadas no mercado mundial, o produto disponível possuía oportunidades de aperfeiçoamento que, prontamente foram identificadas, discutidas e aceitas pelo fabricante que, após alguns meses de desenvolvimento, conseguiu adaptar e disponibilizar o mesmo produto com todos os requisitos solicitados pela VALE. Tal produto, após os testes, ensaios e as demonstrações cabíveis, foi aprovado tecnicamente pela Engenharia da VALE, homologado junto à área de suprimentos e, posteriormente, adquirido em quantidade suficiente para que diferentes unidades da empresa pudessem iniciar o processo de disseminação e replicação da solução.

2.0 – DESENVOLVIMENTO

A preocupação com segurança dos seus empregados e a ocorrência de eventos com potencial de lesões graves fizeram com que a VALE direcionasse esforços e recursos para atividades cujos riscos são conhecidos e atividades com eletricidade estão dentro dessa classificação, internamente denominadas atividades críticas. Para todas as atividades mapeadas como críticas a empresa definiu uma série de requisitos mínimos baseados nas legislações e normatizações vigentes. Dentro da empresa, esses requisitos são conhecidos como Requisitos para Atividades Críticas (RAC). Trabalhos com eletricidade são identificados pelo algarismo 10, ou seja, são a décima área de atividades que possuem riscos significativos associados dentre todos os mapeados.

A RAC 10 – Trabalhos com eletricidade, em perfeito alinhamento com a NR10, define quais são as atividades que são regidas por essas regras e quais são as restrições impostas em cada etapa dos processos por elas delimitados.

Inicialmente, com o objetivo de atender a alguns requisitos da RAC 10 e de se reduzir a exposição dos profissionais da área elétrica aos riscos de choque e de arco elétrico durante uma das atividades reconhecidamente de maior criticidade nas instalações elétricas, as manobras de dispositivos de seccionamento foram elencadas como um dos cenários a ser estudado. Para tal cenário, a área de Engenharia de Inovação da VALE deveria buscar no mercado mundial,

soluções com potencial de redução da exposição aos riscos associados às atividades de manobras elétricas. Essa demanda, com origem no mapeamento realizado pela área de Saúde e Segurança Corporativa da VALE, após alguns meses de pesquisa, obteve como resultado alguns dispositivos com a função de realizar a inserção e extração de dispositivos de manobra como disjuntores e contatores, principalmente de Alta Tensão. Dentre esses dispositivos, destacaram-se dois, sendo um nacional e outro internacional. Numa análise preliminar, o dispositivo estrangeiro foi selecionado para uma prova de conceito. Como não haviam sido definidos requisitos mínimos para o equipamento, tendo em vista a melhor solução técnica, o dispositivo foi aprovado e homologado no sistema de cadastro de fornecedores e produtos previamente catalogados pela área de Suprimentos da VALE.



Figura 1 – Dispositivo de inserção e extração de disjuntores e contatores estrangeiro

Após a fase de homologação, iniciou-se a etapa de replicação da solução para as demais unidades da empresa. Nesse momento, procedeu-se uma análise das funções e recursos do dispositivo aprovado e homologado, resultando na necessidade da definição de requisitos mínimos que buscassem o atendimento à obsessão por segurança. Essa análise identificou baixa maturidade da avaliação da solução e sentiu a necessidade de definir indicadores mais robustos que buscassem obsessão por segurança, que é um dos nossos comportamentos-chave. Isso resultou em uma série de questionamentos referentes a possíveis fragilidades e à possibilidade de implementação de melhorias. Diante dessa constatação, um trabalho envolvendo profissionais de engenharia, manutenção e segurança do trabalho das diversas áreas da empresa (Minas, Portos e Ferrovias), onde requisitos mínimos de segurança, além de outros desejáveis, foram elencados e exaustivamente discutidos até que se

2/4

chegasse a uma relação considerada a mais segura para a empresa.

Entre os requisitos, podemos destacar os seguintes:

- Sensor de presença com proteção de 180°, que bloquee o acionamento do dispositivo quando uma pessoa estiver, no mínimo a 4m de distância;
- Sinalização visual de bateria fraca do dispositivo de manobra remota;
- Proteção para não executar manobra, se não houver autonomia da bateria;
- Não deve existir no dispositivo, a opção local para executar manobra;
- Proteção no controle de acionamento indevido (Acionamento de dois botões simultâneos na inserção e extração);

Na sequência os requisitos mínimos foram encaminhados para os fabricantes (homologado e potenciais). O fabricante estrangeiro, por sua vez, não se mostrou interessado em alterar seu projeto original e implementar as modificações definidas nos requisitos mínimos, propostas pela Vale S.A. O fabricante brasileiro, que já atua como fornecedor de componentes para disjuntores e contatores de diversas marcas de renome do setor elétrico, a RECAF, aceitou o desafio de adequar o seu produto para atender aos requisitos mínimos definidos pela Vale S.A.

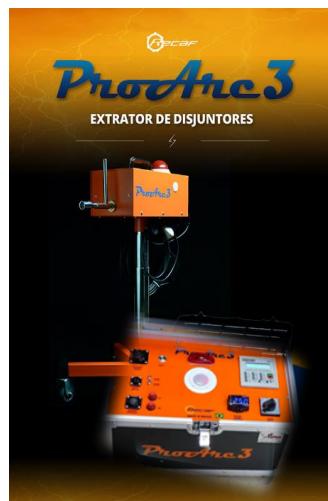


Figura 2 – Dispositivo de inserção e extração de disjuntores e contatores nacional customizado (PROARC3) [1]

A empresa RECAF entendeu a importância da demanda, tanto para a Vale quanto para o mercado mundial, e aceitou alterar o projeto original do seu produto já disponível no mercado, o PROARC 3, de forma a atender a todos os requisitos mínimos propostos pela VALE. O resultado dessa parceria foi uma nova versão do produto, ainda mais segura e com recursos adicionais que permitem, não só a sua utilização em mais de um modelo de disjuntor ou contator dentro de uma mesma Subestação,

como também oferece confiabilidade, praticidade e condições ergonomicamente mais favoráveis do que o modelo estrangeiro homologado anteriormente.

Após essa etapa de desenvolvimento, testes e validação, coube à equipe multidisciplinar reunida anteriormente, revogar a homologação do fornecedor estrangeiro e providenciar o registro da nova solução no sistema de cadastro de produtos da área de Suprimentos.

Como parte de um projeto de transformação de segurança pelo qual a empresa passa atualmente, 60 unidades desse dispositivo nacional, o PROARC 3 “adequado aos requisitos mínimos da Vale”, foram adquiridos e entregues para 03 unidades mapeadas previamente, como as de maiores potenciais de risco na empresa. Com os resultados obtidos na redução da exposição dos empregados da área elétrica dos sites onde esses dispositivos foram implantados, espera-se evidenciar os benefícios da solução dessa implementação para projetar em maior escala na empresa, os impactos nas instalações que ainda não passaram por um processo de revitalização, como forma de mitigação dos riscos associados às atividades de manobras elétricas de inserção e extração de disjuntores de painéis que não possuam esse recurso em seus projetos originais.

Um ponto a se destacar e que é muito significativo, é o “posta em marcha” das soluções desenvolvidas. Por melhor que sejam as soluções, é fundamental treinar os executantes (corretiva e preventiva), acompanhar a utilização das novas soluções, além de adequar os procedimentos ou instruções de trabalho. Isso é o básico do controle inicial. Somente isso fará com que as melhorias sejam inseridas nas rotinas de operação e tragam os resultados esperados.



Figura 3 – Treinamento e implantação de dispositivo PROARC3 em Subestação da VALE

3.0 – CONCLUSÕES

A adoção de soluções como a apresentada neste trabalho, permite que indústrias e empresas que possuam passivos em instalações elétricas, com investimentos relativamente baixos, obter condições de segurança muito superiores às condições originais, principalmente por se tratar de recurso adaptável a várias configurações e fabricantes, desde que sejam de movimentação realizada por sistema de fuso giratório.

O principal ganho é a retirada de, no mínimo, 250 profissionais de elétrica do risco de acidentes provocados por arcos ou choques elétricos. Apenas para dar noção de grandeza, o parque instalado em toda a Vale (sites Brasil) necessita de cerca de 320 unidades do dispositivo, que abrangerá uns 3000 pontos de manobra.

A busca por soluções de mercado, mesmo que parcialmente atendidas, mas que tenham como objetivo a redução de acidentes pela redução da exposição de profissionais, se mostra como uma excelente alternativa ao desenvolvimento de grandes projetos de eliminação dos referidos riscos. Sobretudo na área elétrica, que tendem a demandar recursos consideráveis e de implementação complexa que, por vezes, são despriorizados dos portfólios de investimentos das empresas, devido às dificuldades e prazo de implementação, ainda que representem atendimento à requisitos legais.

Além dos benefícios imensuráveis relativos à elevação da segurança das instalações e das operações nesses equipamentos, a solução apresentada se mostra versátil, de fácil manuseio e operação, proporcionando maior ergonomia e qualidade às atividades por não exigir a utilização de equipamentos de proteção majorados que dificultam manuseio de componentes, ferramentas e reduzem a visibilidade nos ambientes e equipamentos onde se vai atuar. Dessa forma, conclui-se que com dedicação, ciência, criatividade, foco e boas parcerias, pode-se alcançar resultados notáveis que podem fazer com que os processos produtivos sejam ainda mais sustentáveis, principalmente pela priorização da preservação da saúde e integridade das pessoas que fazem com que as instalações elétricas de empresas e indústrias continuem desempenhando seu papel previsto em projeto, fornecer energia de forma segura e confiável a equipamentos e processos.

e João José Barrico de Souza. Editora LTr, 2005, Rio de Janeiro, RJ.

4.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] *Manual RECAF – Proteção contra Arco Voltaico*. RECAF COMERCIAL E TECNICA LTDA, São Bernardo do Campo – SP. www.recaf.com.br

[2] *Manual de auxílio na interpretação e aplicação da nova NR-10*. Joaquim Gomes Pereira



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

[EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E SEGURANÇA]

Manuel Maria Polainas Bolotinha

Mestre em Engenharia Elétrica e Engenheiro Eletricista –

Consultor Sênior (Profissão Liberal)

manuelbolotinha@gmail.com

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo evidenciar a importância para a Segurança das Especificações Técnicas dos equipamentos elétricos e apresentar os procedimentos que devem ser seguidos para que o projetista elabore aquelas especificações de acordo com os requisitos aplicáveis.

1.0 – INTRODUÇÃO

Os equipamentos elétricos que integram as instalações elétricas, sejam de baixa, média ou alta tensão, públicas ou privadas, têm um papel chave na segurança de pessoas e bens, o que é muitas vezes ignorado.

É raro ler num jornal generalista ou ouvir no noticiário televisivo a afirmação, de que a principal causa do acidente "X", originado no equipamento elétrico "Y", e da sua gravidade, foi o não funcionamento, por exemplo, do(s) equipamento(s) elétrico(s) "N1(N2... Nn)", sendo essa responsabilidade atribuída ao equipamento "Y", que diretamente fez deflagrar um incêndio.

O Capítulo 2 ilustra um acidente provocado pelo defeito/falha de equipamentos devido a erro das especificações, que contempla uma situação de defeito de semelhante à referida no parágrafo anterior, o que permite avaliar as consequências de falta ou defeitos nas especificações.

Acidentes **mais ou menos graves** podem acontecer por *defeito(s) na especificação, seleção errada, instalação defeituosa, falta de manutenção ou utilização/manobra inadequada dos equipamentos elétricos* (daqui em diante apenas serão referidos como "equipamentos").

2.0 – ACIDENTE ORIGINADO POR FALTA OU DEFEITO DA ESPECIFICAÇÃO

Neste capítulo apresenta-se um exemplo de acidente causado por um determinado equipamento, provocado pela falta de funcionamento ou operação de outro equipamento, com o primeiro interligado, mal especificado.

Este exemplo permite avaliar a importância das **Especificações Técnicas (ET)** dos equipamentos como medida de segurança.

Os valores apresentados no exemplo não correspondem a qualquer situação real, sendo fruto da minha inspiração, mas coerentes. Saliento que a situação descrita é bastante frequente.

Devido a uma ampliação das instalações, **45%** do tempo a *corrente de serviço num cabo elétrico* é cerca de **15% superior à sua corrente máxima admissível**, para as condições de montagem, o que significa que durante esse período de tempo o cabo está em **sobrecarga**, e nos restantes **55%** do tempo a corrente de serviço é cerca de **85%** da corrente máxima admissível do cabo, nas mesmas condições de instalação.

Independentemente de o cabo estar mal dimensionado para a nova realidade (mas isso é "outra história"), acontece que o novo disjuntor de proteção do cabo foi regulado, de acordo com o indicado na respectiva ET para apenas atuar quando a corrente de serviço for **20%, ou mais, superior à corrente máxima admissível do cabo**, comprovando-se que a **corrente de regulação do disjuntor foi mal especificada**.

Nestas condições a isolação do cabo sofreu danos devido a **sobreaquecimento** provocado pela sobrecarga (**lei de Joule**) e causou um curto-círcuito, que deu origem a um incêndio de grandes proporções, colocando vidas humanas em risco e com elevados danos materiais.

Deixando de parte o mau dimensionamento do cabo, que não foi a causa direta do acidente,

reconhece-se que foi a má regulação do disjuntor, fruto de uma ET incorreta, que originou o incêndio.

3.0 – RESPONSABILIDADES E RESPONSÁVEIS

Para que haja sucesso em qualquer atividade, considero ser indispensável que desde o início do trabalho seja feita a definição clara e inequívoca das responsabilidades, dos responsáveis e da área/installação, o que nem sempre acontece.

A definição e especificação dos diversos tipos de equipamentos é da responsabilidade do engenheiro eletricista que tem o encargo de realizar o **projeto executivo** (daqui em diante apenas será referido como "projeto"), engenheiro que deve ser devidamente **credenciado** e ter **experiência** comprovada em projetos semelhantes.

No Brasil a credenciação dos engenheiros é da responsabilidade do CONFEA (*Conselho Federal de Engenharia e Agronomia*) e dos CREA (*Conselho Regional de Engenharia e Agronomia*) no Brasil, e em Portugal da *Ordem dos Engenheiros* (OE) ou da *Ordem dos Engenheiros Técnicos* (OET) em Portugal, nas quais os técnicos devem estar inscritos, pese embora em Portugal o documento legislativo que, por imposição de Bruxelas (*União Europeia – UE*) e da OCDE, pretende limitar as atribuições das Ordens Profissionais, aceitando, implicitamente, que pessoas não credenciadas tenham a mesma possibilidade do que os técnicos inscritos na OE ou na OET.

Ainda em Portugal existe um órgão da Administração Pública Portuguesa, a *Direção-Geral de Energia e Geologia* (DGEG), que é a entidade que autoriza que a instalação elétrica de um determinado empreendimento seja ligada à infraestrutura da rede pública de **Média** (MT) e **Baixa Tensão** (BT) [$1 \text{ kV} < V < 60 \text{ kV}$, onde "V" representa a tensão ou voltagem] ou à rede primária de **Alta** (AT) e **Extremamente Alta Tensão** (EAT) [$V \geq 60 \text{ kV}$, onde "V" tem o significado anteriormente referido]; os técnicos devem estar inscritos na DGEG para, entre outras atividades, assinar projetos.

De acordo com a tipologia e complexidade da obra, o projeto das instalações elétricas pode ser dividido por tipo de instalação elétrica/ou nível(eis) de tensão; neste caso a responsabilidade (não civil) pela elaboração do projeto das instalações elétricas e pelo cumprimento dos prazos estabelecidos é do coordenador das equipas de projeto elétrico.

Do ponto de vista formal, o responsável pelo projeto é sempre o seu autor, que em Portugal deve assinar um *Termo de Responsabilidade* (TR), embora na generalidade essa responsabilidade seja transferida para a entidade empregadora do engenheiro eletricista.

Contudo, se existirem danos pessoais graves, que podem atingir a morte, e/ou danos patrimoniais ou autor do projeto será chamado a responder pelos danos causados sempre que justificadamente, e sem margem para dúvidas, se comprove que os danos foram causados por erros do projeto, que inclui a especificação dos equipamentos.

Tratando-se de uma obra complexa, com intervenção de várias áreas da engenharia (*civil - estruturas; civil - águas e esgotos; eletricidade - energia e sistemas de potência; eletricidade - comunicações; mecânica – AVAC [Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado]*) é necessário que o **Dono de Obra** (D.O.) nomeie uma equipe multidisciplinar para a elaboração do projeto e acompanhamento dos trabalhos, serviços que podem ser contratados exteriormente, mediante concurso ou serem trabalhadores, com as competências necessárias, da mesma instituição que o D.O.

A equipa multidisciplinar deverá ter um coordenador geral que, em última instância, é o responsável pela elaboração do projeto, do cumprimento do prazo, da coordenação com os outros projetistas e de garantir que o projetado corresponde ao estabelecido pelo D.O.

Termino este capítulo dedicado às responsabilidades lembrando que o D.O. tem a responsabilidade de fornecer à equipa projetista todos os elementos necessários à elaboração do projeto, que tenha em seu poder, ou que se comprometeu obter.

A título de exemplo refiro o "estudo geológico do terreno onde serão implantadas as novas instalações", a "resistividade elétrica do solo", os projetos de construção civil do(s) edifício(s) a manter e os projetos (se possível "como construído" [*as-built*]) das instalações existentes das diversas instalações

4.0 – A PREPARAÇÃO DA ESPECIFICAÇÃO

A preparação da ET dos equipamentos pressupõe o conhecimento do local de implementação da obra e dos diversos parâmetros que deverão ser considerados na elaboração das diversas ET.

Alguns desses parâmetros necessitam de ser calculados, pelo que os cálculos são uma componente importante para o trabalho de especificação.

Considero que o projetista encarregue de elaborar as ET deve conhecer o seguinte:

a) *Equipamento:*

- Função.
- Tipo de montagem (no solo ou apoiado em estrutura; interior ou exterior).
- Condições de instalação (exemplos: na **vizinhança de fontes de calor** ou em **áreas sujeitas a temperaturas elevadas; ambiente**

2/4

- corrosivo; área com atmosfera explosiva [ATEX], zona 1 [classificação de acordo com diretivas da UE]).
- Valores e características normalizadas de fabrico.
- b) *Parâmetros elétricos e estrutura da rede elétrica:*
- Configuração da rede (radial; anel simples; duplo anel; mista).
 - Regimes de neutro.
 - Voltagens, correntes e frequência nominais.
 - Valor da corrente de curto-círcuito (trifásico; fase-fase; fase-terra), nos diversos níveis de tensão da instalação.
 - Valores da queda de tensão nos pontos estratégicos da instalação.
 - Dimensionamento de transformadores e geradores de emergência, se existirem.
 - Cálculo das correntes de curto-círcuito.
 - Dimensionamento da rede de terras
 - Escolha da solução do SPS - sistema de proteção contra surtos (descargas atmosféricas e sobretensões de manobra) - de acordo com o nível de tensão, a função e o tipo e constituição da instalação a proteger e respetivo dimensionamento.
 - Cálculo do factor de potência em cada um dos níveis de tensão e da globalidade da instalação.
 - Determinação da "Distorção Harmônica Total" (THD – Total Harmonic Distortion).
 - c) *Características Geográficas e Ambientais:* Altitude e distância ao mar (m; km).
 - Nível de poluição ambiental e industrial, indicando neste último parâmetro os gases presentes e a sua proporção (%).
 - Temperaturas máximas, médias e mínimas (°C).
 - Direção habitual do vento e velocidades média e máxima (km/h).
 - Atividade sísmica (preferencialmente de acordo com a **escala de Richter**).
- d) *Normas, regulamentos e outros documentos aplicáveis.*
- e) *Tipo, função e características do(s) equipamento(s) que interaja(m) com o equipamento objeto da ET.*

5.0 – A ELABORAÇÃO DA ESPECIFICAÇÃO

A elaboração da ET de um equipamento deve ser feita de acordo com os critérios referidos no capítulo anterior, tendo como objetivo garantir que as suas características cumprem os requisitos legais, do D.O. e de aplicabilidade, constituindo um dos elementos de segurança da instalação elétrica.

A ET deve incluir o seguinte:

1. O tipo de equipamento, a sua função e as características construtivas, indicando as

- medidas de proteção contra o choque elétrico e o *arc flash* (muito relevante em quadros elétricos MT).
2. Tipo de montagem (interior/exterior; apoiado no solo/em estrutura) e caracterização do local de instalação do equipamento.
 3. Características geográficas e ambientais do local de instalação, onde se inclui a indicação da poluição expectável e se é uma área ATEX e a respectiva zona.
 4. Características elétricas da rede/instalação elétrica onde o equipamento será inserido (tensão, corrente e frequência; valores das correntes de defeito [correntes de curto-círcuito]; valor e natureza da tensão de comando e controlo; regimes de neutro; outras indicações relevantes).
 5. Características elétricas nominais do equipamento (tensão, corrente e frequência; potência e perdas máximas admissíveis, caso se justifique; corrente de curto-círcuito máxima admissível; poder de corte, conforme o tipo e função do equipamento [corrente nominal; corrente capacitativa; corrente de curto-círcuito]).
 6. Ligação à terra, rede de terras e SPS e DPS (dispositivo de proteção contra surtos) recomendados.
 7. Definição dos sistemas de comando, controlo e medida e de proteções elétricas, se aplicável, incluindo os respectivos esquemas base.
 8. Interacção com outros equipamentos e/sistemas elétricos e mecânicos.
 9. - Índices de proteção contra a penetração de líquidos e corpos sólidos (índice **IP** – norma IEC 60529) e de resistência aos impactos mecânicos (índice **IK** – norma IEC 62262).
 10. - Ensaios de recepção em fábrica (**FAT – Factory Acceptance Tests**).
 11. Normas e regulamentos aplicáveis, bem como outros documentos que devem ser atendidos, designadamente procedimentos e especificações técnicas específicas da companhia fornecedora de energia elétrica e do D.O.
 12. No Brasil devem ser atendidas as normas NR e ABNT/NBR, designadamente as NR 10, NBR 5410, NBR 5460, NBR 5419, NBR 5460 e NBR 14039.
 13. Relação das peças escritas e desenhadas a entregar pelo fabricante/fornecedor (no mínimo: descriptivo do equipamento, relatórios de ensaios, manuais de operação e manutenção, lista de peças de reserva, planta e alcados e esquemas de princípio, unifilares e de eletrificação).
 14. Requisitos do transporte (se aplicável).

6.0 – CONCLUSÕES

A utilização de equipamentos devidamente concebidos para o fim a que se destinam e corretamente dimensionados é um dos mais importantes fatores da segurança das instalações elétricas, evitando o seu mau funcionamento e a ocorrência de acidentes, que afetam pessoas e bens.

Este objetivo só é alcançado se os equipamentos forem objeto de uma ET cuidadosa e detalhadamente elaborada, considerando, entre outros fatores, as características do equipamento e da instalação elétrica onde se insere e as normas e regulamentos aplicáveis.

Utilizando um ditado popular, lembro que "o barato sai caro".

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Não aplicável.

O trabalho foi elaborado exclusivamente com base da experiência e conhecimentos práticos do autor, membro sênior da OE.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

Implementação de Ensaio de Isolação Elétrica com Alta Tensão em Andaimes Isolantes de Acordo com a Norma ASTM F711

André L. C. França

Eletrobras Eletronorte

andre.franca@eletronorte.com.br

Marcelo M. Costa

Eletrobras Eletronorte

marcelo.melo@eletronorte.com.br

Thiago B. P. Souza

Eletrobras Eletronorte

thiago.brito@eletronorte.com.br

RESUMO

Este artigo mostra a implementação de ensaio de isolação elétrica de andaimes isolantes para uso em áreas de risco elétrico a partir da adaptação de um estrutura de laboratório já existente para realização de ensaios semelhantes em varas de manobra e bastões isolantes. São mostrados detalhes da infraestrutura e dos equipamentos de ensaio, incluindo o estabelecimento da rastreabilidade aos padrões metrológicos. Também são apresentados os resultados dos primeiros ensaios realizados.

1.0 – INTRODUÇÃO

Devido à grande dependência da humanidade pela eletricidade, é fundamental que o sistema elétrico opere com o menor número possível de interrupções, sendo que, nesse cenário, as manutenções devem ser realizadas sempre que possível com os equipamentos energizados (manutenção em linha viva). Para garantir a segurança dos operadores e mantenedores nessas manutenções sem desligamento, os equipamentos de proteção individual e coletiva (EPIs e EPCs) utilizados pelas equipes devem ser ensaiados periodicamente para verificação de sua correta isolação elétrica ou desempenho, conforme exigido pela Norma Regulamentadora NR-10 [1].

O Centro de Tecnologia e Inovação da Eletrobras Eletronorte – LACEN é a unidade da empresa que realiza os ensaios elétricos periódicos nos EPIs e EPCs utilizados pelos seus profissionais em suas atividades de operação e manutenção, como luvas isolantes, detectores de tensão e varas e bastões de manobra. No caso dos andaimes isolantes, seu ensaio foi implementado recentemente, em 2022, de acordo com os requisitos da norma ASTM F711.

A ASTM F711 é uma norma internacional que estabelece requisitos para hastes e tubos construídos de plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) utilizados em ferramentas de uso em linha viva, incluindo os ensaios de tipo e periódicos. O LACEN a utiliza em seus ensaios em varas de manobra e bastões isolantes empregados em serviços com equipamentos energizados. Para os ensaios dos andaimes isolantes, essa norma também foi utilizada, realizando-se algumas adaptações no Laboratório. Nesse ensaio, uma tensão elétrica alternada de amplitude 50 kV RMS é aplicada em cada haste do andaim, por um período de 1 minuto, medindo-se a corrente de fuga, a qual deve ser menor do que um valor limite especificado pela norma.

Este artigo apresenta o processo de implantação do ensaio de isolação elétrica de andaimes isolantes no Centro de Tecnologia e Inovação da Eletrobras Eletronorte. A seção 2 descreve as principais características dos andaimes, enquanto na seção 3 são mostrados os requisitos da norma ASTM F711 para os ensaios. Na seção 4 são mostradas a infraestrutura montada, incluindo os equipamentos de ensaio e a garantia da rastreabilidade. Por fim, na seção 5, são mostrados os resultados dos primeiros ensaios realizados no Laboratório e na seção 6 são apresentadas algumas conclusões.

2.0 – ANDAIMES ISOLANTES

O andaime isolante vem se tornando um equipamento indispensável nas manutenções em instalações elétricas energizadas de alta e extra alta tensão, principalmente, em subestações. Ele é utilizado para sustentar os eletricistas para execução dos serviços em locais elevados, pelos métodos à distância e ao potencial, facilitando a manutenção dos equipamentos do sistema elétrico. Proporciona mobilidade aos trabalhadores, bem como facilidades para utilização de ferramentas e

1/4

materiais. Seu uso é de caráter provisório, ou seja, após o final da manutenção, deve ser desmontado e retirado da instalação elétrica.

O andaime é constituído de peças tubulares ou bastões encaixáveis e intercambiáveis, fabricadas em PRFV e com conexões de metal. Em geral, seu peso é reduzido e são de fácil montagem [2]. A figura 1 mostra um andaime isolado sendo utilizado em uma instalação elétrica de alta tensão. À medida em que é utilizado, os bastões e o seu material sofrem degradações, causadas por diversos agentes, tais como abrasões, oxidação, arranhões, líquidos corrosivos, dentre outros. Sob essas condições, tanto as propriedades mecânicas quanto as elétricas dos bastões de PRFV podem ser prejudicados, aumentando o risco de defeito no bastão [3].



Figura 1: Andaime isolado em uso [2].

3.0 – NORMA ASTM F711

Estão disponíveis atualmente algumas normas que estabelecem ensaios e requisitos de desempenho para tubos, hastes ou bastões com finalidade de isolação elétrica, publicadas por entidades como a IEC e a ASTM [4],[5]. A norma ASTM F711 estabelece os requisitos quanto às características técnicas e os métodos de ensaio para bastões isolantes e tubos construídos de feitos de PRFV e preenchidos com espuma isolante, destinados ao uso em ferramentas de linha viva. A norma não inclui tubos e bastões preenchidos com espuma isolante feitos de outros materiais, bem como acessórios e fixações para os bastões e tubos preenchidos com espuma. De maneira geral, devem ser realizados ensaios para avaliar as seguintes propriedades mecânicas e elétricas: absorção, deflexão por flexão, esmagamento horizontal, tensão, cisalhamento, compressão, módulo de elasticidade e envelhecimento mecânico; e corrente dielétrica e vazamento [6].

O LACEN utiliza a ASTM F711 nos ensaios de isolamento elétrico em bastões isolantes e varas de manobra. Nesse ensaio, são marcadas em cada bastão seções de 15 cm de comprimento, por toda a extensão dele. Após acondicionamento do bastão

em temperatura maior do que 20 °C e umidade relativa do ar menor do que 75 %, monta-se o arranjo mostrado na Figura 2, onde o bastão é suspenso em relação ao piso do laboratório através de estrutura isolante. Em cada seção, aplica-se em uma extremidade, utilizando uma fonte de alta tensão, uma tensão de 50 kV RMS, partindo do zero a uma razão de 1 kV/s, e na outra extremidade mede-se a corrente dielétrica com um amperímetro. A medição da corrente deve ocorrer após 1 min de aplicação da tensão de 50 kV RMS. Repete-se o procedimento para todas as seções de 15 cm do bastão. Ao término das medições, calcula-se a corrente de fuga média do bastão, a qual deverá ser inferior a determinado limite máximo, definido em função do tipo de bastão (bastão seccionável ou vara de manobra telescópica) e do diâmetro externo do bastão. Por exemplo, para bastão seccionável de diâmetro externo de 12,7 mm (1/2 polegada), o limite máximo de corrente é 6 µA. Esses limites de corrente variam de 5 µA até 28 µA.

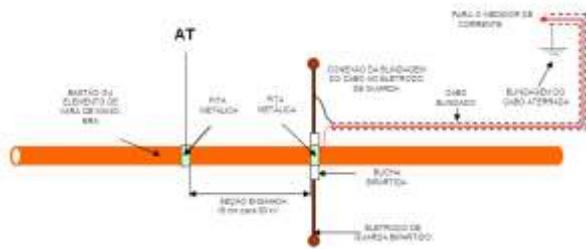


Figura 2: Arranjo para ensaio de bastões isolantes.

4.0 – IMPLEMENTAÇÃO DO ENSAIO

Para implementação do ensaio em andaimes isolados, utilizou-se basicamente a estrutura existente utilizada na realização de ensaios em varas de manobra bastões isolantes.

No ensaio dos andaimes isolados, a aplicação da alta tensão e medição da corrente de fuga é realizada em cada segmento que constitui um módulo encaixável do andaime. Na prática, considera-se cada um desses segmentos como um bastão isolante. Devido às maiores dimensões e peso desses módulos em relação aos bastões e varas de manobra, a área de ensaio teve que ser aumentada em duas vezes, e as estruturas de sustentação utilizadas com varas de manobra foram reforçadas para sustentação do peso maior dos módulos.

Os equipamentos utilizados foram uma fonte de alta tensão até 100 kV, um multímetro digital de bancada de 6 ½ dígitos para medição da corrente de fuga, um termohigrômetro com memória para registro das condições ambientais, um cronômetro para medição do tempo de aplicação de tensão de ensaio de 50 kV RMS de 1 min, e uma régua para marcação das seções de 15 cm nos segmentos dos andaimes. Além desses equipamentos, também se utilizou um quilovoltímetro até 100 kV, calibrado na Rede Brasileira de Calibração (RBC), para calibrar a fonte de alta tensão Hipotronics, garantindo assim

a rastreabilidade em alta tensão. Os demais equipamentos também são calibrados na RBC. As figuras 3 até 6 mostram detalhes da montagem do circuito de ensaio, dos equipamentos e dos acessórios utilizados.



Figura 3: Montagem do ensaio de andaimes isolados no laboratório.



Figura 4: Detalhe do eletrodo.



Figura 5: Equipamentos de ensaio: fonte de alta tensão, multímetro digital de bancada, régua e cronômetro.



Figura 6: Quilovoltímetro utilizado para estabelecimento da rastreabilidade metrológica aos ensaios.

Para avaliação da conformidade, calcula-se a média aritmética das correntes de fuga medidas em todas as seções de um mesmo bastão ou segmento de vara de manobra, e compara-se essa média ao valor limite. O bastão ou segmento estará conforme se o valor médio for inferior a esse limite. Para avaliação da conformidade dos andaimes isolados, considera-se como unidade do equipamento ensaiado um módulo e calcula-se a corrente média através da média aritmética das correntes medidas em todas as seções de 15 cm de todos os bastões que formam o módulo. Os valores limites são os mesmos utilizados na avaliação de bastões e segmentos de vara de manobra.

Para garantir a confiabilidade e a qualidade das medições de corrente de fuga, deve-se atentar para o medidor que corrente que será empregado. As correntes medidas são da ordem de unidades de microampères AC, e poucos modelos de medidores de corrente ou multímetros possuem faixa de medição adequada para valores tão pequenos. Os multímetros digitais portáteis mais comuns disponíveis no mercado possuem como menor faixa de medição, na função corrente alternada, 20 mA ou semelhante, o que torna a medição de microampères imprópria.

5.0 – RESULTADOS DE ENSAIOS

Os resultados dos ensaios realizados têm mostrado uma tendência de conformidade dos andaimes isolados em relação aos limites definidos pela norma. As correntes medidas estão na ordem de 55 % até 80 % do valor máximo exigido. O gráfico da Figura 6 ilustra a distribuição dos valores de corrente de fuga medidos nos andaimes isolados.

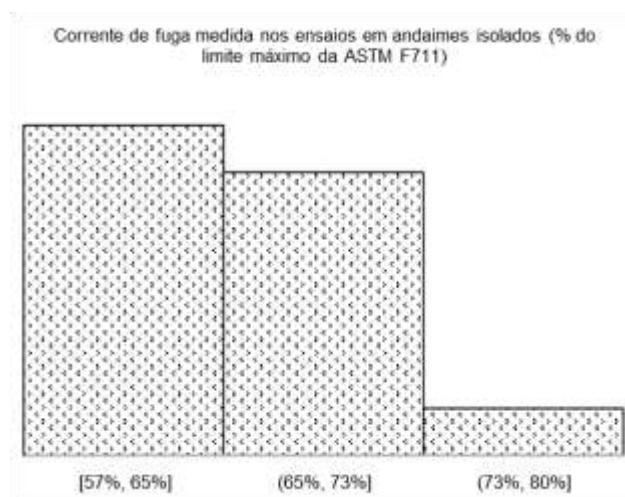


Figura 7: Correntes de fuga medidas nos ensaios.

6.0 – CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a implementação do ensaio de isolação elétrica de andaimes isolados para utilização em áreas de risco elétrico no Centro de Tecnologia e Inovação da Eletrobras EletroNorte, a qual foi realizada a partir da estrutura já existente de ensaio em varas de manobra e bastões isolantes. Esse ponto de partida de uma estrutura já existente foi primordial para a implementação do novo ensaio, pois grande parte dos materiais e equipamentos necessários já estava disponível, sendo necessária apenas algumas adaptações. Foi ressaltada a importância da utilização de medidores de corrente com características adequadas à medição de correntes de poucos microampéres, sob pena de inutilizar a confiabilidade da medição das correntes de fuga nos ensaios.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *Norma regulamentadora nº 10 - Segurança em instalações e serviços em eletricidade.* Acessado em 28/06/2023 de: <https://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr10.htm>.
- [2] *Andaime modular isolante.* Acessado em 28/06/2023 de: <https://www.ritzbrasil.com/produtos/ferramentas-mantencao-sistemas-eletricos/plataformas-escadas-e-andaimes-isolantes/1-andaime-modular-isolante/>.

[3] Zhao, DeYong P., Kuffel, E. "Experimental investigation of ageing effect on the dielectric performance of FRP sticks". *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, vol.1, junho 1996, pg. 304-307.
doi: 10.1109/ELINSL.1996.549342.

[4] Jordan, T. "Periodical tests of Hot Sticks – survey about differences in requirements, test procedures and test criteria of different standards and rules". *13th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM)*, junho 2022, pg. 1-5.
doi: 10.1109/ICOLIM56184.2022.9840694

[5] *Inspection and testing of tools, equipment and training for live-line work on overhead lines.* Brochura técnica CIGRÉ 865, 2022.

[6] *Standard Specification for Fiberglass-Reinforced Plastic (FRP) Rod and Tube Used in Live Line Tools.* ASTM Standard F711, 2017.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

O PAPEL DO LABORATÓRIO DE ENSAIOS EM EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO NA GARANTIA DA SEGURANÇA E DA SAÚDE DOS EMPREGADOS DA ELETROBRAS ELETRONORTE

André Luis Costa França
Eletrobras Eletronorte

Marcelo Melo da Costa
Eletrobras Eletronorte

Thiago Brito Pereira da Silva
Eletrobras Eletronorte

andre.franca@eletronorte.com.br marcelo.melo@eletronorte.com.br thiago.brito@eletronorte.com.br

RESUMO

O Laboratório de Ensaios em Equipamentos de Proteção da Eletrobras Eletronorte tem importante papel na garantia da segurança dos trabalhadores da empresa. Criado inicialmente para realizar testes para garantir a qualidade dos equipamentos de proteção individual (EPI) e coletiva (EPC) fornecidos à empresa, hoje o laboratório possui o papel de atendimento a critérios da NR10 no que se refere a testes de isolamento dos EPI e EPC utilizados por sua força de trabalho, bem como papel estratégico para a indústria de equipamentos de segurança do país, realizando ensaios de tipo para solicitação de certificados de aprovação (CA) de equipamentos como botas, capacetes, luvas isolantes e vestimentas condutivas, sendo este último o laboratório responsável pelos ensaios elétricos da grande maioria dos CA emitidos para este tipo de EPI no Brasil. Este artigo apresenta o Laboratório de Ensaios em Equipamentos de Proteção da Eletrobras Eletronorte, enfocando os ensaios realizados e a infraestrutura existente, e discutindo alguns dos resultados encontrados em ensaios.

1.0 – INTRODUÇÃO

O Laboratório de Ensaios em Equipamentos de proteção individual e coletiva da Eletrobras Eletronorte, localizado em Belém/PA, realiza ensaios de isolamento elétrico e de desempenho nos mais diversos equipamentos de proteção (individual – EPIs e coletiva – EPCs) utilizados pelos empregados da empresa em suas atividades que envolvem risco elétrico, tais como luvas isolantes, varas e bastões de manobra e vestimentas condutivas para trabalho ao potencial elétrico. A finalidade desses ensaios é garantir a qualidade e a confiabilidade dos equipamentos quando do seu recebimento após compra, antes de

serem utilizados, e durante a sua vida útil (ensaios periódicos).

O Laboratório foi concebido em meados dos anos 1980, pela necessidade de garantir a confiabilidade dos equipamentos de proteção e por consequência garantir a segurança dos seus trabalhadores. Naquele momento, inclusive, observava-se o recebimento de equipamentos de baixa qualidade nos processos de compra. Desde então ele vem se aprimorando, agregando novos ensaios e instrumentos de teste conforme a necessidade da empresa, e para atendimento aos requisitos da Norma Regulamentadora nº 10 (NR-10), especialmente do item 10.2.4.e, que cita a necessidade de constar no prontuário das instalações os resultados dos testes de isolamento que são periodicamente realizados nos EPI e EPC [1].

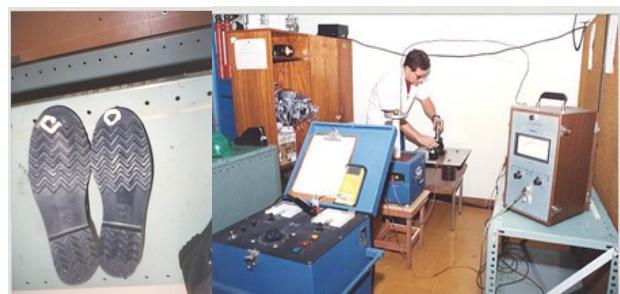


Figura 1: Registro fotográfico dos primeiros ensaios realizados no laboratório.

Nessa evolução, o Laboratório foi credenciado pelo Ministério do Trabalho para realização de ensaios para retirada de certificado e aprovação (CA) por fabricantes e importadores de equipamentos de proteção, e acreditado pela CGCRE/INMETRO de acordo com os requisitos da norma ABNT ISO/IEC 17025 para realização de ensaios no âmbito da Rede Nacional de Laboratórios de Ensaio (RBLE). Atualmente, o laboratório não está mais credenciado e

acreditado, mas continua realizando ensaios de acordo com os requisitos das normas relevantes, em equipamentos como luvas e botas isolantes, capacetes, varas de manobra, vestimentas condutivas, cordas isolantes, tapetes isolantes, mantas para trabalho em linha viva, além de ter de estar constantemente aumentando o portfólio, como por exemplo a recente adição de ensaios em andaimes isolantes.

2.0 – INFRAESTRUTURA E ENSAIOS

Para realização dos ensaios, o laboratório possui os seguintes instrumentos de teste:

- um quilovoltímetro até 100 kV;
- uma fonte de alta tensão até 100 kV com medição de tensão aplicada;
- uma fonte de alta tensão até 100kV com medição de tensão aplicada e medição da corrente que passa pelo objeto sob teste;
- multímetros digitais de bancada e de mão, os quais são usados diretamente nos ensaios;
- instrumentos auxiliares, como réguas, fontes DC, termohigrômetros e cronômetros.

Todos os instrumentos são calibrados em intervalos regulares em laboratórios da Rede Brasileira de Calibração (laboratórios acreditados) ou no próprio INMETRO. As figuras 2 e 3 mostram detalhes de ensaio em vestimenta condutiva e dos equipamentos utilizados.



Figura 2: Ensaio em vestimenta condutiva.



Figura 3: Equipamentos utilizados em ensaios.

A metodologia de ensaio dos diversos equipamentos é, de maneira geral, bastante semelhante: quando se trata de determinação da isolação elétrica dos equipamentos, aplica-se alta tensão durante um período, de acordo com a norma que regulamenta o método de teste do equipamento, (geralmente de 1 min até 3 min, dependendo do tipo do equipamento ou se ele é novo ou usado) e mede-se a corrente de fuga e/ou observa-se se haverá a ruptura da sua isolação elétrica. Já para o ensaio de desempenho de detectores de ausência de tensão, a metodologia consiste em submeter o equipamento a várias tensões até a tensão máxima e verificar o seu correto funcionamento. Por fim, também são realizados testes em vestimentas condutivas para o trabalho ao potencial, onde é necessário determinar a eficiência da blindagem da vestimenta, a resistência elétrica de seus componentes, a resistência elétrica de contato entre as peças da roupa e capacidade de condução de amostras do tecido condutivo.

A tabela 1 mostra exemplos de tensões de ensaio e os critérios de conformidade para alguns equipamentos de proteção.

3.0 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

As figuras 4 e 5 mostram os dados gerais da produção do laboratório de ensaios de equipamentos de segurança num período de 20 anos (1996 a 2016). A Figura 4 mostra a quantidade de ensaios realizados neste período. A figura 5, mostra a taxa de rejeição no mesmo período.

Tabela 1: Exemplos de EPI ensaiados [2]-[4].

Equipamento	Norma utilizada	Tensão de ensaio	Critério de conformidade
Luva isolante	ABNT NBR 16295	de 2,5 kV (classe 00) até 40kV (classe 4)	Em função da classe de isolação e tamanho da luva, de acordo com a tabela 4 da ABNT NBR 16295:2014. Exemplo: Classe 00 280mm: $I < 5 \text{ mA}$ Classe 4 460mm: $I < 24 \text{ mA}$
Vara de manobra	ASTM F711	50 kV em cada segmento de 15 cm	Em função do diâmetro, exemplo: $I < 6 \text{ mA} @ \text{diâmetro } 1 \frac{1}{4}^{\prime\prime}$ $I < 8 \text{ mA} @ \text{diâmetro } 1 \frac{1}{2}^{\prime\prime}$
Tapete isolante	ASTM D178	10 kV @ classe 1 20 kV @ classe 2	Não deve haver rompimento da isolação elétrica

I: corrente de fuga

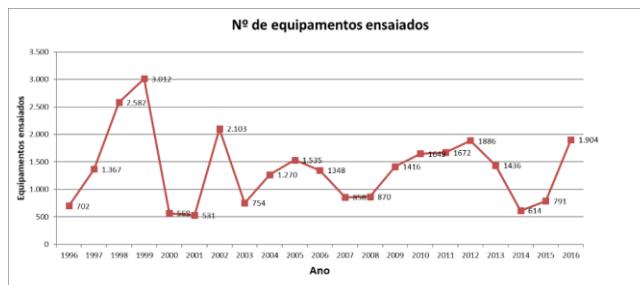


Figura 4: Quantidade de equipamentos ensaiados no período de 1996 a 2016.

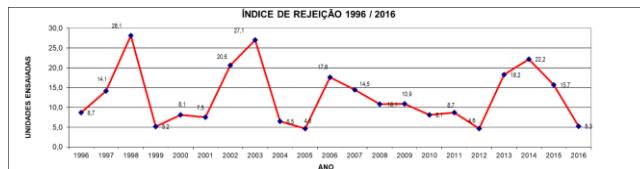


Figura 5: Índice de rejeição de equipamentos em ensaios, em %.

Em relação às falhas encontradas nos equipamentos submetidos aos ensaios, fica evidente que, apesar de inconstante, em alguns anos a taxa de rejeição ficou acima de 20%, que pode ser considerada uma taxa acima do esperado. Adicionalmente, alguns casos merecem destaque como por exemplo os testes realizados em um conjunto de tapetes isolantes com marcação declarando conformidade com a classe 2 ASTM D178-19 (uso até 17 kV, ensaio em 20 kV). Essa norma determina uma espessura mínima para que o tapete se enquadre nas classes (e consequentemente tenha suportabilidade à tensão para ela estabelecida). Em inspeção inicial, notou-se que a espessura do material era correspondente a tapetes isolantes de classe 1 (uso em 7,5 kV, ensaio em 10 kV). Os tapetes, ao serem ensaiados, não suportaram níveis de tensão sequer da classe 1. Casos como esse devem servir de alerta para os profissionais da segurança do trabalho: a simples indicação de marcação no EPI/EPC não é garantia suficiente de que aquele equipamento está de fato adequado ao uso.

Os prejuízos causados por equipamentos em não conformidade após ensaios são inúmeros. O principal deles é o risco a vida humana dos usuários de equipamentos sem garantia de isolamento. Outros prejuízos estão associados a atrasos no fornecimento de equipamentos para área produtiva, multas e eventuais cancelamento de contratos de fornecimento destes equipamentos.

4.0 – CONCLUSÕES

Diante das taxas de rejeição de equipamentos apresentadas, inclusive de equipamentos novos, fica evidente que é importante que o profissional de segurança do trabalho tenha consciência que a simples marcação no EPI/EPC não é garantia suficiente para que este esteja adequado ao uso: falhas no processo de fabricação, armazenamento,

transporte ou até mesmo má fé podem ser fatores que influenciem nas taxas de rejeição encontradas.

Fica evidente também que muitos prejuízos financeiros podem ser evitados realizando testes de aceitação dos EPI e EPC no ato de recebimento, associando-se o pagamento ao fornecedor à aprovação nestes ensaios. Mais importante ainda, tal procedimento serve para mitigar a ocorrência de acidentes ocasionados por falhas do equipamento, que deve ser a última barreira de proteção ao que mais importa: a vida do trabalhador.

5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Brasil, Ministério do Trabalho e Previdência. Norma Regulamentadora 10: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Acessado em 01/06/2023. Disponível em <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-organos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-10.pdf>.
- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16295: Luvas de material isolante. Rio de Janeiro. 2014.
- [3] ASTM International. ASTM F711: Standard Specification for Fiberglass-Reinforced Plastic (FRP) Rod and Tube Used in Live Line Tools. West Conshohocken. 2023.
- [4] ASTM International. ASTM D178: Standard Specification for Rubber Insulating Matting. West Conshohocken. 2022.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

A expectativa e a realidade dos resultados nos ensaios de caracterização de materiais para EPI contra arco elétrico

Márcio Bottaro
Instituto de Energia e
Ambiente da USP
marcio@iee.usp.br

Luis Eduardo Caires
Instituto de Energia e
Ambiente da USP
luis@iee.usp.br

Paulo Futoshi Obase
Instituto de Energia e
Ambiente da USP
obase@usp.br

Hédio Tatizawa
Instituto de Energia
e Ambiente da USP
hedio@iee.usp.br

RESUMO

O conhecimento prévio da resistência ao arco elétrico de muitos materiais utilizados como base para a construção de EPI contra efeitos térmicos de arcos elétricos é relativamente comum entre os fabricantes e importadores no Brasil, particularmente os mais experientes no mercado, bem como os grandes produtores de matérias primas e EPI. Alguns dados, no entanto, principalmente quando trabalhamos com tecidos ignifugos, que são materiais que apresentam variabilidade quanto a diversas grandezas de influência, acabam por ser super ou subestimadas em função de vários aspectos envolvidos nos ensaios de caracterização.

Com base em 207 experimentos válidos realizados no período de 2016 a 2022, o presente trabalho explora a dispersão de resultados e a tendência da estimativa dos resultados esperados. Um ponto importante observado no laboratório de ensaios de vestimentas brasileiro é a maior dispersão dessas estimativas em relação aos resultados reais, com uma tendência a superestimar valores prévios. Essa tendência vem se mantendo nos últimos dois anos, com estimativas fora da realidade em casos específicos, mas sem uma explicação plausível. O trabalho também teve como foco avaliar algumas grandezas de influência principais, o impacto nos resultados e uma análise sobre essa tendência e seus efeitos na proteção do trabalhador.

1.0 – INTRODUÇÃO

A caracterização térmica de tecidos e outros materiais para proteção contra os efeitos térmicos de arcos elétricos que podem ocorrer em decorrência de acidentes nos trabalhos com energia elétrica são uma grande preocupação dos profissionais de segurança do trabalho e também dos laboratórios de ensaios que trabalham para aperfeiçoar as metodologias envolvidas no processo de avaliação da resistência ao arco elétrico de tais materiais.

Durante o processo de análise de risco dentro de um programa de gerenciamento de riscos, que vai desde a estimativa de severidade dos eventos por meio das estimativas de energias incidentes, até as técnicas de mitigação e ações de engenharia para o controle e redução dos riscos [1], [2], [3], o desenvolvimento da Proteção está diretamente relacionado a resistência ao arco elétrico conferido aos EPI colocados no mercado [4].

Fundamentalmente a caracterização dos materiais utilizados como matéria prima dos EPI para proteção contra efeitos térmicos de arcos elétricos depende de uma estrutura padronizada para a geração de um arco elétrico aberto vertical, sensores calorimétricos capazes de medir as energias incidentes nos materiais e transmitidas por esses, e algoritmos que vão avaliar o comportamento dessa energia transmitida, utilizando como referência os estudos de probabilidade de queimaduras de segundo grau por fontes radiantes [5]. Todos esses dados embasados em uma amostragem estatística normalizada internacionalmente para que se possa validar a caracterização [4].

Cada etapa desse processo trás incertezas e grandezas de influência que ainda requerem estudos mais aprofundados [6], incluindo-se a amostragem dos ensaios, e obviamente vão impactar nos resultados dos ensaios e consequentemente na atribuição da resistência ao

1/9

arco elétrico em termos de ATPV (*Arc Thermal Performance Value*), EBT (*Breakopen Threshold Energy*) ou mesmo ELIM (*Incident Energy Limit*).

Numa abordagem mais ampla, reunindo resultados de 207 ensaios de caracterização realizados no Brasil no período de 2016 a 2022. Esses dados são comparados com recentes investigações realizadas no cenário internacional [7] e discutidos no presente trabalho. Neste período há uma importante contribuição da análise de uma grandeza de influência relevante, a alteração dos materiais de isolamento térmico utilizados nos sensores calorimétricos e nos suportes de tecidos, estabelecendo dois cenários que contribuem para dirimir dúvidas relacionadas a condutividade térmica atualmente colocada nas normas técnicas internacionais [4].

Novamente percebe-se dentro dessa gama de ensaios a irrelevância do uso da assimetria da corrente de arco elétrico sugerida nas normas técnicas, que não impacta na resistência ao arco elétrico dentro da variabilidade encontrada no presente estudo em comparação com os dados obtidos internacionalmente [6], o que corrobora estudos prévios realizados no Brasil sobre essa grandeza de influência, que em dada medida pode descaracterizar as condições de ensaio, especialmente os arcos elétricos gerados com poucos ciclos de rede [8].

2.0 – GRANDEZAS DE INFLUÊNCIA NA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ARCO ELÉTRICO

Muitas grandezas de influência são exploradas por pesquisadores que trabalham diretamente nos procedimentos de caracterização de materiais utilizados como matéria prima nos EPI utilizados para proteção contra arco elétrico, especialmente no caso dos tecidos, objeto principal desse trabalho, há uma preocupação especial, pois sendo a matéria prima essencial das vestimentas de proteção contra arcos elétricos, possuem particularidades que os diferenciam de outros materiais utilizados como barreira contra o calor proveniente de eventos indesejados.

Hogland *et al.* [9] estudaram várias dessas grandezas de influência nos ensaios de caracterização da resistência ao arco elétrico em termos de ATPV e EBT de acordo com a normativa norte-americana [10], em tecidos, como: gramatura, cores, composição das fibras, condutividade térmica e encolhimento durante exposição ao arco elétrico. Esses estudos são muito importantes, pois auxiliam e direcionam algumas considerações sobre as grandezas de influência mais significativas e também servem de base para orientar a análise dos resultados, como por exemplo a ponderação pela gramatura real, medida antes dos ensaios propriamente ditos.

No Brasil, estudos mais direcionados ao arranjo dos ensaios e sobre grandezas de influência dos parâmetros e condições estabelecidas por normas, começaram a ser investigados em 2016, focando nas componentes de incerteza existentes no processo de transformação da temperatura em energias incidentes e transmitidas, bem como sua influência na caracterização de queimaduras de segundo grau, na forma de incerteza de medição obtida por modelos matriciais [6], bem como dos parâmetros utilizados nos ensaios, como a corrente aplicada nos arcos elétricos [8], a medição da temperatura no processo de calorimetria e suas limitações [11], ou mesmo a significância da amostragem desses ensaios, fator ainda a ser explorado mais profundamente, e que encontra alguns questionamentos apresentados na literatura [7], [8] e abordados nesse trabalho.

2.1 – ISOLANTES TÉRMICOS

As normas internacionais e estrangeiras trazem vários requisitos com a maior restrição possível de forma a garantir que diferentes laboratórios possam reproduzir e obter resultados equivalentes [4], [10]. No entanto, como já exposto, a variabilidade pode vir dos materiais sob ensaio [9], de parâmetros não lineares utilizados para se obter os resultados de ensaios [8], de incertezas e deficiências no processo de medição [11], ou mesmo de incertezas provenientes do processamento dos resultados, onde requisitos por meio de tolerâncias mais restritas pode contribuir para a melhoria dos resultados [6].

Um dos pontos que vem gerando questionamento na atualidade são as contribuições dos materiais utilizados na construção de calorímetros e suportes de amostras, como os painéis para ensaios de tecidos [4]. Esse questionamento se deve principalmente a recomendação das normas com base somente na experiência prática dos laboratórios internacionais mais antigos, e também a recente indisponibilidade de alguns materiais citados na Europa e América do Sul, posições geográficas onde atuam laboratórios de ensaios de arco elétrico.

Esses fatores motivaram o estudo desses materiais no Brasil, onde, dentro do período de estudos das amostras ensaiadas, o laboratório Brasileiro de Arco Elétrico da Universidade de São Paulo (LEVe – IEE USP) pode vivenciar o uso de dois materiais em particular, o Marinite® P e o Marinite® A, esse último consistindo no único material disponível atualmente na América do Sul para a montagem dos arranjos de ensaio. Vale ressaltar que o CS85®, material equivalente ao Marinite® A, também está disponível, mas com maior densidade, o que o torna menos interessante.

Os materiais apontados pelas normas técnicas são apresentados na Tabela 1 com suas características de densidade e condutividade térmica.

Tabela 1. Materiais recomendados pela IEC 61482-1-1 para construção de calorímetros e suas características técnicas básicas.

Material	Densidade	Condutividade Térmica
Marinite® P	961 kg/m ³	0.16 W/m K @ 204 °C 0.17 W/m K @ 538 °C
Marinite® C	865 kg/m ³	0.14 W/m K a@ 204 °C 0.15 W/m K @ 538 °C
Marinite® I&M	737 kg/m ³	0.12 W/m K a@ 204 °C 0.12 W/m K @ 538 °C
Monolux® 500	700 kg/m ³	0.18 W/m K a@ 25 °C 0.19 W/m K @ 200 °C 0.20 W/m K @ 500 °C

O Marinite® A possui densidade de 1041 kg/m³ e condutividade térmica de 0,28 W/m K @ 538 °C. Na Europa, a indisponibilidade dos materiais da tabela 1 também existe, e atualmente o PROMATECT®-MST, com densidade de 750 kg/m³ e condutividade térmica de 0,20 W/m K @ 600°C é a opção viável.

Observando a equação de fluxo de calor definida por Fourier, temos:

$$\theta = \frac{q}{\Delta t} = k \cdot \frac{A(T_2 - T_1)}{e} \quad (1)$$

Onde θ é o fluxo de calor em Watts, Δt o intervalo de tempo, k é o coeficiente de condutividade térmica em J/(s m K), A é a área de contato entre as superfícies dos meios, T_2 e T_1 as temperaturas dos meios quente e frio, ou seja, os meios 2 e 1 respectivamente. Finalmente e é espessura da superfície que separa os meios.

Duas observações são evidentes aqui, a influência direta do coeficiente de condutividade térmica e da área de contato entre as superfícies, bem como a contribuição inversamente proporcional da distância entre as superfícies expressa por e , que no caso ideal tende a zero maximizando a transferência de calor.

2.1.1 – MODELO DO CALORÍMETRO

Mesmo sendo possível estimar as influências da condutividade térmica para cada material, sua dinâmica com a mudança de temperatura não é tão trivial, bem como a influência da densidade dos materiais e sua superfície de contato exata, além de fenômenos de perda de calor em bordas e recessos requer um refinamento da abordagem matemática.

De forma a compreender melhor a influência da transferência de calor com base em cada material e levando em conta vários fenômenos estáticos e dinâmicos, os calorímetros utilizados em laboratório foram modelados no COMSOL MULTIPHYSICS™ com seus dados técnicos específicos, e com suas características construtivas reais, atendendo aos requisitos normativos internacionais. A figura 1 ilustra o

modelo desenvolvido, onde é possível visualizar à esquerda (A) o elemento isolante e à direita (B) o elemento calorímetro, que consistem em um disco de cobre de 40 mm de diâmetro com 1,6 mm de espessura. O recesso no material isolante para recepção do calorímetro possui uma base de 1,0 mm e um rebaixo para reserva de ar de 7,4 mm.

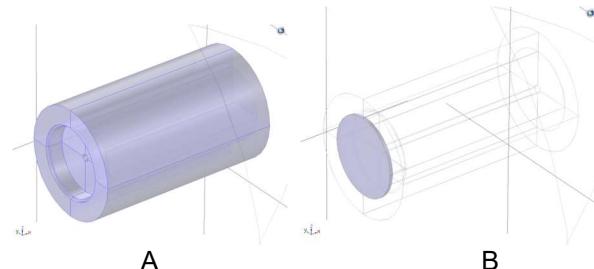


Figura 1. Representação do elemento isolante (A) e calorímetro de cobre (B) desenvolvidos no COMSOL MULTIPHYSICS™.

Todos os materiais apresentados na figura 1 foram submetidos a simulações, aplicando-se a toda superfície de entrada do dispositivo temperaturas variando de 100 °C a 500 °C em passos de 100 °C, em intervalos de tempo de aplicação de 0 a 1 segundos, em passos de 0,1 segundos dentro das simulações. Os módulos *Heat Transfer in Solids* e *Heat Transfer in Fluids* foram aplicados na simulação, levando em conta a seguinte equação:

$$\rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \cdot \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q \quad (2)$$

Onde ρ é a densidade do meio que tem capacidade térmica C_p , and heat flux vector field \mathbf{q} representa o vetor do campo de fluxo de calor para as coordenadas tridimensionais x , y e z , que estão relacionadas a condutividade térmica k , descrita no simulador como $\mathbf{q} = -k\nabla T$. Esta equação também inclui o vetor de velocidade do campo \mathbf{u} e a fonte de calor Q .

2.1.2 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Para extrapolar as simulações foi criado um material virtual *Insulator-V*, que tem como objetivo entender o comportamento do calorímetro quando um elemento de condutividade térmica elevada é colocado no sistema. A esse material foi atribuída uma condutividade térmica de 0,60 W/m K, com uma densidade de 1000 kg/m³.

A figura 2 ilustra a aplicação de uma temperatura de 500 °C a superfície do calorímetro montado com o disco de cobre.

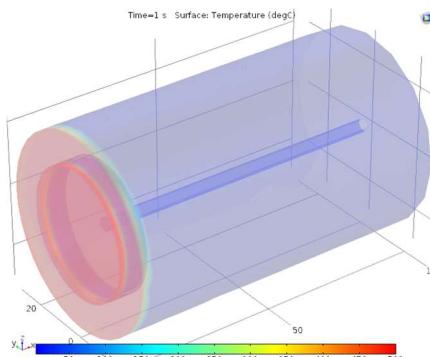


Figura 2. Representação do elemento isolante com calorímetro de cobre desenvolvidos no COMSOL MULTIPHYSICS™, com uma fonte de calor na superfície de 500 °C.

As temperaturas nas interfaces do calorímetro e principalmente na região central do calorímetro de cobre, onde é instalado o termopar que realiza as medições de temperatura para conversão em calor, foram processadas em diversas simulações e analisadas uma a uma e como um todo. É importante destacar que na região central do calorímetro, a interface não se dá entre cobre e material isolante, mas sim entre cobre e ar, que em verdade tem densidade muito baixa, 1,293 kg/m³ (ar seco em pressão normal de uma ATM e 273 K), e condutividade térmica de 0.025 W/m K a 0.05713 W/K m, para variações de temperatura de 3300 K a 800 K.

As áreas de contato do cobre com o material isolante representam 27 % da área total da interface, excluindo-se a superfície de entrada. A área de contato do cobre com o ar representa 73 % dessa superfície de interação térmica. Desta forma ela tem a maior contribuição no processo. A vantagem da simulação é levar em conta o processo de forma integral, e levando em conta as variações temporais e de temperatura aplicada, nos conferindo a influência do material isolante na região de medição de temperatura, apresentada na figura 3. Esta influência foi avaliada entre todos os materiais em relação ao Marinite® I&M, que apresenta as melhores características térmicas dentro da proposta de ensaio, e também entre os materiais Mrinite® A e P, mudança realizada no laboratório Brasileiro, e entre o material PROMATECT®-MST e MONOLUX® 500, para avaliação do cenário europeu com a indisponibilidade dos materiais atuais vigentes em norma.

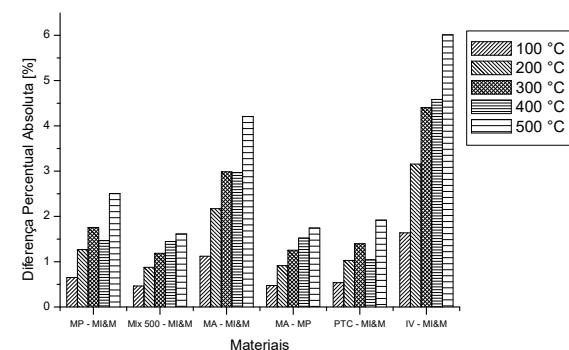


Figura 3. Diferença percentual total entre diversos materiais isolantes, para temperaturas entre 100 °C e 500 °C na contribuição para a temperatura medida no calorímetro de cobre, em simulação numérica no COMSOL MULTIPHYSICS™.

Os resultados mostram uma diferença máxima de 6 % na transferência de calor entre o material virtual, *Insulator-V* e o Marinite® I&M, o que dentro da incerteza do processo de calorimetria, cerca de 10 % [6], seria aceitável, mesmo para um material pobre em termos de isolação térmica. No caso da mudança de Mrinite® P para A, temos uma redução máxima inferior a 2 % em 500 °C, valor extremo aceitável para um ensaio de caracterização, praticamente a mesma diferença entre o PROMATECT®-MST e o MONOLUX® 500 para a mesma temperatura.

2.2 – RESULTADOS LABORATORIAIS

Conforme apresentado no presente trabalho, uma avaliação da transição entre materiais foi possível de ser avaliada, pois justamente o período de ensaios de 2016 a 2022 contou com essa troca de componentes mecânicos no laboratório brasileiro. Para essa avaliação foi utilizado o arranjo de ensaios de tecidos da norma IEC 61482-1-1, conforme apresentado na figura 4. De um total de 246 ensaios de caracterização de tecidos, 207 foram considerados válidos. Os ensaios descartados não tinham parâmetros confiáveis de identificação e caracterização prévia do produto, como composição e gramatura declarada. Os ensaios entre 2016 e 2020, utilizando o arranjo com Marinite® P somaram 123 amostras, e os ensaios entre 2020 e 2022, utilizando o Marinite® A somaram 84 amostras. O foco dos resultados foram as resistências ao arco elétrico em termos de ATPV, onde a energia transmitida é relevante ao processo, além da energia incidente medida.

Para uma avaliação global os resultados, os mesmos foram normalizados pela densidade de área real (DAR), conforme utilizado por Hoagland *et al.* [9], de forma a poder englobar vários tipos de tecidos em uma mesma análise.

O valor médio oriundo de 760 experimentos realizados por Hoagland *et al.* [9] foi de $1,23 \frac{\text{cal}/\text{cm}^2}{\text{yd}/\text{oz}^2}$ com desvio padrão de $0,12 \frac{\text{cal}/\text{cm}^2}{\text{yd}/\text{oz}^2}$. Para adequação às unidades normativas internacionais [4], o valor foi das gramaturas convertido em g/m^2 e o resultado foi invertido para conveniência de trabalho em unidades inteiras, dessa forma, podemos considerar um valor médio de referência de $28 \frac{\text{g}/\text{m}^2}{\text{cal}/\text{cm}^2}$ com desvio padrão de $3 \frac{\text{g}/\text{m}^2}{\text{cal}/\text{cm}^2}$ com base nesse estudo [9].

A tabela 2 mostra o resumo dos dados obtidos de ATPV entre diversos materiais, ponderados por suas gramaturas.

Tabela 2. Resultados da média e desvio padrão do ATPV ponderado pela gramatura real das amostras, em dois períodos de ensaios, utilizando diferentes materiais isolantes térmicos.

Período	Material	Valor Médio (DAR/ATPV) $\frac{\text{g}/\text{m}^2}{\text{cal}/\text{cm}^2}$	Desvio Padrão $\frac{\text{g}/\text{m}^2}{\text{cal}/\text{cm}^2}$
2016 / 20	Marinite® P	30	7
2020 / 22	Marinite® A	31	9

A figura 4 mostra a representação dos resultados obtidos e sua frequência de distribuição real. A figura 5 mostra uma aproximação a uma distribuição gaussiana para análise da dispersão dos valores, utilizando os dados da tabela 2..

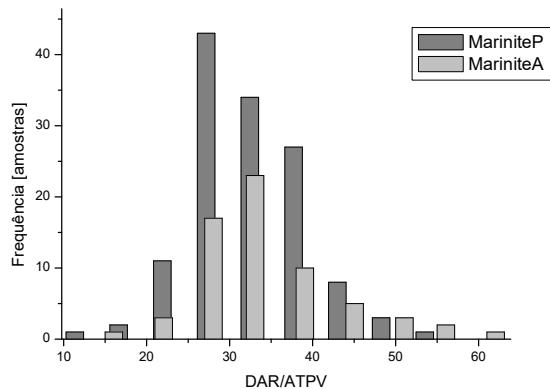


Figura 4. Distribuição de frequência dos resultados de ATPV ponderados pelas gramaturas reais, em 207 ensaios de caracterização de tecidos ocorridos entre 2016 e 2022.

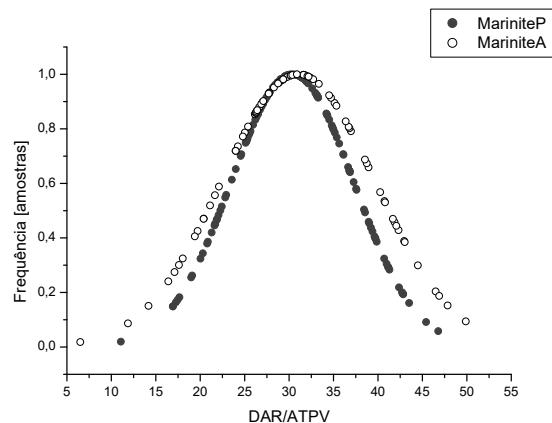


Figura 5. Distribuição de frequência dos resultados de ATPV ponderados pelas gramaturas reais, em 207 ensaios de caracterização de tecidos ocorridos entre 2016 e 2022, aproximados para uma distribuição gaussiana.

Os resultados mostram a concordância com a literatura considerando a dispersão dos dados obtidos no LEVe e na referência [9]. A maior dispersão no laboratório nacional, especialmente no segundo período se deve principalmente ao menor número de amostras relativamente aos 760 ensaios internacionais, e também a presença de mais valores medidos excedendo um desvio padrão amostral.

2.3 – RESULTADOS REAIS FRENTE ÀS DECLARAÇÕES DOS FABRICANTES

Um fator importante e decisivo no processo de análise e gerenciamento de risco é a seleção do EPI com base na estruturação do processo de estimativa de energias incidentes nos ambientes sujeitos aos perigos dos arcos elétricos [3]. Esta seleção muitas vezes é impactada pelas declarações da resistência ao arco elétrico empregadas nas vestimentas e nesse sentido a análise laboratorial exerce papel fundamental, no entanto, em função das várias dúvidas e incertezas que envolvem o processo de ensaios e também aquelas relacionadas a matéria prima, é importante que o fabricante conheça seu produto e sua dispersão levando em conta a tecnologia que dispomos hoje internacionalmente para avaliá-lo [7].

Especialmente na etapa de desenvolvimento de novos EPI, essa análise deve ser cuidadosa e como o processo de obtenção do Certificado de Aprovação (CA) no Brasil, ainda segue o modelo de ensaio, em resumo, de um ensaio de caracterização e um ensaio de produto final, o comprometimento passa a ser mais importante ainda. O fabricante deve prezar por dados conservadores. É compreensível que se deseje trabalhar com valores ótimos de resistência ao arco elétrico, ou seja, os mais altos, mas isso

tem um grande risco embutido que pode impactar diretamente o usuário.

Com base nas declarações dos fabricantes, os ensaios apresentados na tabela 2 e nas figuras 4 e 5 foram avaliados com relação aos valores declarados. Os resultados das diferenças entre valores declarados e obtidos, relativos ao valor declarado, são apresentados na figura 6.

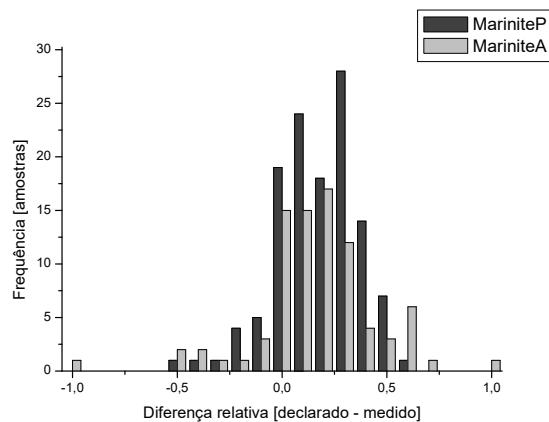


Figura 6. Distribuição de frequência da diferença normalizada dos resultados declarados e medidos, de ATPV ponderados pelos valores declarados, em 207 ensaios de caracterização de tecidos ocorridos entre 2016 e 2022.

A figura 7 representa uma aproximação gaussiana com os dados obtidos da média e desvio padrão oriundos dos dados apresentados na figura 6.

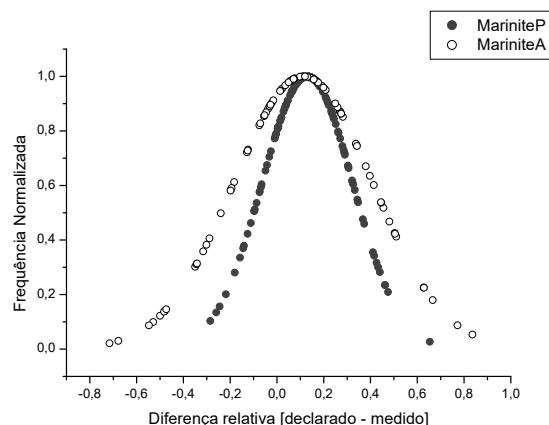


Figura 7. Distribuição de frequência da diferença dos resultados declarados e medidos, de ATPV ponderados pelos valores declarados, em 207 ensaios de caracterização de tecidos ocorridos entre 2016 e 2022, aproximados para uma distribuição gaussiana.

Quanto mais distantes de zero, maior a diferença relativa do declarado em relação ao medido, sendo que a diferença positiva indica uma superestimativa do ATPV.

Há uma tendência de diferença relativa positiva, ou seja, uma tendência de declarar

valores acima dos obtidos em laboratório, no entanto há muitos casos de tendência negativa. Em particular para os ensaios do período 2020 a 2022, existem declarações extremas para ambos os lados, o que pode revelar desconhecimento ou desenvolvimento de novos produtos. Importante lembrar que a gramatura declarada também pode apresentar desvios consideráveis, particularmente quando não se conhece bem o material.

A diferença média normalizada para o arranjo com Marinite® P, ou seja, os ensaios realizados entre 2016 e 2020, foi em média de 0,13 com desvio padrão de 0,19, ou seja, uma superestimativa de 13 % com variação de quase 20 % para mais ou para menos em relação ao valor declarado. No caso dos ensaios entre 2020 e 2022, com o Marinite® A, o valor médio normalizado da diferença foi de 0,11 com desvio padrão de 0,30, novamente uma superestimativa de 11 % com variação de 30 % para mais ou para menos em relação ao valor declarado. Essa variação de 30 % se deve principalmente aos valores declarados com erro relativo muito elevado, como o dobro ou metade do valor medido nesse período.

2.4 – COMPORTAMENTO TEMPORAL

Um complemento com relação aos valores globais abordados nesse trabalho foi o estudo de alguns tecidos quanto ao comportamento temporal. Nesses casos estudou-se o mesmo tecido em várias fases do laboratório. Infelizmente não se pode garantir o mesmo lote das amostras, mas respeitaram-se as demais características, como composição e cor, de acordo com informações dos fabricantes. As amostras avaliadas são apresentadas na tabela 3, com as composições de referência. Os nomes dos fabricantes e produtos são omitidos por razões de sigilo laboratorial.

Tabela 3. Relação de produtos caracterizados em termos de ATPV em vários períodos pelo LEVE.

Produto	Composição	Valor Declarado [cal/cm ²]	Número de Ensaios
P1	48% MAC, 37% CO, 15% AR	9,6	7
P2	88 % algodão 20 % Poliamida	9,6	17
P3	100 % algodão	11	7
P4	88 % algodão 20 % Poliamida	12	7
P5	88 % algodão 20 % Poliamida	11	9
P6	100 % algodão	11	8

Os valores medidos comparados aos valores declarados são expressos graficamente nas figuras 8 e 9, divididos para melhor visualização.

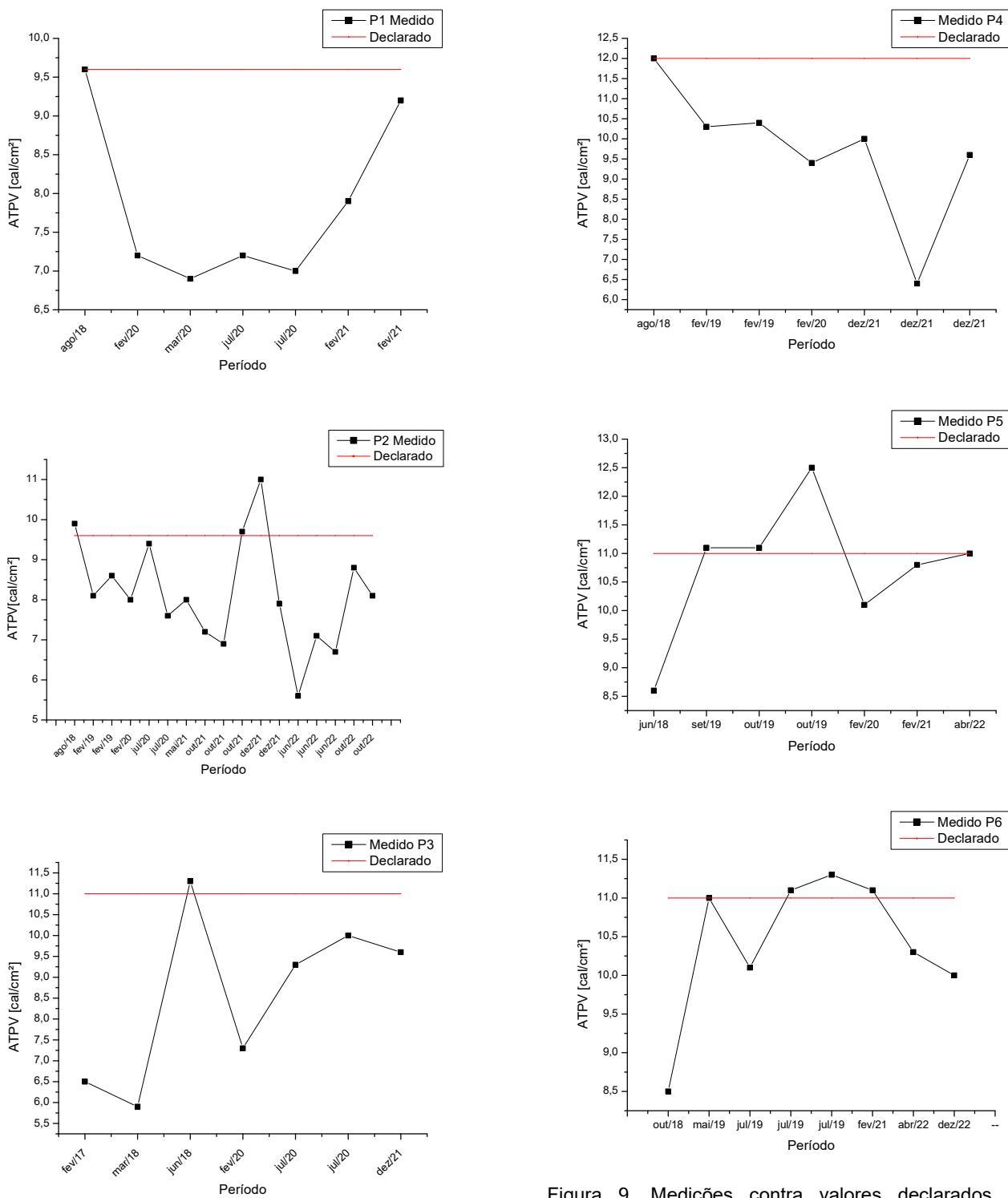


Figura 8. Medições contra valores declarados dos produtos classificados conforme a tabela 3 para os produtos P1, P2 e P3.

Figura 9. Medições contra valores declarados dos produtos classificados conforme a tabela 3 para os produtos P4, P5 e P6.

3.0 – DISCUSSÕES

Dentro dos estudos apresentados pudemos abordar mais uma grandeza de influência e associá-la a comportamento diversos dos ensaios de caracterização de tecidos quanto a resistência ao arco elétrico, bem como avaliar dois cenários importantes de resultados num período de 6 anos. Os resultados com os dois isolantes térmicos empregados nos trabalhos de rotina

mostram que a influência dos materiais classificados nas normas internacionais como recomendados para uso nos calorímetros bem como os recomendados para uso diverso nas montagens de ensaio exercem pouca influência nos resultados finais, principalmente pela maior influência estar na interface Cobre – Ar, no ponto central do calorímetro, exatamente onde ocorre a medição de temperatura por meio de termopares. Esses resultados foram corroborados pelas simulações computacionais, que revelam, no caso da substituição do Marinite® P pelo Marinite® A, uma influência inferior à 2 % na medição de temperatura, no pior caso de aplicação dos calorímetros, ou seja, quando sujeitos a temperaturas de 500 °C.

A dispersão dos resultados obtidos nos 7 anos de avaliação apresentada no trabalho, em 207 ensaios válidos para caracterização de ATPV em tecidos ignifugos, mostrou compatibilidade com a literatura [9] o que demonstra novamente, que a influência dos isolantes térmicos apresentados, bem como o uso de correntes simétricas nos ensaios [8] tem influência desprezível nos ensaios, muito inferior a estimativa de incerteza atribuída ao processo de conversão de temperatura em calor (energia incidente e transmitida) [6].

Quanto a avaliação da declaração dos fornecedores de produtos têxteis aplicados aos EPI para arco elétrico, percebe-se uma variação entre 20 % e 30 % nos valores globais quando normalizados pela gramatura real obtida nos ensaios, muito próximo a literatura recente [7], onde diferenças entre aproximadamente 21,2 % a 36,5 % foram reportadas para um mesmo material com controle mais rigoroso de procedência.

De forma análoga ao trabalho realizado por Atq *et al.*, o estudo com tecidos de camada única em função do tempo, mesmo que o mesmo lote para cada produto não tenha sido respeitado de forma tão restrita, mas sim realizados os controles de procedência de mesmo produto conforme informações dos fabricantes, revela que a declaração apontada pelos fabricantes tende a ser superestimada na média. Isso ocorre independentemente da composição do tecido.

De forma a complementar a análise, aproximações para distribuições gaussianas dos produtos apresentados na tabela 3 foram realizadas com base na média e desvio padrão amostral dentro dos períodos de ensaios relatados. Os valores de referência são apresentados na tabela 4.

Tabela 4. Valores médios e desvios padrão amostrais dos produtos caracterizados pelo LEVe em termos de ATPV em vários períodos.

Produto	ATPV médio [cal/cm ²]	Desv. Pad. Amostral [cal/cm ²]	Valor Declarado [cal/cm ²]
P1	8,0	1,1	9,6
P2	8,2	1,3	9,6
P3	8,8	2,0	11
P4	9,7	1,7	12
P5	10,8	0,9	11
P6	10,4	0,9	11

Dois exemplos de distribuição e valores declarados são apresentados nas figuras 10 e 11, que revelam a probabilidade de ocorrência da estimativa do fornecedor do produto em relação aos dados reais. Os resultados na figura 10 revelam uma superestimativa do produtor, com 93 % de probabilidade do valor ensaiado

ser inferior ao declarado. Já o produto P5 apresentado na figura 11 mostra um probabilidade de 57 % do valor ensaiado ser inferior ao declarado, o que indica uma tendência mais central, ou seja, mais próxima a média amostral. A tabela 5 mostra as probabilidades de ocorrência de valores abaixo e acima das estimativas dos produtores com base nas aproximações de distribuição de probabilidade gaussiana para os resultados obtidos.

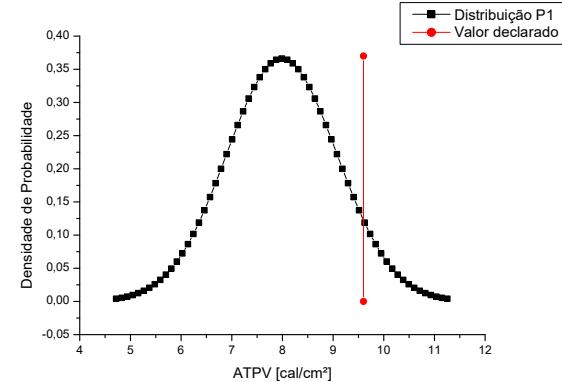


Figura 10. Função densidade de probabilidade aproximada para uma distribuição gaussiana, dos valores medidos de ATPV no produto P1 com sinalização do valor declarado, em ensaios de caracterização ocorridos entre 2018 e 2021 para este caso especificamente.

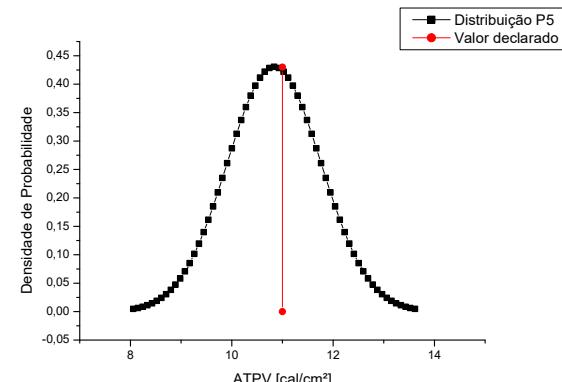


Figura 11. Função densidade de probabilidade aproximada para uma distribuição gaussiana, dos valores medidos de ATPV no produto P2 com sinalização do valor declarado, em ensaios de caracterização ocorridos entre 2018 e 2022 para este caso especificamente.

Tabela 5. Probabilidade de ocorrência dos valores estimados dos produtos caracterizados pelo LEVe em termos de ATPV em vários períodos.

Produto	Valor Declarado (cal/cm ²)	Probabilidade de ATPV abaixo do declarado	Probabilidade de ATPV acima do declarado
P1	9,6	93 %	7 %
P2	9,6	86 %	14 %
P3	11	86 %	14 %
P4	12	91 %	9 %
P5	11	57 %	43 %
P6	11	73 %	27 %

4.0 – CONCLUSÕES

Num período de 6 anos, entre 2016 e 2022, 207 ensaios de caracterização por ATPV foram avaliados no presente estudo. Esta avaliação é particularmente importante, pois o impacto das declarações de fabricantes de materiais ignifugos frente aos resultados laboratoriais revelam muitas variações e incertezas ainda não totalmente compreendidas pelos diversos envolvidos nesse processo, desde fabricantes, laboratório, até usuários.

A tendência de superestimar valores de resistência ao arco elétrico mostrou-se evidente, o que se justifica pela variabilidade encontrada nos resultados, muito similar ao que vem sendo apresentado na literatura recente [6]-[9]. Isso reforça a necessidade de conhecermos melhor os arranjos e limitações dos ensaios.

Adicionalmente a avaliação do comportamento das amostras frente às declarações e estimativas dos produtores de materiais ignifugos, mais uma grandeza de influência pode ser estudada a fundo, por meio de simulações e ensaios. Esta grandeza consiste na condutividade térmica dos elementos de suporte de calorímetros e amostras de ensaio. Assim como a assimetria de corrente [8], a condutividade térmica entre os materiais isolantes comercialmente disponíveis mostrou pouca ou quase nenhuma influência nos resultados de ensaios, considerando as dispersões normais já conhecidas dentro do processo de avaliação das amostras [6].

Essas constatações revelam que os produtores, fornecedores e importadores de materiais têxteis destinados a compor as vestimentas de proteção contra arco elétrico devem aprofundar as avaliações de seus materiais, e também que mais grandes de influência necessitam ser exploradas no arranjo de ensaio atualmente disponível nas normas internacionais [4] e estrangeiras [10], bem como a tecnologia de medição empregada nos ensaios [11]. Além disso propõem-se neste trabalho que as normas nacionais e internacionais, tanto para ensaios como para requisitos de produto e particularmente para seleção de EPI, atuais e futuras, devem atentar para que a declaração de valores siga uma tendência central, evitando-se valores subestimados ou superestimados, que podem ser obtidos pontualmente mas que não são representativos do produto em amostragens mais significativas.

5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. H. Lee. "The other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns" *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-18, No. 3, May 1982.
- [2] IEEE 1584:2018. *IEEE Guide for performing Arc-Flash hazard calculations*. IEEE Industry and Applications Society. New York, NY, USA.
- [3] NFPA 70E: *Standard for Electrical Safety in the Workplace*. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2021
- [4] IEC 61482-1-1: 2019, *Live working – Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc – Part 1-1: Test methods – Method 1: Determination of the arc rating (ELIM, ATPV and/or EBT50) of clothing materials and of protective clothing using an open arc*. IEC Central Office, Geneva - Switzerland.
- [5] A. M. Stoll and M. A. Chianta, 1970, "Heat Transfer Through Fabrics as Related to Thermal Injury," *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, Vol. 33, pp. 649-670.
- [6] M. Bottaro, H. Eichinger. *Uncertainties in the heat energy calculation process and influences on determination of arc thermal performance value (ATPV) of heat- and flame-resistant materials tests*. Measurement, Volume 123, July 2018, pp. 275-284.
- [7] A. Atq et al., "Arc rating variability and repeatability: why does fabric arc rating vary and which value is correct?". In IEEE Electrical Safety Workshop, Reno, NV (USA). November 2023. pp. 53-59.
- [8] M. Bottaro et al., "Analysis of Asymmetrical Component Influence on Arc Current in the Determination of Arc Thermal Performance Value of Protective Personal Equipment," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 2, pp. 2130-2137, March-April 2019.
- [9] H. Hoagland et al., "How Arc Flash Protective Fabrics Work to Protect in the Hazard, Performance of Protective Clothing and Equipment". 10th Volume, Risk Reduction Through Research and Testing, ASTM STP1593, B. Shiels and K. Lehtonen, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, pp. 27–41.
- [10] ASTM F 1959: 2014, *Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing*. New York, NY, USA.
- [11] F. C. S. Soares et al., "Desenvolvimento de calorímetro baseado em sensor óptico para determinação do ATPV". IX IEEE Electrical Safety Workshop Brasil 2019.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO SEGURA DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS RESIDENCIAIS

Mauro Fonseca Rodrigues

Unipampa

maurorodrigues@unipampa.edu.br

Caroline Daiane Radüns

Unijuí

caroline.raduns@unijui.edu.br

Silvana Zauza

JBS

silvana.zauza@gmail.com

João Michel Oliveira

Fahor

oliveirajoaom@fahor.com.br

RESUMO

Segundo os dados analisados neste trabalho, entre 40% e 50% dos acidentes com eletricidade ocorrem nas unidades residenciais familiares. Esses acidentes vão desde pequenos incidentes, passando por queimaduras, e chegando a óbitos de pessoas. Além disso, o conhecimento sobre eletricidade na maioria das residências é reduzido, fazendo com que se conviva com os riscos elétricos inerentes. Com objetivo de criar uma ferramenta de teste, usual para qualquer indivíduo, do estado da instalação elétrica das residências domiciliares no Brasil este trabalho estudou os principais riscos elétricos no ambiente domiciliar e formulou um questionário com 22 perguntas objetivas de resposta sim ou não. Ao classificar os problemas foram criados três níveis de criticidade, envolvendo o uso da eletricidade nesses ambientes, de forma que o usuário da instalação, mesmo leigo, possa registrar sua percepção ao usar os recursos elétricos e, através de uma tabela auxiliar, determinar o grau de risco a que está submetido periodicamente. Resumidamente, o sistema do questionário está baseado nas respostas positivas. Assim, ao encontrar 1 resposta sim no nível crítico, com 4 perguntas grifadas em vermelho, 3 no intermediário, com 8 perguntas grifadas em amarelo, ou 5 no nível baixo, com 10 perguntas grifadas em branco, recomenda-se ao usuário da instalação elétrica recorrer com urgência a um profissional da área para revisar sua rede elétrica domiciliar. Ao aplicar o questionário em 10 unidades familiares diferentes obteve-se um resultado que 5 delas apresentaram a necessidade de acionamento técnico urgente, ou seja, as pessoas e animais nesse local convivem com riscos elétricos elevados que podem levar a

acidentes e perdas de bens. Complementarmente, essa ação também cria um aspecto prevencionista no usuário de eletricidade no ambiente residencial. Espera-se, com isso, diminuir o número de acidentes envolvendo eletricidade nas residências do Brasil.

1.0 – INTRODUÇÃO

Os riscos elétricos são desprezados em inúmeras atividades [1]. No entanto, a eletricidade e, consequentemente, a NR 10 (Norma Regulamentadora Nº 10) fazem parte de todas as atividades laborais existentes. Nesse cenário, o estudo aprimorado dos ambientes e uma correta orientação aos profissionais envolvidos significa maior efetividade no uso correto e seguro das instalações elétricas [2].

A citada NR 10 [2] traz em sua base alguns conceitos que mostram especificamente seu viés prevencionista e como seu foco é completo no uso da eletricidade:

- proteção das pessoas e animais;
- garantir o funcionamento adequado dos equipamentos;
- proteção da instalação;
- aplicar-se a qualquer edificação.

Analizando esses aspectos apontados percebe-se que a eletricidade, se devidamente instalada e utilizada não deve apresentar riscos aos seus usuários. No entanto, o que se percebe é que inúmeros incidentes e acidentes ocorrem durante o uso da energia elétrica. Segundo o anuário divulgado pela Abracopel (Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade) [3], foram 1.387 acidentes de origem elétrica registrados em 2017, sendo 702 fatais. A maioria das mortes, 627 casos, aconteceu devido a

1/7

choques elétricos e a maior parte destes acontece em residências, sejam em casas, sítios, fazendas, ou apartamentos. A falta de informação e o desconhecimento dos riscos fazem com que os acidentes e fatalidades aconteçam.

Dessa forma, faz-se necessário criar um procedimento de verificação de instalações elétricas que permita pessoas leigas no assunto identificar riscos elétricos no seu ambiente de trabalho ou residência.

Para isso, foram estipulados como objetivos específicos as seguintes etapas.

- Estudar a base bibliográfica dos acidentes envolvendo eletricidade no Brasil.
- Avaliar o número de acidentes nos ambientes residencial, comercial e industrial.
- Desenvolver uma metodologia para detectar os principais riscos existentes no ambiente residencial, principalmente.
- Criar um procedimento de checagem rápida de instalações elétricas monofásicas.

2.0 – EMBASAMENTO TEÓRICO

Estudos na área de riscos elétricos [4] apontam que a implementação das NRs vêm diminuindo o número de acidentes no Brasil. A NR 10, específica da área, contribui significativamente para esse ponto [4].

Conforme o objetivo e campo de aplicação da NR 10, esta norma: "... estabelece os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade." [2]

Dessa forma, em sua abertura aponta a necessidade de controle e prevenção dos riscos elétricos. Atualmente, todas as ações humanas são cercadas e apoiadas por sistemas elétricos, tanto na área produtiva ou comercial, quanto na área residencial, onde, inclusive, ocorrem inúmeros incidentes e alguns acidentes elétricos que poderiam ser evitados. Em seu segundo tópico inicial, aponta os locais de aplicação evidenciando que todo processo produtivo e de uso da eletricidade deve ser coberto por suas regras e orientações.

Segundo [6] o número de incidentes envolvendo eletricidade é maior nas residências que em ambientes industriais e comerciais. Nesse sentido, este trabalho busca apontar um guia básico que permita aos usuários de eletricidade identificarem seus riscos iminentes e poderem atuar de forma preventiva na chamada de um profissional que possa resolver os problemas já previamente encontrados ou, ao menos, suspeitos de existirem. Além disso, permitirá ao usuário residencial de eletricidade compreender conceitos

mínimos deste recurso atualmente indispensável à sua qualidade de vida. A Figura 1 ilustra esse quadro e pode-se perceber que o maior número de acidentes, exceto em redes de distribuição, ocorre diretamente nas residências.

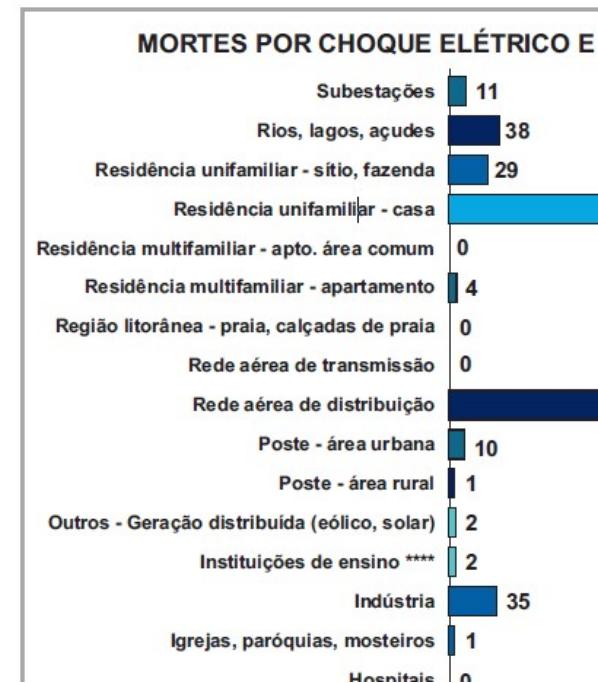


Figura 1 – Mortes por choque elétrico por tipo de edificação ou logradouro. Fonte: [4].

2.1 – JUSTIFICATIVA

Trabalhos no intuito de analisar os riscos elétricos existem, mas suas aplicações práticas no assunto podem ser questionadas. Por exemplo, para [6], em sua dissertação de mestrado a análise é tecnicamente avançada, trazendo os aspectos técnicos de aterramento e níveis de tensão apropriados, mas não analisa as consequências deste processo para um usuário da eletricidade e como este pode proteger-se.

Nesse sentido, ao pesquisar artigos sobre riscos elétricos é possível encontrar inúmeras publicações. No entanto, suas análises focam no contexto técnico e científico ou do conhecimento aplicado aos profissionais envolvidos em atividades de eletricidade [8] [9]. Os autores Ercolino Jr. e Dos Santos [10] realizaram estudo para implantar dispositivos de segurança em máquinas de fundição. Mas não analisaram o impacto do fator humano na prevenção.

Nesse contexto, a Tabela 1 aponta um resumo da pesquisa realizada em artigos sobre o tema riscos elétricos e mais alguns dados relevantes.

Tabela 1 – Publicações sobre riscos elétricos e suas informações principais

Artigo	Tema principal	Nível de tensão	Abordagem
Dissertação	Riscos elétricos	Baixa	Proteção técnica
Artigo	Estudo residencial	Baixa	Problemas elétricos
Artigo	Riscos elétricos	Baixa	Riscos dos trabalhadores
Livro	Prevenção de riscos	Baixa	Controle de riscos
Artigo	Prevenção de riscos	Ultra-alta	Minimizar riscos de trabalhadores
Artigo	Prevenção de riscos	Baixa / média	Dispositivos extras de proteção
Artigo	Instalações elétricas	Baixa	Funcionamento de equipamentos
Artigo	Riscos elétricos	Baixa	Riscos dos trabalhadores
Artigo	Riscos elétricos	Média	Queda de cabo aéreo em via

Esses dados são apresentados aqui para justificar a necessidade de criar ferramentas que melhorem o conhecimento do usuário leigo de eletricidade. Algo que lhe permita interagir com maior confiança e prevenir-se de prováveis riscos elétricos.

3.0 – METODOLOGIA

A metodologia adotada irá buscar na bibliografia atual as principais causas de acidentes envolvendo eletricidade. Sabe-se que, em muitos casos, não há um registro correto dos eventos, sobretudo daqueles com menor ou nenhum impacto severo na capacidade física dos envolvidos.

Posteriormente, se passará à identificação dos fatores que possam ser detectados por usuários de eletricidade, ou seja, todas as pessoas. Eventos sinalizadores serão apontados como fatores de desconfiança e que devem fazer com que as pessoas busquem auxílio profissional para adequação da instalação elétrica da qual faz uso regularmente. A Figura 2 apresenta um fluxograma da metodologia proposta.



Figura 2 - Fluxograma da metodologia a ser implementada.

Nesta metodologia, fica evidenciado que o objetivo do trabalho é fazer a pesquisa e desmistificar, em parte, os conteúdos avançados dos riscos elétricos para que usuários sem conhecimento técnico possam usar o procedimento

de checagem. Ou seja, apenas pelas suas percepções ele deve ser capaz de detectar possíveis riscos elétricos existentes na instalação.

A primeira etapa compõe pesquisa na bibliografia os principais fatores que causam incidentes elétricos nas instalações monofásicas, principalmente. Em seguida, esses riscos serão analisados sob o enfoque residencial para, posteriormente, terem suas características apontadas em registros que possam ser facilmente identificados a partir do uso regular da eletricidade. Por fim, será criado uma lista de checagem (*checklist*) para que o usuário possa ampliar sua percepção sobre o estado atual de sua instalação elétrica e poder apontar possíveis falhas existentes.

4.0 – RISCOS ELÉTRICOS EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS MONOFÁSICAS

Os riscos elétricos compõem questões referentes à vida e aos equipamentos eletroeletrônicos. A união destes dois aspectos aparece também nas sobrecargas que levam a eventos drásticos como incêndios que geram, inclusive, perdas humanas, Figura 3.



Figura 3 – Mortes por incêndio causado por sobrecarga no Brasil. Fonte: [4]

É possível afirmar pela informação do gráfico que o maior número de mortes por incêndio causado por sobrecarga elétrica está entre os idosos e depois as crianças. O pouco conhecimento dos riscos elétricos e o uso inadvertido da eletricidade em condições precárias de instalação podem ser causas diretas. Para apontar esses riscos algumas questões pertinentes à sobrecarga devem ser levantadas, tais como:

- o que causa a sobrecarga elétrica;
- como evitar;
- como antecipar possíveis problemas elétricos;
- de que forma detectar os riscos elétricos para preveni-los.

Um conhecimento básico sobre esses itens serviria de ponto de partida para qualquer usuário de eletricidade ter uma percepção a respeito.

4.1 – DETALHANDO OS RISCOS

A Tabela 2 apresenta uma lista prévia dos principais riscos elétricos em instalações monofásicas.

Pode-se perceber que são riscos facilmente identificáveis pelos próprios usuários da instalação elétrica, mas que geralmente são ignorados até que gerem um incidente mais grave, gerando perdas financeiras ou até de vidas.

Tabela 2 – Riscos elétricos em instalações monofásicas

Risco	Causa provável	Como evitar	Impacto
Aquecimento	Sobrecarga na instalação	Projeto e manutenção periódica	Incêndios e danos aos equipamentos
Aquecimento	Dimensionamento de condutores	Projeto e manutenção periódica	Danos aos equipamentos
Faísca	Conexões	Revisar emendas e pontos de conexão	Incêndios e choques elétricos
Choque	Fios expostos	Revisão periódica	Incidentes e vidas
Perdas elétricas	Dimensionamento de condutores	Projeto e manutenção periódica	Mau funcionamento de equipamentos e perda de recurso financeiro sem usar a eletricidade

Fonte: adaptado de [3].

Para entender como evitar a maioria destes riscos elétricos e proteger a instalação, bem como a vida dos usuários envolvidos, serão apresentados alguns recursos, ferramentas e conhecimentos necessários para que as instalações elétricas sejam apenas uma fonte de ampliação da qualidade de vida da sociedade.

4.2 DIMENSIONAMENTO ADEQUADO E MANUTENÇÃO DA INSTALAÇÃO ELÉTRICA

Para o correto funcionamento da instalação elétrica, vários requisitos devem ser seguidos. A própria NBR 5410 [11] designa os requisitos mínimos e aponta os pontos importantes a serem observados. A NR 10 complementa com os itens de segurança, uso e manutenção periódica. A bibliografia de instalações elétricas aponta alguns questões a observar [12]. Basicamente, são esses os pontos:

- 1) levantamento de carga instalada na residência;
- 2) projeto e dimensionamento adequado da instalação;
- 3) realização da instalação com mão de obra adequada;
- 4) uso dos dispositivos projetados para a instalação;
- 5) revisão periódica, no mínimo a cada 5 anos, de toda instalação;

6) revisão a cada evento suspeito de falha ou descarga atmosférica;

7) readequação do projeto para aumentos da carga instalada.

Detalhando um pouco mais esses 7 itens, tem-se que em 1 o cliente deve informar ao projetista todos os equipamentos eletroeletrônicos que possui, permitindo que este dimensione a carga e os circuitos necessários para atendê-los adequadamente.

Em 2, o projetista realiza o projeto, dimensionando cada circuito e cada condutor, bem como dispositivos de iluminação e proteção que serão necessários. Por fim, determina a entrada de energia e solicita a ligação da UC junto à concessionária de energia elétrica, após (3) finalizar toda a instalação com mão de obra adequada, que, dessa forma, irá utilizar os equipamentos adequados (4) para efetiva proteção e funcionamento da rede elétrica residencial.

O item 5 aponta que a cada 5 anos, no máximo, deve ser realizada uma revisão de toda instalação por um profissional qualificado para tal (3). Essa revisão deve ser antecipada em tempo se houver algum evento de falhas ou queimas de equipamentos eletroeletrônicos ou descargas atmosféricas (6). Essa observação é extremamente importante na medida em que os dispositivos de proteção podem ser danificados nessas situações, inclusive.

Em 7, finalmente, lista-se a necessidade de rever o projeto a partir do aumento de carga. Normalmente, os usuários vão instalando novos equipamentos e ampliando seus itens de conforto eletroeletrônicos sem cuidar que sua instalação não foi projetada para suportar essa demanda crescente. Assim, em casos de reformas ou ampliação de equipamentos o projeto deve ser revisitado por profissional habilitado que possa determinar se a instalação suporta a nova demanda. Inclusive, deve-se ressaltar que os dispositivos de proteção também podem perder funcionalidade nesses casos.

5.0 – RESULTADOS

A partir dos dados observados e apontados neste trabalho, percebe-se que há uma lacuna na avaliação de segurança no ambiente domiciliar. Na formação para Engenharia de Segurança existem vários temas que apontam para a importância do conhecimento na análise do risco, atitude preventiva e ação que antecipe possíveis problemas.

Partindo desse ponto, o trabalho propõe que o usuário de instalações elétricas residenciais possa ter uma cartilha básica e uma lista de itens que ele mesmo possa checar em sua residência. Consolidando, assim, os principais riscos elétricos apontados e os requisitos para um uso adequado da eletricidade. A Tabela 4 apresenta o formulário

proposto para o usuário checar sua própria instalação elétrica.

Nesse formulário, foram elencadas perguntas sobre a percepção do uso da eletricidade. Aquelas que possuem uma criticidade mais elevada foram marcadas em vermelho; o nível médio de risco, marcado em amarelo e o menor risco em branco.

Respondendo sim ou não ao lado de cada pergunta, o usuário da instalação pode computar o grau de risco perceptível ao observar quantas respostas positivas em cada grau de risco foram obtidas. A Tabela 3 apresenta a delimitação do grau de risco adotada. Junto com esta tabela, vai ao usuário uma figura de um DPS e de um DR, itens presentes nas questões a serem respondidas (Figura 4).

Tabela 3 – Tabela auxiliar para interpretar grau de risco elétrico na instalação

Tabela para auxiliar na decisão	
Pontuação	Ação
1 sim na cor vermelha	chamar um profissional da área com urgência
mais de 1 sim na cor vermelha	chamar um profissional da área imediatamente
até 2 sim na cor amarela	observar e agendar uma visita do profissional
3 ou mais sim na cor amarela	chamar um profissional da área imediatamente
até 4 sim na cor branca	observar e agendar uma visita do profissional
5 ou mais sim na cor branca	chamar um profissional da área com urgência

Para balizar a análise do resultado observado é proposta a Tabela 5, de forma a elucidar a classificação proposta para o grau de risco que o usuário encontrou ao fazer sua checagem percebida.

Tabela 4 – Formulário proposto para checagem da instalação elétrica

Formulário para análise da percepção sobre a instalação elétrica monofásica			
Todas as perguntas são referentes à sua residência.			
Responda simplesmente sim ou não às perguntas.			
Depois analise a tabela conforme quantidade de "sim" e a cor da pergunta		Respostas	
1	Já teve sensação de choque elétrico em algum ponto de sua casa?	() Sim	() Não
2	Sente cheiro de queimado ao usar algum equipamento elétrico?	() Sim	() Não
3	Escuta barulho ou vê fiscamento oriundo da eletricidade?	() Sim	() Não
4	No DPS existe um ponto vermelho na sua parte inferior?	() Sim	() Não
5	Faz mais de 5 anos que um profissional verificou sua instalação elétrica?	() Sim	() Não
6	Você não possui DPS instalado na sua entrada de energia elétrica?	() Sim	() Não
7	Você não possui DR (Dispositivo Residual) em sua instalação?	() Sim	() Não
8	Instalou mais equipamentos elétricos desde a última revisão da instalação elétrica?	() Sim	() Não
9	Quando liga algum equipamento outros apresentam mau funcionamento?	() Sim	() Não
10	Você não tem identificação dos circuitos elétricos próxima aos disjuntores internos?	() Sim	() Não
11	Toda sua instalação está num único disjuntor no medidor de energia?	() Sim	() Não
12	Algum T ou régua apresenta aquecimento?	() Sim	() Não
13	Usa adaptadores de padrão de tomadas?	() Sim	() Não
14	Usa T ou extensões pela casa?	() Sim	() Não
15	Não utiliza mão de obra qualificada para novas instalações elétricas?	() Sim	() Não
16	Você possui o projeto elétrico de sua instalação elétrica?	() Sim	() Não
17	Queimam equipamentos elétricos de forma periódica?	() Sim	() Não
18	As luzes piscam ou apresentam mau funcionamento em alguns momentos?	() Sim	() Não
19	Seu chuveiro fica a mais de 15 m da entrada de energia?	() Sim	() Não
20	Possui tomadas externas à residência?	() Sim	() Não
21	O chuveiro/torneira elétrica está ligado com os 3 fios usando fita isolante ou tomada?	() Sim	() Não
22	Existe algum ponto externo com eletricidade, como quiosque, por exemplo?	() Sim	() Não



Figura 4 – Informação auxiliar para responder as questões.

Tabela 5 – Grau de risco de uma instalação elétrica

Nível de risco	Causa provável	Como evitar	Impacto
Aquecimento	Sobrecarga na instalação	Projeto e manutenção periódica	Incêndios e danos aos equipamentos
Aquecimento	Dimensionamento de condutores	Projeto e manutenção periódica	Danos aos equipamentos
Faiscamento	Conexões	Revisar emendas e pontos de conexão	Incêndios e choques elétricos
Choque	Fios expostos	Revisão periódica	Incidentes e vidas
Perdas elétricas	Dimensionamento de condutores	Projeto e manutenção periódica	Mau funcionamento de equipamentos e perda de recurso financeiro sem usar a eletricidade

Fonte: adaptado de [3].

O uso da ferramenta apresentada na Tabela 4 pode trazer uma boa percepção do grau de risco envolvido no uso da eletricidade no ambiente analisado. Fenômenos como aquecimento e demais riscos elétricos podem estar escondidos da percepção de um leigo e ao responder as perguntas a consciência do processo da eletricidade pode começar a fazer sentido. Assim, ao realizar esta checagem, o usuário pode adquirir uma percepção apropriada sobre sua instalação elétrica e as consequências inerentes ao seu mau uso ou utilização em más condições.

5.1 ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO CHECKLIST

Para validar os dados e poder obter uma resposta do uso da ferramenta, a planilha foi distribuída para 10 pessoas com conhecimento desde ensino fundamental até nível superior. Foi solicitado que fizessem a aplicação do *checklist* em

suas residências e retornassem com os resultados obtidos.

Não foram passadas informações adicionais para poder medir o grau de entendimento que eles obteriam do material, de forma a validar a proposta inicial: ser utilizado por usuários sem conhecimentos de eletricidade e instalações elétricas. Sendo que o retorno foi positivo, nesse sentido. Todos conseguiram utilizar e dois perguntaram sobre o que eram DPS e DR. Na resposta, apenas foi solicitado que olhassem o verso da folha (com as imagens da Figura 4) para as informações adicionais necessárias.

Sobre os resultados da avaliação, a Tabela 6 apresenta um resumo dos dados obtidos.

Tabela 6 – Resultados obtidos após aplicação da lista de checagem

Pontuação	Resultados obtidos
1 sim na cor vermelha	2
mais de 1 sim na cor vermelha	1
até 2 sim na cor amarela	0
3 ou mais sim na cor amarela	2
até 4 sim na cor branca	4
5 ou mais sim na cor branca	1

Percebe-se, pelo resultado da Tabela 6, que existem problemas graves em cerca de 30% das residências analisadas. Ao somar esse item com alta gravidade dos riscos médios, chega-se a 50% de problemas graves nas instalações elétricas residenciais, percebidos por seus próprios usuários. A localidade onde foi aplicado o teste possui um IDH = 0,74 (Índice de Desenvolvimento Humano) bom segundo o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) [13], mas percebe-se um desleixo com esses detalhes na maioria das construções, sobretudo nas mais antigas, o que se comprovou com essa amostra de 10 análises.

Não foram questionados os participantes a respeito da tomada de decisão em acionar o profissional competente para solucionar os problemas detectados.

6.0 – CONCLUSÕES

Ao perceber que existem inúmeros acidentes elétricos ocorrendo em âmbito domiciliar, este trabalho teve como objetivo determinar uma maior consciência por parte dos usuários de instalações elétricas e, para isso, estudaram-se os riscos elétricos e os conceitos básicos de funcionamento da eletricidade nas residências brasileiras. Com esses dados, foi elaborado um questionário para ser aplicado nas residências

6/7

brasileiras por qualquer pessoa, sem necessários conhecimentos prévios, de forma a obter uma percepção do funcionamento da instalação elétrica domiciliar.

Ao realizar uma amostra em 10 residências, aplicando o questionário, foi obtido um resultado que em 50% das análises houve a necessidade de acionamento urgente do especialista e em todas, sempre teve uma resposta positiva para urgência, pelo menos.

Com isso, percebe-se que existem formas de melhorar o conhecimento dos usuários quanto às instalações elétricas e ao convívio com riscos elétricos, por vezes desconhecidos ou ignorados. Além disso, cria-se uma atitude preventiva nos usuários da eletricidade, inclusive no ambiente residencial, visto que o questionário não requer conhecimentos específicos para ser aplicado e não necessita de equipamentos, sendo uma avaliação de percepção do uso da eletricidade no ambiente.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] RODRIGUES, M. F. **METODOLOGIA DE DETECÇÃO DE RISCOS ELÉTRICOS EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS MONOFÁSICAS.** Monografia Engenharia de Segurança do Trabalho. Uniasselvi. 2023.

[2] MTE - Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 10 - SEGURANÇA EM INSTALAÇÕES E SERVIÇOS EM ELETRICIDADE.** Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-específicos/secretaria-de-trabalho/inspeção/segurança-e-saúde-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-10.pdf>. Acessada em: 05/11/2022.

[3] ABRACOPEL - Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade. **Anuário de Riscos Elétricos.** Ebook - ABRACOPEL. 1. ed. - Salto-SP: Doisa Organização Documental, 2019.

[4] ABRACOPEL - Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade. **Percepção de segurança com eletricidade.** Ebook - ABRACOPEL. 1. ed. - Salto-SP: Doisa Organização Documental, 2022.

[5] MARTINHO, Meire Biudes; MARTINHO, Edson; DE SOUZA, Danilo Ferreira (Org.). **ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ACIDENTES DE ORIGEM ELÉTRICA 2022 ano base 2021.** Salto-SP: Abracopel, 2022. DOI: 10.29327/560614.

[6] ABRACOPEL - Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade. **Raio X das instalações elétricas residenciais brasileiras.** Ebook - Procobre e Abracopel. São Paulo. 2017.

[7] CARIDADE, G. S. **MANUAL DE RISCOS ELÉTRICOS INTRODUÇÃO ÀS REDES DE PROTEÇÃO.** 2012. Universidade do Porto. Portugal. Dissertação de Mestrado. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/68289/1/000154966.pdf>. Acessado em: 09/01/2023.

[8] BARKOKÉBAS JR. ET AL, 2008. **Estudo dos Riscos Elétricos: Análise dos Sistemas de Proteção de Acidentes com Terceiros na Região Metropolitana do Recife.** Disponível em: <http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081209150449-ptr24.pdf>. Acessado em: 09/01/2023.

[9] BARSANO, P. R.; BARBOSA, R. P. **Segurança do Trabalho: guia prático e didático.** 2ª Ed. São Paulo: Érica, 2018.

[10] ERCOLINO JR., P. DOS SANTOS, L. Estudo de viabilidade de implantação de dispositivos e sistemas elétricos de segurança para máquinas de fundição. TCC. Unisociesc. 2021. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/17746>. Acessado em: 09/01/2023.

[11] ABNT. 2002. **NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão.**

[12] CREDER, H. **INSTALAÇÕES ELÉTRICAS.** 2021. 17ª. Edição. Editora LTC. São Paulo/SP.

[13] IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Índice de Desenvolvimento Humano.** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/pesquisa/37/30255?tipo=ranking>. Acessada em: 05/2023.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

Principais perigos nas proximidades do canal da descarga atmosférica: tensões de passo, toque e líderes ascendentes não-conectivos

Miltom Shigihara
IEE-USP
mshigi@iee.usp.br

Hélio E. Sueta
IEE-USP
sueta@iee.usp.br

Danilo F. de Souza
UFMT/IEE-USP
danilo.ferreira.souza@hotmail.com

RESUMO

As descargas atmosféricas (DA's) podem causar diversos tipos de danos às estruturas, infraestruturas e aos seres humanos [1]. Segundo Cooper, M. A. (2002) [2], os seguintes mecanismos podem ser danosos aos seres vivos e são classificados em cinco tipos, sendo que possuem grande destaque as tensões de toque e de passo. Entretanto, o chamado quinto mecanismo de dano, denominado de Líder Ascendente Não-Conectivos (LANC) [3] ou do Inglês *Unconnected Upward Leader* (UUL) [4] ainda é pouco discutido na literatura. Em termos estatísticos, a frequência estimada desse quinto mecanismo de dano, o LANC representa entre 10% e 15% dos danos que podem ser causados pelas descargas atmosféricas [5]. Adicionalmente, no Brasil, devido à extensão territorial e à grande exploração de atividades agrícolas, segundo a Abracopel (2022) [6], os acidentes fatais foram de 62,5% dentre as atividades levantadas para o estudo. Assim, no presente trabalho, foram apresentadas simulações referentes aos três mecanismos de danos citados (tensões de toque e passo, com ênfase no LANC), utilizando um modelo de corpo humano para altas frequências.

1.0 – INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo explorar os efeitos das tensões de toque e de passo, bem como das LANCs, que podem ocorrer em seres humanos.

Na parte inicial foi apresentada uma breve revisão de literatura, sobre os modelos de corpos humanos em relação às tensões de toque e de passo, com foco em modelos de alta frequência. Importante ressaltar, em termos dos LANCs, há poucas informações na literatura e menos trabalhos ainda referentes a acidentes envolvendo os LANCs.

A Tabela 1 mostra a frequência estimada dos danos causados pelas descargas atmosféricas para cada um dos cinco tipos de mecanismo, para países desenvolvidos.

TABELA 1 - Frequência estimada dos danos causados pelas descargas atmosféricas para cada tipo de mecanismo (adaptada de [5]).

Mecanismo	Frequência
Descarga direta	3 – 5%
Tensão de toque	15 – 25%
Descarga lateral	20 – 30%
Tensão de passo	40 – 50%
LANC	10 – 15%

Com base nas informações disponíveis em recentes pesquisas sobre o comportamento das descargas atmosféricas [3][4][7][8], bem como de resposta do corpo humano em alta frequência [9]–[13], foram feitas simulações computacionais no programa *Electromagnetic Transients Program – EMTP* [14], a fim de avaliar possíveis efeitos e danos que podem causar em seres humanos.

2.0 – ESTADO DA ARTE

Estão apresentadas nesta seção três relevantes assuntos sobre perigos oriundos das descargas atmosféricas com relação ao histórico das pesquisas. A Tabela 2 [16] mostra o risco associado à descarga atmosférica no caso de a pessoa adotar os métodos de proteção, bem como os cuidados contra o efeito das descargas atmosféricas.

TABELA 2 – Taxa de risco caso haja adoção de redução de risco (adaptada de [16]).

Mecanismo	Frequência
Descarga direta	3%
Tensão de toque	0%
Descarga lateral	0%
Tensão de passo	33%
LANC	9%

A Tabela 2 mostra que mesmo com os cuidados adotados contra a ocorrência das descargas atmosféricas, a probabilidade de sofrer com um LANC é de 9%, sendo que a tensão de passo é o que maior probabilidade de causar danos, de 33%. Tensões de passo podem ocorrer também dentro de residências, devido à diferença de potencial que pode ocorrer entre as pernas da vítima.

2.1 – TENSÕES DE PASSO E DE TOQUE

A norma ABNT NBR 7117:2012 [15], no item 3.13 define tensão de passo como “diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo, separados pela distância de um passo de uma pessoa, considerada igual a 1,0 m” e no item 3.14, a tensão de toque como “diferença de potencial entre uma estrutura metálica aterrada e um ponto da superfície do solo, separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa, e considerado igual a 1,0 m”. Em termos simplificados, a aplicação desses conceitos são feitos por meio de uma simples resistência de 1 kΩ para as simulações e avaliações para o caso de elevação de potencial [17][18]. Porém, esse valor não é fixo, uma vez que é variável em função da frequência do fenômeno envolvido, como no caso das descargas atmosféricas [19].

A Figura 1 mostra resultado de estudo sobre a variação da impedância do corpo humano em função da frequência [20].

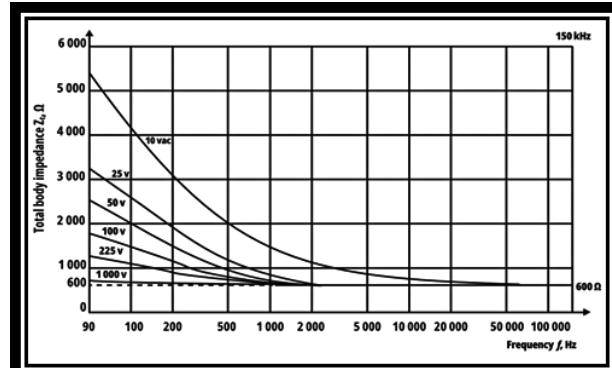


Figura 1 – Impedância total do corpo em função da frequência [20].

A Impedância total do corpo em função da frequência mostrada na Figura 1 se refere a tensões de toque de 10 V até 1 kV e na faixa de frequências de 50 Hz até 150 kHz. Nota-se que para maiores frequências, a impedância total do corpo tende ao valor de 600 Ω.

Relevantes estudos sobre o efeito do choque elétrico podem ser encontrados em [21]-[24].

Nos últimos anos tem havido notícias nas quais pessoas tem sofrido danos oriundos de descargas atmosféricas, mesmo dentro de residências, porém sem as proteções necessárias

ou mesmo devido ao uso de celulares, com carregador conectado durante as tempestades. São fatalidades que poderiam ser minimizadas se critérios corretos fossem adotados (conforme [25]).

Normalmente, as descargas diretas em algum objeto são as causadoras dos surtos que transferem em linhas elétricas ou telefônicas para o caso das tensões de toque e a formação de gradientes de potenciais no solo são os responsáveis pelas tensões de passo [17][19].

2.2 – LANC – LÍDER ASCENDENTE NÃO-CONECTIVO

Estudos envolvendo sobre esse assunto são bem recentes, ora devido ao avanço das câmeras de alta velocidade, assim como pelos avanços dos sistemas de medições, com equipamentos de altas taxas de amostragem presentes em diferentes tipos de sensores, como de correntes, de campos elétrico e magnético.

A Figura 2 mostra uma situação na qual há formação de vários LANCs obtida em uma câmera de alta velocidade (taxa de até 70000 imagens por segundo).



Figura 2 – Exemplo de formação de vários LANCs [16].

Na Figura 2, os líderes ascendentes 1, 3, 4, 5 e 6 são os LANCs e o 2 é o Líder Ascendente Conectivo - LAC (ou do Inglês *Upward Connecting Leader* - UCL).

Os termos LANC e LAC são os usados em [3].

Historicamente, a observação de LANCs e LACs são descritas desde 1936 [27] por meio das *Boys Camera* [28]. A Figura 3 apresenta um exemplo de fotografia obtida utilizando uma dessas câmeras.

Em 1975, Krider e Ladd [29] apresentaram um trabalho, no qual mostra uma fotografia feita em posição pré-determinada e que possuem imagens de LANCs e LACs conforme Figura 4.

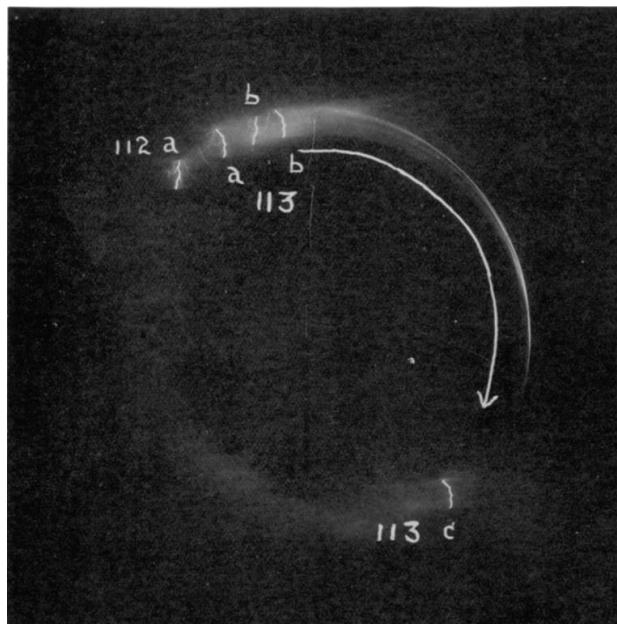


Figura 3 – Exemplo de fotografia obtida por um Boys Camera [28].

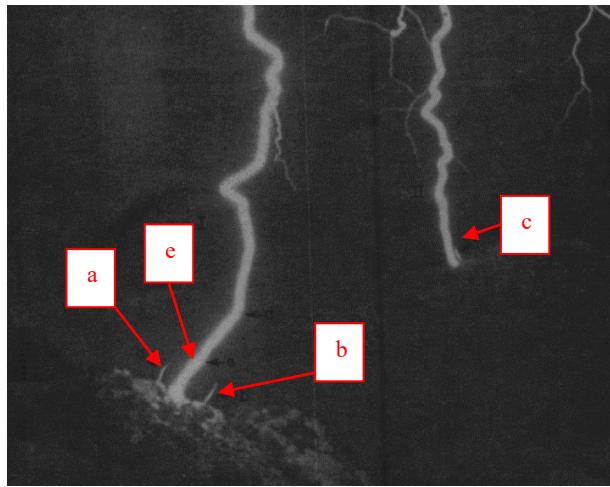


Figura 4 – LAC e LANCs (adaptada de [29]).

Na Figura 4, “c” e “e” se referem ao LAC e “a” e “b” aos LANCs.

Em [4][7] são apresentados resultados mais detalhados sobre os LANCs. A Figura 5 mostra uma típica corrente que é gerada durante a formação desses LANCs.

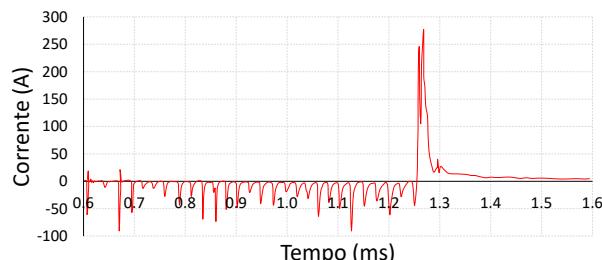


Figura 5 – Típica corrente de uma LANC (adaptada de [4]).

A Figura 5 é um LANC formado devido a uma descarga descente negativa no topo de uma estrutura.

Tipicamente, Nag *et al.* [4] estimou alguns parâmetros de valores médios conforme segue:

- valor de pico da corrente negativa: -30.1 A;
- intervalo entre os picos da corrente: 20 μ s;
- duração da corrente de pulso negativa: 10 μ s;
- duração da fase de desenvolvimento: 789 μ s;
- carga transferida durante a fase de desenvolvimento: -6.4 mC;
- valor de pico da corrente positiva: 283 A;
- duração da fase de colapso: 388 μ s;
- carga transferida durante a fase de colapso: 4.7 mC.

O detalhamento da Figura 5 é dado na Figura 6, conforme segue:

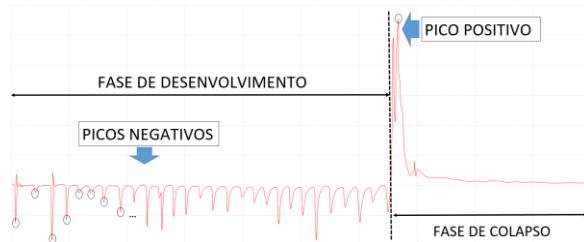


Figura 6 – Detalhamento dos parâmetros (adaptada de [4]).

Na Figura 6 observa-se dois estágios na formação do LANC, a fase de desenvolvimento se deve à parte da formação dos líderes escalonados da descarga descendente e a fase de colapso ao instante anterior à formação da descarga de retorno. Por outro lado, o efeito dessa formação no LAC foi recentemente apresentado em [7].

2.3 – MODELO DE CORPO HUMANO

O modelo de corpo humano pode ser dado com uma simples resistência de 1 $k\Omega$, para tensão de 200 V na frequência de 50/60 Hz [20]. Adicionalmente, uma representação do corpo humano é dada conforme Figura 7.

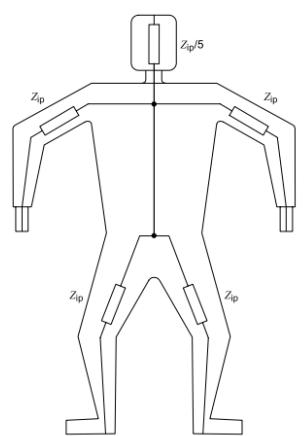


Figura 7 – Modelo simplificado de corpo humano, sendo Zip a impedância parcial interna de uma das extremidades (braço ou perna) [20].

Para descarga direta, com incidência do raio na cabeça, o modelo pode ser representado conforme Figura 8. Esse modelo também é aplicável para descarga lateral e tensão de toque. As tensões que aparecem na pele devido à descarga direta consistem na resistência e capacitância em paralelo de $10\text{ k}\Omega$ e 25 nF , respectivamente. Adicionalmente, *gaps* (não mostrados no circuito) podem ser inseridos no circuito de forma a simular possível centelhamento pela superfície, em um adulto de 180 cm esse valor é estimado em 500 kV [16].

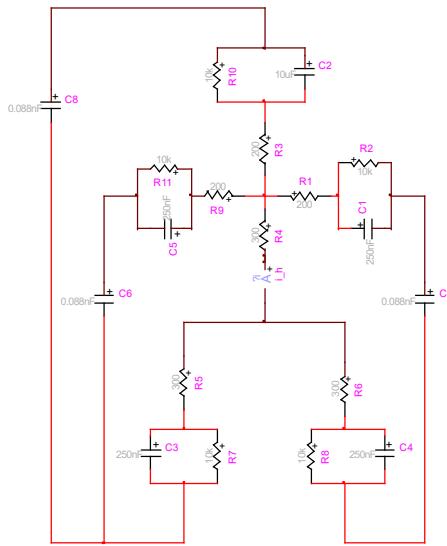


Figura 8 – Circuito equivalente do corpo humano submetido a uma descarga direta na cabeça (adaptado de [16]).

Assim, essencialmente, o circuito elétrico do corpo humano é o mesmo para modelos de tensão de passo e de toque. Detalhes desse circuito podem ser obtidos em [16]. Por outro lado, para um LANC, o circuito elétrico do corpo humano está mostrado na Figura 9.

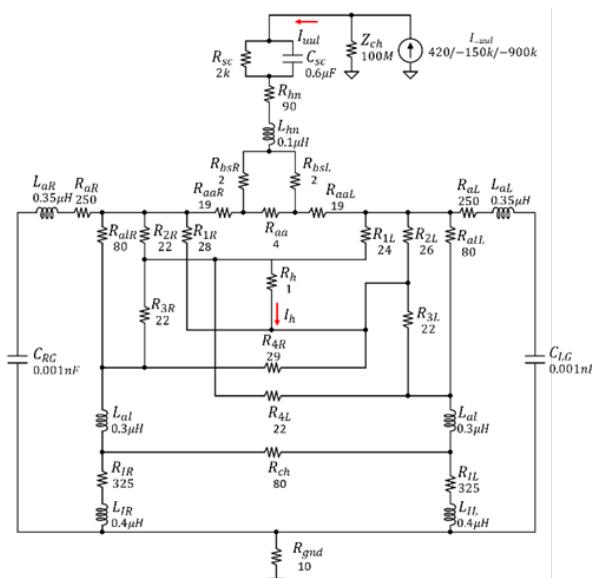


Figura 9 – Circuito de modelo de corpo humano mais detalhado com fonte de corrente sobre a cabeça (adaptado de [9][13])

O circuito da Figura 9 é bastante útil para se usar na avaliação da corrente que passa pelo coração no caso de um LANC. Os componentes presentes no modelo da Figura 9 são:

- I_{uul} : corrente do LANC;
- Z_{ch} : impedância do canal da descarga, foi usado o valor de $100\text{ M}\Omega$ por ser uma fonte de corrente, no entanto a impedância do canal formado por uma descarga atmosférica é estimada de 600Ω a 2500Ω [30];
- R_{sc} e C_{sc} : resistência e capacitância em paralelo do crânio, respectivamente;
- R_{hn} : resistência entre cabeça-pescoço;
- L_{hn} : indutância entre cabeça-pescoço;
- R_{bsR} : resistência do tronco;
- R_{aa} : resistência periférica do tronco braço-braço;
- R_{aaR} e R_{aaL} : resistência periférica do tronco braço-braço de cada lado, direito e esquerdo;
- R_{1R} e R_{1L} ; R_{2R} e R_{2L} ; R_{3R} e R_{3L} ; R_{4R} e R_{4L} : resistência interna do corpo;
- R_{alR} e R_{alL} : resistência periférica do tronco braço-perna, do lado direito e lado esquerdo;
- R_{aR} e R_{aL} : resistência do braço;
- R_h : resistência do músculo do coração;
- C_{RG} e C_{LG} : capacitância dos braços;
- L_{al} : indutância do tronco periférico;
- R_{ch} : resistência do tronco periférico;
- R_{IR} e R_{IL} : resistência das pernas;
- L_{IR} e L_{IL} : indutância das pernas;
- R_{gnd} : resistência de aterramento;
- I_{uul} e I_h : amperímetros virtuais.

O artigo presente em [8] possui mais detalhes sobre o efeito do LANC sobre o corpo humano. É importante ressaltar que o modelo apresentado na Figura 9 é uma aproximação para fazer uma simulação e sua avaliação do efeito do LANC sobre o corpo humano, uma vez que praticamente não existem dados sobre os efeitos dos LANCs sobre o corpo humano.

3.0 – MODELAGEM E RESULTADOS

Dois modelos de corpo humano foram elaborados no simulador EMTP®, sendo um deles (Figura 8) para simular efeito da tensão de passo e tensão de toque. O outro modelo, presente na Figura 9, é usado para simular um LANC.

Uma típica forma de onda de corrente de primeira descarga de retorno foi utilizada na simulação da tensão de toque: corrente de pico de 30 kA , tempo de frente de $5,5\text{ }\mu\text{s}$ e tempo de meia-cauda de $75\text{ }\mu\text{s}$ [31]. Simulou-se para o caso de uma pessoa tocando uma altura de $1,6\text{ m}$, de um poste com altura total de $7,6\text{ m}$, no caso está mostrada a corrente que passa através do corpo da pessoa (coração de forma simplificada), conforme

Figura 10. A corrente da descarga atmosférica é injetada no topo desse poste, sendo que a resistividade do solo é dada no circuito por um resistor equivalente de 150Ω (resistividade de $100 \Omega \cdot m$), detalhes dos cálculos estão presentes em [32].

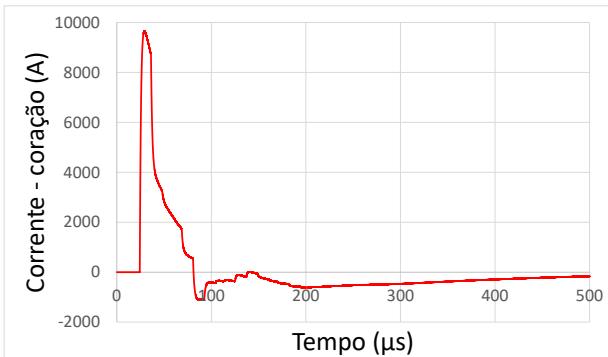


Figura 10 – Corrente que passa através do modelo de corpo humano para tensão de toque.

A Figura 10 mostra que valores elevados de pulsos de corrente (quase 10 kA) podem passar sobre o corpo da pessoa, no caso de a pessoa apenas tocar um objeto sujeito à passagem de uma corrente de descarga atmosférica. Porém é importante salientar que tudo isso depende de várias condições, como características do objeto e da descarga atmosférica, resistividade do solo, etc.

No caso de tensão de passo, a diferença de potencial entre as pernas da pessoa é dada por uma resistência de 150Ω (resistividade de $100 \Omega \cdot m$) em série com uma fonte tensão [16], adicionalmente se a pessoa estiver a 25 m do ponto de incidência de uma descarga atmosférica, a tensão que aparece entre as pernas da pessoa é da ordem de $1,2 \text{ kV}$, com tempo de frente de $1,1 \mu\text{s}$ e tempo de cauda de $32 \mu\text{s}$ [31][32]. A Figura 11 mostra a corrente que passa através do corpo nesse caso.

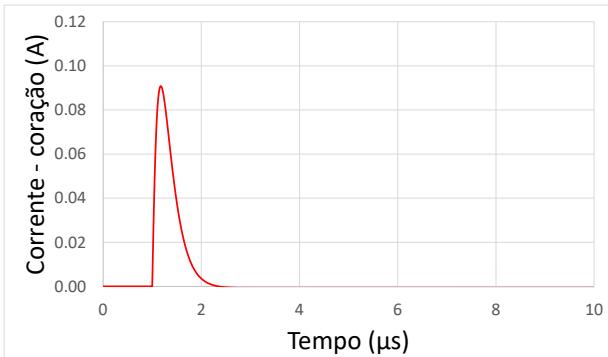


Figura 11 – Corrente que passa através do modelo de corpo humano para tensão de passo.

Para tensão de passo, o efeito capacitivo e outros elementos do corpo humano podem afetar na passagem de corrente através do coração, conforme mostra a Figura 11. No exemplo simulado, a corrente atingiu um valor da ordem de 90 mA apenas pelo efeito capacitivo.

A Figura 12 mostra a corrente que passa através do coração de uma pessoa por conta de um LANC formado na cabeça de uma pessoa. A forma de onda do LANC utilizada é a apresentada na Figura 5 e o modelo de corpo humano o apresentado na Figura 9.

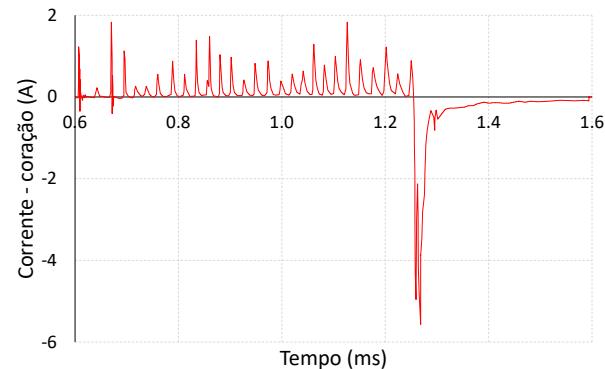


Figura 12 – Corrente que passa através do modelo de corpo humano para um LANC.

A formação de um LANC pode afetar de forma significativa a passagem de corrente elétrica através do coração, conforme mostra a Figura 12. Nesse exemplo simulado, a corrente atingiu valor de mais de 5 A .

4.0 – CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta uma visão geral e simplificada de três importantes mecanismos que podem causar sérios danos em pessoas devido a descargas atmosféricas, sendo que em vários casos podem levar a óbitos.

São apresentados históricos sobre esses mecanismos, assim como alguns de seus modelos e simulações simplificadas no EMTP®. Os resultados das simulações mostram que a tensão de toque e o LANC tendem a ser críticos, sendo a tensão de passo menos crítico, porém não sendo desprezível (depende bastante da distância da pessoa ao ponto onde a corrente do raio penetra na terra).

Ficou também demonstrado que o quinto mecanismo de danos (*Unconnected Upward Leader* - UUL) pode provocar choque elétrico, parada cardíaca e até mesmo queimaduras. Comprovado o risco associado a este mecanismo ainda pouco discutido. O instante que estas correntes passam pelo coração de uma pessoa em relação ao ciclo cardíaco pode ser crucial para que o coração entre em fibrilação.

À medida que modelos de corpo humano com resposta em alta frequência forem desenvolvidos, avaliações mais detalhadas do seu comportamento poderão ser feitas.

5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rakov, V. A., Uman M. A., Lightning: physics and effects, Cambridge University Press, 2007.
- [2] Cooper, M. A., "A fifth mechanism of lightning injury", Academic Emergency Medicine, February, 2002, Volume 9, Number 2, pp. 173-174.
- [3] Lauria, P. B., Estudo de líderes ascendentes iniciados nos para-raios em resposta às descargas descendentes negativas, Dissertação Mestrado, INPE, São José dos Campos, 2021.
- [4] A. Nag et al., "Inferences on upward leader characteristics from measured currents," Atmos. Res., vol. 251, p. 105420, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.ATMOSRES.2020.105420.
- [5] Cooper, M. A., Holle, L. R., Andrews, C., "Distribution of Lightning Injury mechanisms", 20th ILDC e 2nd ILMC, Tucson, Arizona, EUA, 2008.
- [6] ABRACOPEL – Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade, Anuário estatístico ABRACOPEL de acidentes de origem elétrica, 2022 (ano-base 2021).
- [7] M. N. Plaisir et al., The lightning attachment processes observed on a submicrosecond-scale: measurements of current and video, Int. Conf. on Grounding & Lightning Physics and Effects (GROUND2023 & 10th LPE), Belo Horizonte, Maio, 2023.
- [8] M. Becerra e V. Cooray, On the interaction of lightning upward connecting positive leaders with humans, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, No 4, Nov. 2009.
- [9] W. A. Chisholm and D. H. Nguyen, "Coordinating the Einthoven Body Impedance Model for ECG Signals with IEC 60479-1:2018 Electrocution Heart Current Factors: Invited Lecture - Extended Summary," 2021 35th Int. Conf. Light. Prot. ICLP 2021 16th Int. Symp. Light. Prot. SIPDA 2021, 2021, doi: 10.1109/ICLPANDSIPDA54065.2021.9627369.
- [10] L. ChunLan, D. SongHuai e X. Yue, Study on equivalent circuit of the human body and its transient response against electric shock, The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP2011), 2011.
- [11] G. Dias et al., The need for standardization of human tolerability levels for lightning currents and voltages, 2014 ICLP, Shanghai, China, 2014.
- [12] A. Kern et al., Threat for human beings due to touch voltages and body currents caused by direct lightning strikes in case of non-isolated lightning protection systems using natural components, 35th ICLP & XVI SIPDA, Sri Lanka, 2021.
- [13] M. Rock and C. Drebendstedt, "Lightning Impact on Human Modeled by Network with Lumped Elements," ICLP 2022 - 36th Int. Conf. Light. Prot., pp. 614–619, 2022, doi: 10.1109/ICLP56858.2022.9942467.
- [14] E. Haginomori, T. Koshiduka, J. Arai e H. Ikeda, Power System Transient Analysis: Theory and Practice Using Simulation Programs (Atp-Emtp), Wiley, 280 p., 2016.
- [15] ABNT NBR 7117, Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.
- [16] V. Cooray (editor), The Lightning Flash, Editora IET, 2014.
- [17] International Electrotechnical Commission - IEC/TR 60479-5, Effects of current on human beings and livestock – Part 5: Touch voltage threshold values for physiological effects, Ed. 1.0, 2007.
- [18] IEEE Std 80TM, IEEE Guide for Safety in AC Substation, Grounding, IEEE Power and Energy Society, New York, USA, 2013.
- [19] International Electrotechnical Commission - IEC/TR 60479-4, Effects of current on human beings and livestock – Part 4: effects on lightning strokes, Ed. 2.0, 2011.
- [20] International Electrotechnical Commission - IEC, "IEC 60479-1 Ed. 1.0 en: 2018 - Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects," Geneva, Switzerland, 2018.
- [21] C. F. Dalziel e J. B. Lagen, Effects of electric current on man, Electrical Engineering, Vol. 60, 1941.
- [22] C. F. Dalziel, J. B. Lagen e J. L. Thurston, Electric shock, Electrical Engineering, Vol. 60, 1941.
- [23] P. E. Perkins, Dalziel Revisited Application; Analyzing mixed AC/DC waveforms, 2021 IEEE International Symposium on Product Compliance Engineering (ISPCE), 2021.
- [24] B. Markovski, L. Grcev e V. Arnaudovski-Toseva, Step and touch voltages near wind turbine grounding during lightning strokes, International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, 2021.
- [25] ABNT NBR 5419 séries, Proteção contra descargas atmosféricas, Partes 1, 2, 3 e 4, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.
- [26] M. M. F. Saba et al., "Current measurements of upward leaders from

- buildings," in 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), 2017, no. October, pp. 2–5.
- [27] K. B. McEachron e W. A. McMorris, The lightning stroke: mechanism of discharge., *Gen. Elec. Rev.*, 39(10), pp. 487-96, 1936.
- [28] D. J. Malan e H. Collens, Progressive Lightning. III. The Fine Structure of Return Lightning Strokes, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Sep. 15, 1937, Vol. 162, No. 909 (Sep. 15, 1937), pp. 175-203.
- [29] E. P. Krider, e C. G. Ladd, Upward streamers in lightning discharges to mountainous terrain, *Weather*, 30, 77-81, 1975.
- [30] V. A. Rakov, Transient Response of a Tall Object to Lightning, *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 43, No. 4, pp. 654-661, Nov 2001.
- [31] CIGRE WG C4.407, Lightning Parameters for Engineering Applications, Aug. 2013.
- [32] A. P. Meliopoulos, Power system grounding and transients: an introduction, *Marcel Dekker, Inc.*, EUA, 1988



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

Boas práticas industriais aplicadas ao projeto de geração de energia fotovoltaica na usina Sol do Cerrado (766 KWp) em Jaíba MG

Paulo Henrique V. Soares
Vale

paulo.henrique.v.soares@vale.com

Renee Vilarino
Vale

renne.vilarino@vale.com

Anderson Gomes
Vale

anderson.gomes4@vale.com

Estevao Franco Figueiredo
Vale

estevao.figueiredo@vale.com

Luiz Arantes
Vale

luiz.arantes@vale.com

Felipe Fialho G. Souza
Vale

felipe.fialho@vale.com

RESUMO

O projeto Sol do Cerrado instalado no município de Jaíba, região norte de Minas Gerais, é um dos maiores parques de energia solar da América Latina com potência prevista de 766 Megawatts-pico. Quando em plena capacidade, irá representar 16% de toda a energia consumida pela Vale no Brasil [1].

Durante a concepção do projeto definiu-se o modelo de usina de geração centralizada, logo o empreendimento conta com 69 eletrocentros com potência nominal de 10,3 MVA cada. Como principais diferenciais, esse modelo se destaca por ser uma prática de mercado que reduz o custo de implantação e o prazo de execução da obra.

Durante a etapa de concepção do projeto foram utilizados documentos existentes no Sistema de Padronização da Engenharia (SPE) Vale que definem os requisitos a serem seguidos principalmente na aquisição dos equipamentos.

Essas boas práticas de engenharia acumuladas e registradas ao longo dos últimos projetos quando aplicadas resultam em um elevado padrão de engenharia, melhorias na construção e implantação do projeto, maior disponibilidade da planta e, o mais importante, maior segurança das pessoas e equipamentos.

1.0 – INTRODUÇÃO

O Projeto Sol do Cerrado está instalado no norte do Estado de Minas Gerais a aproximadamente 15 quilômetros da SE Jaíba 230 kV. A Figura 1 apresenta o mapa eletrogeográfico da região da SE Jaíba.

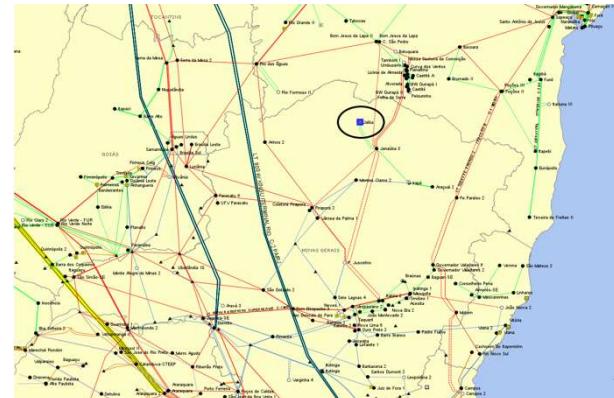


Figura 1 - Mapa eletrogeográfico

O projeto ocupa uma área de 1280 hectares com capacidade de geração de 766 MWp (CC) e 681 MWh (CA). O projeto conta com 1.431.900 módulos fotovoltaicos montados em 15.910 rastreadores solares, permitindo uma melhor geração ao longo do dia. Os 138 inversores de 5,196 MVA são responsáveis por converter a tensão contínua em tensão alternada (690V), sendo esta elevada para 34,5kV. O parque é composto por 69 ITSS (inversor transformador solar) de 10,3 MVA cada que são conectados aos alimentadores da subestação coletora. Nessa etapa a tensão é elevada para 230kV por meio de dois transformadores de 340 MVA conectados ao SIN (Sistema Interligado Nacional) através da SE Jaíba conforme Figura 2.

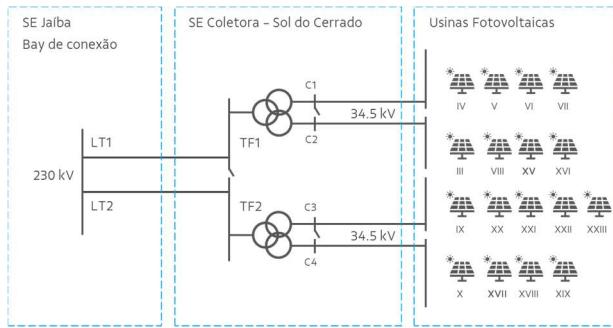


Figura 2 - Unifilar simplificado de conexão ao SIN

2.0 – GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

As características dos principais equipamentos, soluções típicas das unidades geradoras e arranjos necessários para construção do complexo fotovoltaico serão descritas a seguir.

2.1 – MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Os módulos fotovoltaicos são responsáveis pela conversão da irradiância solar incidente em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. São compostos por células fotovoltaicas de silício monocristalino tipo P interligadas em série/paralelo a fim de produzir tensão e corrente suficientes para a produção de energia elétrica. No projeto foram aplicados três modelos diferentes (530W, 535W e 540W) de um único fabricante totalizando 1.431.900 módulos fotovoltaicos.

2.2 – RASTREADORES SOLARES

A estrutura de suporte dos módulos é resistente às condições climáticas, dimensionada para suportar as tensões causadas pelos módulos fotovoltaicos e cargas adicionais causadas pelos ventos na região. Cerca de 16 mil rastreadores solares horizontais de eixo único N-S foram instalados, 90 módulos fotovoltaicos por eixo e pitch (distância eixo a eixo) de 6 m.

2.3 – INVERSORES

Os inversores instalados suportam tensão máxima de entrada de 1500 V com corrente contínua (CC) de 6.560 A a 40 °C. Cada drive de potência possui 20 entradas CC, conectadas a aproximadamente 114 rastreadores solares e 10260 módulos. O MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) trabalha na faixa de 1.005 – 1350 V e, na saída, o inversor entrega 4.937 KW de potência de saída, 4.130 A de corrente alternada (CA) máxima a 40 °C e tensão CA de 690 V [2].

2.4 – UNIDADES GERADORAS

Define-se como Unidade Geradora (UG) o Arranjo Fotovoltaico associado a um único inversor. O

projeto conta com 6 tipos de arranjos, resultando em 16 UGs de 4.937 kW tipo 1, 12 UGs de 4.937 kW tipo 2, 12 UGs de 4.937 kW tipo 3, 70 UGs de 4.937 kW tipo 4, 16 UGs de 4.937 kW tipo 5 e 12 UGs de 4.937 kW tipo 6.

2.5 – SUBESTAÇÕES UNITÁRIAS

O projeto contempla 69 subestações unitárias, sendo essas compostas por:

- Inversores fotovoltaicos;
- Transformador de potência;
- TPs (transformadores de potencial) e TC (transformador de corrente), painel de distribuição e disjuntores de circuitos;
- Sistema de proteção;
- Sistema de medição;
- Sistemas auxiliares;
- Conectores e isoladores para média tensão.

2.6 – SUBESTAÇÃO COLETORA/ELEVADORA

A Subestação Coletora é do tipo convencional, não abrigada e construída de acordo com as normas da ABNT, com setores de 230 kV, setor de transformação composto de 2 transformadores elevadores trifásicos de 230/34,5/34,5kV e 36 alimentadores de 34,5 kV conforme Figura 3.

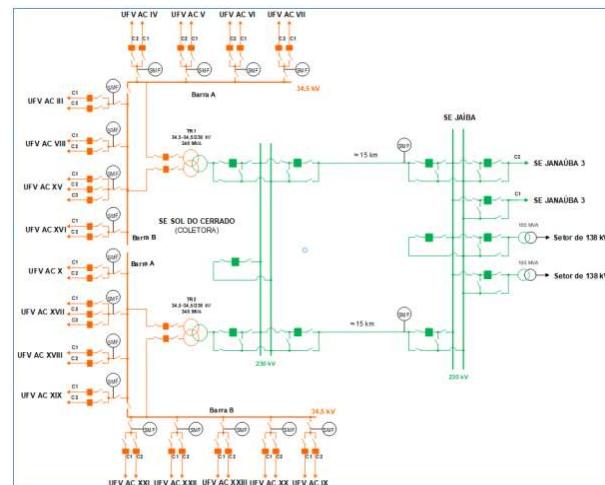


Figura 3 – Subestação coletora/elevadora

2.7 – LINHA DE TRANSMISSÃO E CONEXÃO COM A REDE BÁSICA

A conexão do complexo fotovoltaico é feita na SE Jaíba em 230 kV, através de linha de transmissão de uso exclusivo de aproximadamente 15 km de extensão. A LT é composta por circuito duplo, condutor Tern CAA 795 MCM, 2 condutores por fase, e realiza a interligação da SE Coletora do Complexo Fotovoltaico à Subestação da Rede Básica.

3.0 – BOAS PRÁTICAS

Projetos de geração solar possuem como característica serem de baixo custo de forma a viabilizarem a sua implantação. Diferente da maioria do mercado, em Jaíba foram adotados diversos aspectos primando pela qualidade e segurança da operação conforme descrito nos subitens a seguir.

3.1 – ELETROCENTRO

Os 69 eletrocentros são montados suspensos em uma estrutura de concreto, facilitando a entrada e saída dos cabos (todos vedados com proteção passiva); Escada de acesso de metal com corrimão, porta de acesso separada entre os ambientes de potência e o ambiente de controle além da instalação de brita ao redor do eletrocentro conforme Figura 4, tornando a área mais organizada e limpa, mesmo em períodos de chuva.



Figura 4 - Eletrocentro

3.2 – TRANSFORMADOR E REDE DE MÉDIA TENSÃO (RMT)

A Figura 5 mostra, à esquerda, um transformador corrugado comumente aplicado em parques solar. Já no projeto foram utilizados 69 transformadores idênticos aos especificados na mineração, exceto pela cor branca conforme Figura 5 a direita.



Figura 5 – Transformadores

Já uma inovação do projeto é a substituição da caixa separadora de água e óleo nos transformadores por filtro de hidrocarboneto junto à bacia de contenção conforme Figura 6.

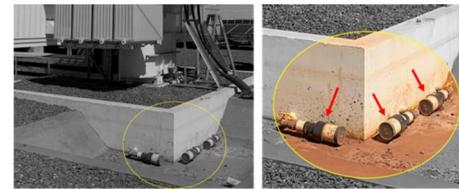


Figura 6 - Filtro de hidrocarboneto

As principais vantagens para aplicação do filtro são: Concentração de hidrocarbonetos na água na saída do filtro <5 ppm; Alta capacidade de filtração de óleo dielétrico e outros hidrocarbonetos; E tamanho reduzido [3].

3.3 – REDE DE MÉDIA TENSÃO (RMT)

A rede de média tensão dentro da usina é subterrânea, através de valas ao longo dos principais acessos conforme Figura 7. Os cabos são colocados sem conduíte, diretamente sobre um leito de areia, cobertos com terra compactada e protegidos por placas de PVC com fita indicando a área. Os cabos são de alumínio, mono núcleo, para um nível de tensão de 20/35kV, não propagadores de chama e livres de halogênio. Possuem flexibilidade classe II e isolamento TR-XLPE.



Figura 7 – Cabo com isolação TR-XLPE

O fenômeno da arborescência (*water trees*) reduz o tempo de vida útil dos cabos isolados em XLPE. Muitas ações de pesquisa e desenvolvimento foram tomadas para evitar a ocorrência deste fenômeno para consolidar o TR-XLPE (*Water Treeing Retardand XLPE*). Os testes comparativos em campo de tensão realizados na concessionária de energia, a Center Point Energy (*ex-Houston Lightning & Power System*) envolvendo cabos de 35 kV após dez anos de operação mostram as seguintes suportabilidades: 10 kV/mm para isolamento XLPE; 16 kV/mm para isolamento EPR; e 27 kV/mm para a isolamento TR-XLPE [4].

3.4 – REDE DE COMUNICAÇÃO

Cada uma das 17 UFVs possuem três anéis de rede dedicados utilizando fibra ótica, sendo eles:

- Rede TA: Comunicação dos equipamentos do processo (inversor, estação solarimétrica , NCU, concentrador de sinal, etc...);

- Rede TI/Patrimonial: Disponibilização de rede TI através de *access point* e comunicação com o sistema de CFTV perimetral;
- Rede IEC61850: Comunicação entre os IEDs instalados nos cubículos de 34,5kV com a subestação principal.

Além da segregação física das redes, todas LAN são separadas logicamente por meio de VLAN específicas, dessa forma os dispositivos da UFV1 não acessam os dispositivos das UFV2, por exemplo. Como medida adicional, as portas dos switches sem equipamentos conectados são configuradas em VLAN específicas, desativas e, em alguns casos, bloqueadas fisicamente.

3.5 – SISTEMA DE AUTOMAÇÃO

O sistema SCADA, responsável pela operação da planta, encontra-se na sala de controle da subestação elevadora. Por critério de projeto o sistema SCADA PV (planta fotovoltaica) e SCADA HV (Subestação elevadora) rodam na mesma aplicação, reduzindo o número de servidores e infraestrutura necessária, além de melhorar a “navegabilidade” entre as telas.

Na Figura 8 é possível visualizar parte do SCADA PV e a geração total instantânea da planta na parte superior esquerda.



Figura 8 – SCADA PV

Uma vez que o SCADA PV é totalmente independente do sistema de controle, foram implementados os comandos de habilita, desabilita e rearme dos inversores. A legenda para representar o estado dos equipamentos foram aplicadas utilizando conceitos existentes nas usinas de beneficiamento, onde são representadas as seguintes condições: Cinza – Operando normal; Laranja – Operando com alarme; Azul – Operando em modo reativo; Branco – Parado; Vermelho – Defeito; E Roxo – Defeito.

A Figura 9 ilustra a tela do SCADA HV desenvolvido utilizando os conceitos de IHM de alta performance baseado na norma ISA-101.

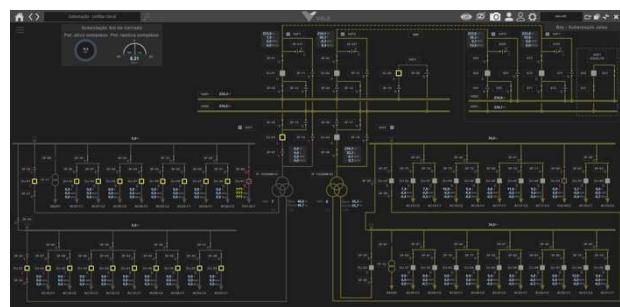


Figura 9 - SCADA HV

3.6 – POWER PLANT CONTROL (PPC)

O sistema de controle PPC é responsável por controlar a injeção de potência ativa do complexo na rede e, por critério de projeto, esse sistema roda de forma isolada, 100% autônomo e independe do SCADA PV. A Figura 10 ilustra o modo de controle de potência ativa habilitado com geração de 466 MW, tensão de 234,2 kV e fator de potência unitário no ponto de conexão.



Figura 10 – SCADA PPC

Essa funcionalidade busca garantir que mesmo durante uma possível falha ou manutenção nos servidores principal e redundante do sistema SCADA, o PPC permaneça ativo e controlando a geração dos parques.

3.7 – CFTV perimetral

O sistema de CFTV perimetral conta com 28 câmeras *speed dome*, de longo alcance e com infravermelho para monitoramento noturno instaladas ao redor do parque conforme Figura 11.



Figura 11 – CFTV Perimetral

3.8 – SISTEMA DE PROTEÇÃO E CONTROLE

O Sistema de Proteção e Controle instalado no Edifício de Controle é responsável pela aquisição de dados, proteção, medição, comando e automatismo do complexo fotovoltaico.

Os relés de proteção e controle possuem comunicação redundante (PRP) em dupla estrela com os switches, interface óptica e protocolos de comunicação entre relés (GOOSE) e entre relés e supervisório (MMS), conforme padrão da IEC-61850.

No painel de servidores existem portas de comunicação monomodo, as quais são responsáveis pela comunicação entre a subestação elevadora Sol do Cerrado e o vão de conexão da Subestação Jaíba, através de 2 pares de OPGW.

4.0 – ESTUDO DE CASO

Todo sistema em comissionamento está sujeito à falhas, sendo o sistema de proteção essencial para eliminar o circuito com defeito no menor tempo possível, garantindo a integridade das pessoas e dos equipamentos.

Após eliminação da falta, o processo de avaliação da sequência de eventos pelo sistema SCADA é fundamental. Para que a análise seja objetiva e assertiva é de máxima importância que as informações presentes na lista de alarmes e eventos sejam confiáveis, sincronizadas e concisas.

Por fim, o retorno da planta à condição normal de operação possui correlação direta com a capacitação do time e a “autonomia” dos equipamentos instalados em campo.

A seguir será apresentado o sequencial de eventos que resultou na parada geral de todas as unidades geradoras no dia 26/06/23 às 10h05m20s e o tempo de análise e resposta para recompor a geração da planta.

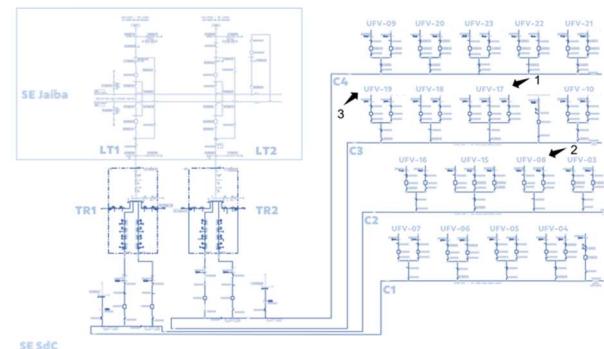
4.1 – EVENTO

Segundo relato do operador, no dia 26/06/23 às 10h05m20s, após o evento de oscilação na iluminação da sala de controle, todos os inversores da planta pararam e a geração de Sol do Cerrado (SdC) foi zerada. No sistema SCADA, todos os disjuntores da SE-Jaíba que alimentam as linhas de transmissão 1 (LT1), 2 (LT2) e transferência estavam fechados. Na SE Coletora os disjuntores do primário e secundário do transformador 1 e 2 também permaneceram fechados. Apenas o disjuntor DJ51, que alimenta a UFV-19, sinalizou circuito 1 aberto por trip.

Por se tratar de um evento que afetou toda a planta, resultando na parada dos 126 inversores em operação, os esforços iniciais foram concentrados para análise de ocorrência externa no SIN. O COS foi consultado para verificação de uma possível oscilação no sistema e após consulta, a concessionária (Sterlite) retornou que nenhum evento foi registrado.

Avaliando se o evento foi interno, conforme Figura 3, observou-se que havia nesse momento a

atividade de subida de carga na UFV-17 (1) em andamento e avaliação das contatoras CC1 e CC2 na UFV-08 (2). Também foi observado, pelo time da operação, que a disjuntor DJ-51 que alimenta o circuito 1 (C1) da UFV-19 (3) havia aberto no mesmo horário por trip de sobrecorrente instantânea.



No IED RET670 F1, responsável pela proteção do transformador TF-02, é possível observar a falta passante durante o curto-círcuito conforme Figura 15.



E0012; 26/06/2023-10:06:04; 943.02; Evento de subtensão CC
F0030; 26/06/2023-10:06:04; 924.66; Subtensão Barramento CC 2
F0510; 26/06/2023-10:29:44; 0; IMPS1 - Falha ao fechar CA do Book 1
F0510; 26/06/2023-10:53:25; 0; IMPS1 - Falha ao fechar CA do Book 1
F0510; 26/06/2023-11:17:05; 0; IMPS1 - Falha ao fechar CA do Book 1
F0510; 26/06/2023-11:40:44; 0; IMPS1 - Falha ao fechar CA do Book 1
F0510; 26/06/2023-11:56:58; 0; IMPS1 - Falha ao fechar CA do Book 1
F0510; 26/06/2023-12:02:27; 0; IMPS1 - Falha ao fechar CA do Book 1
F0310; 26/06/2023-15:31:16; 1; IMPS1 - Falha DessaT Fase U Book 1
F0320; 26/06/2023-15:31:16; 1; IMPS1 - Falha DessaT Fase V Book 1
F0330; 26/06/2023-15:31:16; 1; IMPS1 - Falha DessaT Fase W Book 1

Figura 18 - Lista de eventos (26/06)

A forma de onda de corrente, tensão e a modulação de saída das IMPS1 e 2 podem ser vistas na Figura 19.

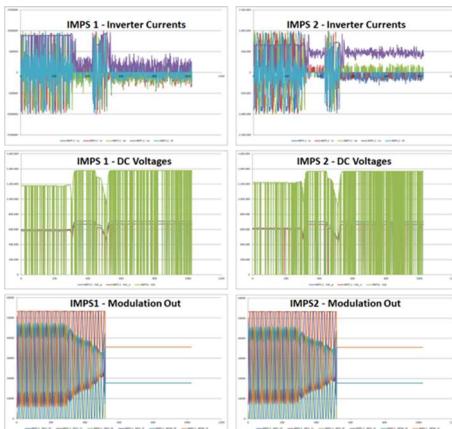


Figura 19 - Forma de onda de tensão e corrente do BOOK1

4.4 – SEQUENCIAL DE EVENTOS – SCADA

O SCADA HV e PV alinhado à expertise do operador possibilitou a rápida identificação do evento. 107 inversores da planta mudaram seus estados para ‘falha’ das 10h05m:21s às 10h05m25s, pelo fato de terem registrado subtensão no barramento CC e sobrecorrente. Às 10h07m04s horas, os dois inversores (A e B) da SE-1023NM-04 comutaram para o estado habilitado, saindo do estado de falha. Às 10h17m12s, foram enviados os primeiros comandos de rearne via sala de controle nos inversores da UFV 08 após a análise previa do time de campo que estava no local com o objetivo de reestabelecer a geração da planta.

Às 10h28m48s, 43 inversores do complexo retomaram seu estado ‘em operação’ a partir do rearne automático do próprio equipamento, sendo que às 10h34m05s a planta já estava gerando 80 MW, sem a intervenção humana. Por fim, pelo SCADA foram executados 39 comandos de reset das falhas nos inversores até às 12h00m00s de forma a retomar a geração total da planta. Dos 107 inversores em falha, 43 retornaram de forma automática e 39 após rearne do operador, ficando pendentes 25 inversores para avaliação e rearne em campo.

4.5 – DESFECHO DO EVENTO

O evento de curto-círcuito trifásico no circuito 1 da UFV-19 com intensidade de 18,5 kA no dia 26/06/23 às 10h05m20s provocou a parada de todas as unidades geradoras do parque. Com base nas evidências apresentadas nos itens 4.2 a 4.2 é possível comprovar a robustez do SEP e a resiliência da planta frente à grandes paradas.

- O sistema se mostrou seletivo e coordenado após a revisão criteriosa de todos os IEDs do 34,5kV na subestação coletora conforme Apêndice A.

- Durante o evento, ocorreu a parada imediata de todos os inversores por subtensão e/ou sobrecorrente.

- Dos 1008 books em operação (63 ITS - 126 inversores) apenas 1 book apresentou defeito e precisou ser desativado, representando 0,099%.

- Antes do desligamento às 10h05m20s, a usina gerava cerca de 180 MW, sendo que em apenas 1m44s depois, os primeiros inversores retornaram à geração de forma automática, sem intervenção do O&M.

- Enquanto a análise era realizada pela equipe técnica, diversos inversores realizaram o auto reset uma vez que o evento inicial havia cessado, retornando à condição de geração.

- Às 10h34h05s a usina voltou a gerar 80 MW (44% da geração pré-falta) de forma automática, apenas por meio das melhorias implementadas junto a engenharia do fabricante.

- A rápida identificação do evento pela operação, alinhada ao time de campo experiente possibilitou, em menos de 2 horas pós-evento, rearmar e colocar em operação todos os inversores (exceto o 16.2.2) espalhados por mais de 1200 hectares com o mínimo de deslocamento da equipe em campo devido à possibilidade de rearne remoto via SCADA.

Como ações futuras, deve-se implementar a seletividade lógica entre as ITSs e a SE coletora, reduzindo o tempo de atuação de 280 ms para 80ms, além da configuração de rearne automático dos CFW500 responsável pelo controle de velocidade dos ventiladores, sendo esse o principal motivo dos demais inversores não terem retornado automaticamente a geração.

5.0 – CONCLUSÕES

Na geração fotovoltaica a característica de operação impõe nos ativos uma condição única, onde, durante o dia, os equipamentos estão em plena geração e, no período noturno, a geração é mínima ou até mesmo zero.

Nesse cenário os transformadores de potência com tanque de expansão são mais robustos e menos susceptíveis a falhas, pois a sua forma construtiva permite, durante o dia, absorver a expansão do óleo de forma mais fluida em comparação com os transformadores de tanque corrugado.

A aplicação de proteção passiva nas entradas e saídas de cabos evitam a entrada de roedores no interior do equipamento, eliminando os eventos de rompimento de cabo ótico utilizado na comunicação e reduzindo a probabilidade da geração de arco voltaico entre barramentos energizados devido à presença de répteis (predadores dos roedores).

Além do aspecto visual, a aplicação de britas no entorno do eletrocentro melhora a condição de acesso ao local em dias chuvosos, aumenta a resistividade do ambiente, tornando-o mais seguro para o operador.

Para as redes de média tensão a utilização de cabos TR-XLPE resulta em uma menor probabilidade de falhas devido à umidade, trabalho em tensões de 35kV e vida útil superior a 30 anos.

Nas bacias de contenção dos transformadores, o uso dos filtros retém permanentemente os hidrocarbonetos nocivos, evitando assim a poluição das águas superficiais e subterrâneas.

Para maior disponibilidade da rede de comunicação, os subparques foram configurados com VLANs específicas, evitando assim que o equipamento de um parque venha a interferir no outro. A aplicação de switches gerenciais aumenta a segurança cibernética e permite maior controle sobre os dispositivos conectados à rede.

Por fim, uma vez que todos os 69 subparques são idênticos observa-se a replicabilidade e agilidade no processo de montagem, comissionamento, treinamento da equipe, operação e manutenção do parque.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Setor de relacionamento com a Imprensa. Vale inicia geração de energia renovável do Sol do Cerrado. Acessado em 12/07/2023 de:
<https://www.vale.com/pt/w/vale-inicia-geração-de-energia-renovável-do-sol-do-cerrado>

[2] Guia de start-up e O&M – Inversor solar central WEG SIW750. Setor de desenvolvimento de conversores para energias renováveis. Revisão 00, 2022, Jaraguá, SC.

[3] Filtrelectric. Filtro separador de água e óleo. Acessado em 14/07/2023 de:
<https://www.filtrelec.com.br/f5-15m2-filtros-de-hidrocarbonetos/>

[4] Ueda, Sidnei. Avaliação técnica e vida útil do TR-XLPE em cabos de média tensão. Acessado em 15/07/2023 de:
<https://www.osetoreletrico.com.br/avaliacao-tecnica-e-vida-util-do-tr-xlpe-em-cabos-de-media-tensao/>



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

MEDIÇÃO TERMOGRÁFICA DA ENERGIA INCIDENTE DOS ARCOS ELÉTRICOS COM VALIDAÇÃO ATRAVÉS DO GUIA IEEE STD 1584-2018 E DO ARCPRO™ 4

Pedro de Oliveira Bacin
UFSM
pedro.bacin@acad.ufsm.br

Marina Camponogara
UFSM
marina.camponogara@acad.ufsm.br

Mateus Franco Fava
UFSM
mateus.fava@acad.ufsm.br

Tiago Bandeira Marchesan
UFSM
tiago@ufsm.br

Rafael Concatto Beltrame
UFSM
beltrame@ufsm.br

Vitor Cristiano Bender
UFSM
vitor.bender@ufsm.br

Daniel Pinheiro Bernardon
UFSM
dpbernardon@ufsm.br

Lucas Melo de Chiara
CPFL Energia
lucaschiara@cpfl.com.br

Fernando Cesar Pepe
CPFL Energia
fernandopepe@cpfl.com.br

RESUMO

Atualmente, poucos laboratórios realizam ensaios de arcos elétricos para medir a energia incidente (EI). Neste contexto, projetou-se e implementou-se um laboratório de arcos elétricos na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em parceria com a CPFL Energia, com o objetivo de validar os arranjos do guia IEEE Std 1584-2018. Foram conduzidos ensaios laboratoriais comparando os resultados com estimativas do modelo matemático do guia e simulações usando o software ArcPro™ 4, reconhecido na indústria por estimar a EI proveniente de arcos elétricos. Desta forma, este trabalho detalha a implementação do laboratório, bem como realiza a análise comparativa dos resultados obtidos através dos ensaios, do cálculo pelo guia IEEE Std 1584-2018 e das simulações através do ArcPro™ 4. O laboratório utiliza sete calorímetros para medição da EI conforme especificado guia IEEE Std 1584-2018, construídos de acordo com as normas ASTM 1959/1959M e IEC 61482-1-1. A principal contribuição do trabalho é o uso de uma câmera termográfica de alta velocidade para o sensoriamento térmico nos calorímetros, substituindo a utilização de termopares. O ensaio demonstrado neste trabalho foi realizado na configuração horizontal em ambiente aberto (HOA), considerando os parâmetros que influenciam os arcos elétricos descritos no guia IEEE Std 1584-2018. Os resultados demonstraram que o laboratório é capaz de gerar arcos elétricos e medir uma EI próxima às estimativas do guia e do ArcPro™ 4, considerando

as incertezas inerentes aos ensaios de arcos elétricos e medição da EI. É importante ressaltar que não foram realizadas comparações diretas entre as medições da EI via termografia e via termopares, sendo esse um próximo passo para ampliar a validade e precisão da metodologia proposta.

1.0 – INTRODUÇÃO

Os riscos relacionados aos arcos elétricos são significativos devido à capacidade de resultarem em fatalidades e ferimentos graves em trabalhadores — irreversíveis em alguns casos —, além da possibilidade de ocasionar danos severos em equipamentos devido à grande quantidade de energia liberada em um curto período de tempo [1]. Conforme constatado em [2], na sua origem, os arcos elétricos podem atingir temperaturas equivalentes a três ou quatro vezes as observadas na superfície solar, o que ilustra a natureza destrutiva desses eventos.

Alguns dos perigos relacionados aos arcos elétricos são [3]: riscos térmicos, respingos e estilhaços de cobre ou metal fundido, ondas de pressão, subprodutos tóxicos do arco, luz intensa e elevado ruído sonoro. Apesar da relevância de estudos relacionados a todos estes riscos, neste trabalho é abordado o risco térmico, uma vez que as queimaduras representam em média 50 a 70% dos acidentes fatais ou que levam a algum tipo de lesão permanente ou irreversível relacionados aos arcos elétricos no ambiente de trabalho [4]. Além disso, de

1/10

acordo com um estudo realizado durante 5 anos no Brasil em um hospital de queimados, em média 20% das queimaduras associadas a acidentes com eletricidade foram causadas por arcos elétricos, onde 37% corresponderam a queimaduras de grau três e 63% corresponderam a queimaduras de grau dois [5].

No que diz respeito aos dados sobre acidentes com arcos elétricos no Brasil, obter tais informações é bastante desafiador. Os registros de acidentes com choques elétricos são fornecidos pela Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos com Eletricidade (Abracopel) em seus anuários de acordo com o noticiado em todas as mídias nacionais. No entanto, estes dados incluem os acidentes com arcos elétricos na mesma categoria dos acidentes por choques elétricos, principalmente devido à dificuldade de obtenção de dados precisos para cada acidente ocorrido no país, além da impossibilidade de obter resultados relacionados a acidentes informais, o que dificulta a obtenção de estimativas precisas acerca deste tipo de acidente [6]. Isso torna muito difícil obter uma estimativa precisa do número de acidentes com arcos elétricos que ocorrem no país. Os dados de acidentes contabilizados relacionados a choques elétricos no Brasil nos últimos 10 anos são apresentados na Fig. 1 [7].

Conforme é observado na Fig. 1, os acidentes totais e os acidentes fatais têm se mantido estáveis nos últimos 10 anos, com pequenas flutuações ao longo desse período. Vale ressaltar que é possível que esses acidentes estejam diminuindo devido à implementação de procedimentos mais seguros no trabalho com eletricidade. No entanto, é importante salientar que também houve uma melhoria significativa no processo de coleta e análise de dados relacionados a acidentes por choques elétricos nesse período, problema que pode ter resultado em uma subestimação em levantamentos anteriores desses dados [7].

Entretanto, no primeiro boletim epidemiológico que considerou as queimaduras publicado pelo Ministério da Saúde, são apresentados dados

preocupantes. Em levantamento considerando um período de 6 anos — 2015 a 2020 —, ocorreram 19.772 óbitos relacionados a queimaduras [8]. Desses óbitos, 46,1% foram decorrentes de queimaduras elétricas, decorrentes de choques elétricos ou arcos elétricos, fazendo com que a média anual de vítimas fatais com queimaduras envolvendo eletricidade seja de 1.529 pessoas. A Abracopel, apresenta o número de 3.826 acidentes fatais envolvendo choques elétricos e arcos elétricos no mesmo período, correspondendo a uma média anual de 638 acidentes fatais dessa natureza [7]. Esse valor é 41% menor do que os dados apresentados pelo boletim epidemiológico, o que indica que os números de acidentes são substancialmente maiores do que o relatado. É relevante ressaltar que provavelmente existe uma disparidade nos dados, considerando que as instituições adotam métodos distintos de coleta [7]. No entanto, o ponto crucial é que ambas as fontes indicam a necessidade de se encontrar formas para a minimização de riscos e acidentes.

Apesar dos riscos associados aos arcos elétricos, a realização de ensaios para medir a energia incidente (EI), responsável pelas queimaduras decorrentes deste evento, é pouco comum em laboratórios ao redor do mundo. Para aprofundar a compreensão desse fenômeno, são necessárias pesquisas experimentais dedicadas a esse tema, porém, tais estudos enfrentam desafios específicos. Entre eles, destacam-se a complexidade técnica e o elevado custo associados aos laboratórios especializados em arcos elétricos, que operam com correntes elétricas elevadas e requerem uma potência considerável da rede de distribuição. Além disso, são necessários equipamentos avançados para geração, controle, medição, ignição e segurança dos ensaios [6]. Esses fatores contribuem para a escassez de laboratórios de ensaios de arcos elétricos para medição da EI ao redor do mundo. Alguns dos laboratórios conhecidos incluem Aitex (Espanha), CEF/DuPont (França e Suíça), Kinetrics (Canadá e Estados Unidos) e IEE-USP (Brasil) [9].

Desta forma, o objetivo deste trabalho é detalhar o laboratório implementado e analisar os resultados obtidos por meio de ensaio realizado dentro do escopo de cenários contemplados no guia IEEE Std 1584-2018. Assim, é possível comparar os resultados obtidos pelo sistema de medição da EI proposto, com os valores calculados pela IEEE Std 1584-2018 utilizando a planilha disponibilizada em pelo IEEE DataPort™ em [10], conforme os parâmetros utilizados no ensaio. Além disso, a validação dos resultados também é realizada no ArcPro™ 4, um software comercialmente disponível e reconhecido no Anexo E da OSHA 1910.269 [11].

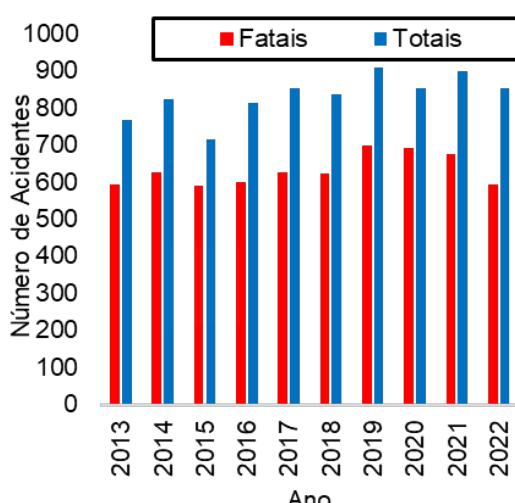


Fig. 1. Acidentes totais e fatais relacionados a choques elétricos nos últimos 10 anos [7].

2.0 – CONTEXTUALIZAÇÃO

2.1 – ARCO ELÉTRICO E ENERGIA INCIDENTE

O arco elétrico é um evento estocástico que se origina da ruptura da rigidez dielétrica de um gás, que desempenha o papel de isolante elétrico entre dois ou mais condutores (ou eletrodos). Muitas vezes, o arco surge após a ocorrência de um curto-círcito entre estes condutores. Tal curto-círcito induz a transição do material isolante, em muitos casos, o ar, para um estado condutor, resultando na formação de um plasma ionizado de natureza resistiva que sustenta a descarga [12]. Esse processo é de natureza cíclica e persiste até a extinção natural do arco elétrico, decorrente de uma queda de tensão interna substancial ou do acionamento do sistema de proteção do circuito.

Nesse contexto, a EI refere-se à quantidade de energia térmica transmitida a uma superfície a uma determinada distância da fonte, durante a ocorrência de um arco elétrico. Essa energia é expressa em cal/cm^2 ou kJ/m^2 e desempenha um papel crucial no risco associado ao arco elétrico, pois está diretamente relacionada a queimaduras [13]. A curva de Stoll define que $1,2 \text{ cal}/\text{cm}^2$ é o limiar de energia térmica capaz de causar queimaduras de segundo grau na pele humana (limiar de cura), sendo necessário o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs) em ambientes onde o arco elétrico pode gerar valores de EI acima desse limiar [14]. Os EPIs destinados à proteção térmica contra os arcos elétricos utilizam o conceito de ATPV (Arc Thermal Performance Value) para diferenciar seus níveis de proteção, sendo este expresso em cal/cm^2 e indicando a capacidade do tecido do EPI em resistir e proteger contra os efeitos térmicos provenientes do arco elétrico [3]. É importante a distinção da EI, que é a unidade de medida da energia térmica, do ATPV, que representa um limiar de proteção para EPIs.

A avaliação das consequências da EI decorrente de arcos elétricos em trabalhadores constitui uma área de estudo relativamente recente, cujo início remonta à década de 1980, por meio do artigo pioneiro do engenheiro Ralph Lee [2], onde foi estabelecido um modelo teórico para a estimativa da EI. Posteriormente, surgiram outros modelos de estimativa da EI, como o proposto por Doughty, Neal e Floyd em 2000 [15], bem como o guia IEEE Std 1584-2002, atualizado em 2018, que é um dos modelos adotados nos estudos comparativos deste trabalho [13]. Além desses modelos, existe também o método ArcPro™ 4, que, embora seja considerado um modelo de "caixa preta", detém ampla aceitação comercial e industrial. Vale ressaltar que esse é o único modelo válido para tensões de circuito aberto acima de 15 kV, conforme regulamentado pela OSHA 1910.269 [11]. O software ArcPro™ 4 também é empregado nas análises de EI realizadas ao longo deste estudo.

2.2 – METODOLOGIAS DE ESTIMAÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE

Este trabalho utiliza três abordagens distintas para estimar a EI para que se enquadram nos testes descritos no guia IEEE Std 1584-2018. No modelo do guia IEEE 1584-2018 e no ArcPro™ 4, a EI é obtida através da inserção dos diversos parâmetros de entrada existentes em ambos modelos, que fornecem o valor da EI, correspondente. Por outro lado, no método de cálculo baseado na medição da EI, uma série de equações relacionadas ao princípio fundamental da calorimetria é aplicada, levando em consideração as temperaturas inicial e final dos calorímetros durante o ensaio, afim de obter a EI. Nesta seção, os três métodos de estimativa da energia incidente considerados são brevemente caracterizados.

2.2.1 – IEEE STD 1584-2018

A metodologia de estimativa da energia incidente proposta no guia IEEE Std 1584-2018 é aplicável a sistemas trifásicos de corrente alternada e foi desenvolvida empiricamente a partir de um programa que envolveu mais de 1860 ensaios [13]. Essa metodologia é composta por dois modelos matemáticos, os quais são selecionados com base no nível de tensão do sistema, abrangendo sistemas com tensões entre 208 V e 15 kV.

Existem diversos parâmetros que influenciam a magnitude do arco elétrico e sua EI em um corpo próximo, tais como: tensão nominal de circuito aberto (V_{oc}), corrente de falta trifásica franca (I_{bf}), tempo de duração do arco elétrico (t_{arc}), espaçamento entre os eletrodos curto-circuitados (gap), configuração dos eletrodos, distância de trabalho (d) e o tipo do ambiente do ensaio, aberto ou enclausurado. Para fins deste trabalho, é considerada apenas configuração horizontal em ambiente aberto (HOA), e o modelo considerado para estimativa da EI é o de V_{oc} entre 601 V e 15 kV, uma vez que os ensaios no laboratório são realizados com uma V_{oc} de 1,1 kV.

A aplicação do modelo matemático do guia ocorre conforme o fluxograma apresentado na Fig. 2, a partir dos quais a EI e a distância segura de aproximação (AFB) são determinadas levando em consideração as correntes de arco elétrico e de arco elétrico reduzida [6]. Os resultados finais considerados após a aplicação do modelo correspondem sempre ao maior valor de EI encontrados, e consequentemente, da AFB, conferindo um caráter conservador. É válido destacar que para as análises de EI efetuadas neste trabalho, procede-se a sua estimativa através do modelo matemático da IEEE Std 1584-2018 de forma que o parâmetro de entrada inicial a corrente de arco (I_{arc}), uma vez que este é o valor medido no laboratório, e não a I_{bf} .

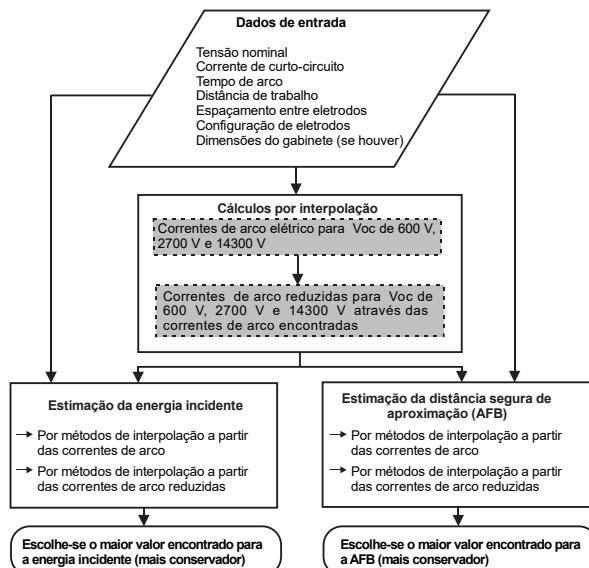


Fig. 2. Fluxograma da metodologia de cálculo do guia IEEE Std 1584-2018 [6].

A estimativa da EI através do modelo matemático do guia IEEE Std 1584-2018, para fins deste trabalho, foi realizada através da planilha disponibilizada no IEEE DataPort™ [10]. A planilha fornecida pela IEEE permite o cálculo da EI máxima a partir do modelo matemático da IEEE Std 1584-2018, permitindo o acesso a uma calculadora funcional de arco elétrico que inclui a parametrização dos diversos parâmetros de entrada do modelo, permitindo inclusive estimar a EI diretamente através de I_{arc} .

2.2.2 – ARCPRO™ 4

Ao contrário do modelo proposto em [2], baseado na teoria de circuitos, e dos modelos propostos em [13] e [15], baseados em ensaios empíricos de arcos elétricos para estimativa da EI, o ArcPro™ 4 inclui a modelagem de arcos elétricos com base nas características físicas desse fenômeno [16]. O software modela arcos elétricos considerando diversos parâmetros, como: propriedades do gás, material do eletrodo, radiação térmica e dissipação de energia por convecção, entre outros [17].

O ArcPro™ 4 é um software comercial disponível por assinatura, que apesar de ser um modelo caixa preta, é o único software listado pela OSHA para cálculos da EI [11]. É uma das aplicações mais utilizadas na indústria para calcular os riscos de arco elétrico e selecionar roupas de proteção para situações de arcos elétricos, especialmente para aplicações de transmissão e distribuição em média e alta tensão que outros métodos não abordam [18].

Dentre os diversos cenários de arcos elétricos considerados no software, a versão atual (ArcPro™ 4) possui a funcionalidade de realizar cálculos de arcos elétricos trifásicos com diferentes orientações de eletrodos e diversos parâmetros de entrada, de maneira análoga ao que é feito no modelo matemático do guia IEEE 1584-2018 [18].

2.2.3 – PROCEDIMENTO DE CÁLCULO UTILIZADO NA MEDIDA DA ENERGIA INCIDENTE

Conforme mencionado anteriormente, o guia IEEE Std 1584-2018 utiliza calorímetros para estimar a EI resultante dos arcos elétricos. Diversos parâmetros são considerados no equacionamento utilizado para calcular a EI no dispositivo, porém os principais, são a temperatura inicial e final do disco de cobre durante o arco elétrico. O cálculo para a medição de EI decorre da equação fundamental da calorimetria, uma vez que a energia absorvida pelos calorímetros é normalmente igual ou maior que 90% da EI, assim considerando-as como equivalentes [19].

O equacionamento utilizado para a estimativa da EI nos calorímetros deste trabalho é o disponibilizado pela norma ASTM 1959/1959M que é baseado na equação fundamental da calorimetria [20]. Primeiramente, a capacidade térmica (C_p) do cobre deve ser calculada para temperaturas que variam de 289 K a 1.358 K, conforme definido na Eq. (1).

$$C_p = \left(A + B \cdot \frac{T}{10^3} + C \cdot \left(\frac{T}{10^3} \right)^2 + D \cdot \left(\frac{T}{10^3} \right)^3 + \frac{E}{\left(\frac{T}{10^3} \right)^2} \right) \frac{63,546 \text{ g/mol}}{(1)}$$

onde T é a temperatura medida em Kelvin, 63,549 é a massa molar do cobre, e os coeficientes A, B, C, D e E são definidos pela equação de Shomate em [21]. Em seguida, a C_p do cobre é definida em cada intervalo de tempo para todos os calorímetros, calculando-se a média entre a C_p calculada no instante inicial de temperatura ($C_p@T_i$) e a C_p no instante final de temperatura ($C_p@T_f$), como demonstrado na Eq. 2.

$$\overline{C_p} = \frac{C_p@T_i + C_p@T_f}{2} \quad (2)$$

onde $\overline{C_p}$ é a capacidade térmica média do cobre (cal/g°C). Assim, utilizando as Eqs. (1)-(2), a EI para um intervalo de tempo é calculada por meio da Eq. (3).

$$EI = \frac{m \cdot \overline{C_p} \cdot (T_f - T_i)}{S} \quad (3)$$

onde m é a massa do disco de cobre (g), T_i e T_f são as temperaturas inicial e final no disco de cobre (Kelvin), respectivamente, e S é a área exposta do disco de cobre (cm^2).

É importante ressaltar, que para a aplicação do conjunto de Eqs. (1)-(3), os calorímetros devem ser corretamente dimensionados, conforme as normas ASTM 1959/1959M e IEC 61482-1-1. Neste cenário, a Fig. 3 apresenta a representação posterior e inferior dos calorímetros utilizados no laboratório.

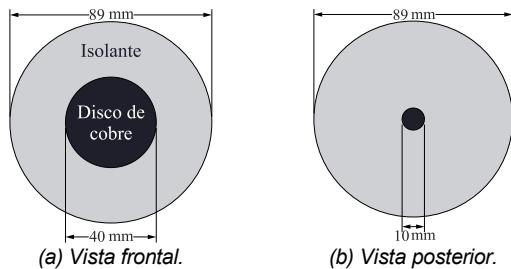


Fig. 3 Dimensões dos calorímetros do laboratório

A principal modificação dos calorímetros implementados no laboratório em relação aos recomendados pelas instruções normativas se referem às dimensões do orifício posterior do Marinite A®, devido à adoção da câmera termográfica para o sensoriamento térmico. As referências normativas recomendam que o isolante térmico tenha 89 mm de diâmetro e que o disco de cobre utilizado no calorímetro tenha as seguintes especificações: diâmetro de 40 ± 1 mm, espessura de $1,6 \pm 0,1$ mm, e massa de 18 ± 1 g [20] e [22]. O orifício frontal do Marinite A® adotado é de 40 mm, para o encaixe do disco de cobre. Entretanto, com relação ao orifício posterior, é empregado um furo de 10 mm de diâmetro ao invés dos 3 mm recomendados pelas instruções normativas, para ser possível visualizar o disco de cobre através câmera termográfica com uma quantidade de pixels suficientes e, desse modo, captar a elevação de temperatura (ΔT).

3.0 – ESTRUTURA LABORATORIAL

3.1 – INFRAESTRUTURA PARA GERAÇÃO E EXTINÇÃO DO ARCO ELÉTRICO

O laboratório de arcos elétricos implementado possui a capacidade de realizar grande parte dos ensaios que constam no escopo do guia IEEE Std 1584-2018, podendo gerar curtos-circuitos trifásicos com correntes de arco entre 1 e 20 kA, operando com uma tensão de circuito aberto de 1,1 kV. A estrutura responsável por gerar o curto-círcuito, medir a EI e extinguir o arco elétrico é mostrada na Fig. 4, onde existem três seções: o ramal de entrada de energia, a sala de máquinas e a câmara de ensaios. As zonas de média tensão (MT) e baixa tensão (BT) são observadas nos lados primário e secundário do transformador, respectivamente.

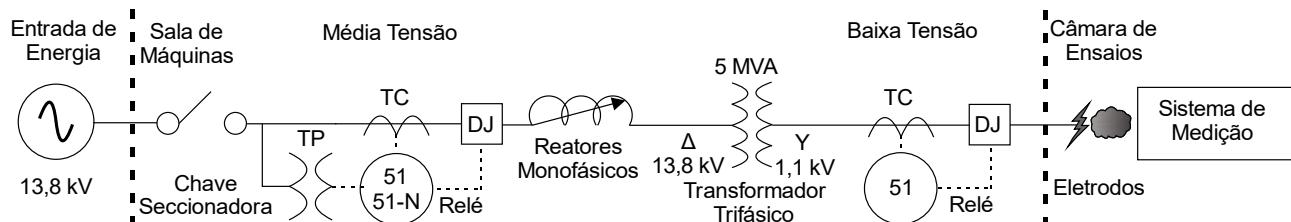


Fig. 4. Diagrama unifilar do laboratório de arcos elétricos.

Conforme constatado na Fig. 4, são necessários diversos equipamentos para gerar com segurança um curto-círcuito de elevada corrente elétrica para originar o arco elétrico na câmara de ensaios. Dentre os principais, destacam-se os três reatores monofásicos e o transformador trifásico, responsáveis pelo controle dos parâmetros elétricos do circuito, como tensão, corrente e impedância, que influenciam diretamente na corrente de arco e na EI.

Os três reatores monofásicos permitem o controle das correntes de curto-círcuito através de 12 *taps* de interligação, onde cada *tap* corresponde a uma injeção de reatância diferente no circuito, e consequentemente, a um nível de curto-círcuito na câmara de ensaios. Já o transformador trifásico de 5 MVA funciona como rebaixador de tensão, de 13,8 kV para 1,1 kV, permitindo a obtenção de altos valores de corrente de curto-círcuito.

Outros equipamentos importantes são os disjuntores que trabalham em conjunto com os relés de proteção, responsáveis pela extinção do arco elétrico e por fornecer proteção de retaguarda. Além disso, é no relé de baixa tensão que o tempo de extinção do arco elétrico é definido, sendo este um parâmetro de extrema importância para a estimativa da EI. Os relés são conectados aos transformadores de correntes (TCs) existentes no lado de MT e de BT do laboratório, permitindo a medição da corrente de arco e, consequentemente, a extinção do arco elétrico através do acionamento do disjuntor de acordo com a parametrização do equipamento.

Além da estrutura apresentada na Fig. 4, também existe uma sala de controle externa, onde é feito o acionamento do ensaio através de um painel de comando. Neste local, também são realizadas a gravação do ensaio, através de uma câmera de monitoramento existente dentro da câmara de ensaios, e a análise e tratamento de dados.

3.2 – INFRAESTRUTURA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição da EI é composto pelos calorímetros, posicionados conforme as instruções do guia IEEE Std 1584-2018 e pela câmera termográfica FLIR modelo A6752sc. O esquemático dessa estrutura, bem como a sua configuração em laboratório, são apresentados na Fig. 5.

Conforme indicado pelo guia IEEE Std 1584-2018 e observado na Fig. 5-(a), com eletrodos na configuração horizontal em ambiente aberto (HOA), os sete calorímetros devem ser

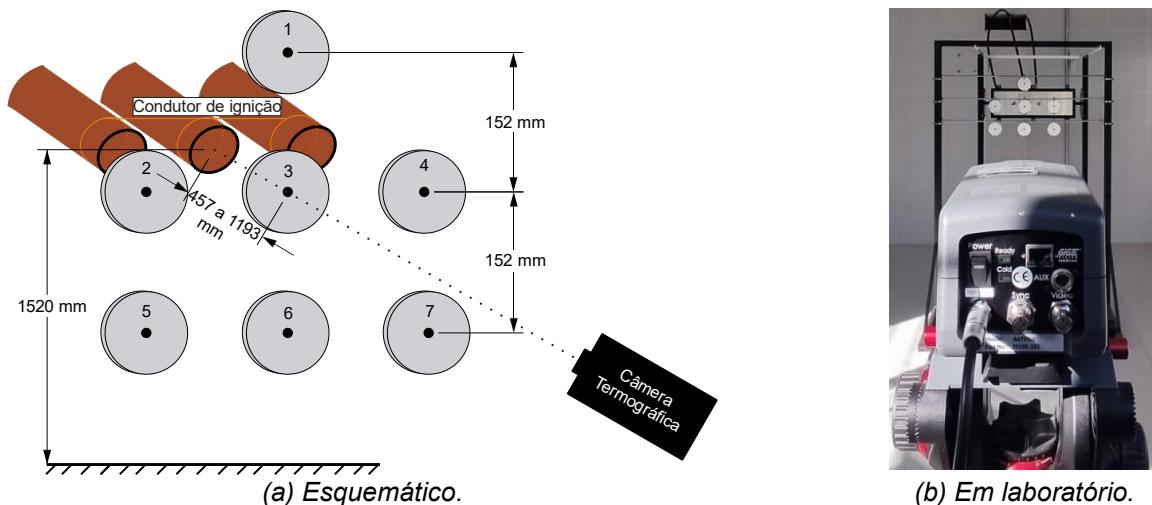


Fig. 5. Arranjo de medição da energia incidente.

posicionados de forma a reproduzir o torso humano, com um conjunto de três calorímetros centrais alinhados com a ponta dos eletrodos (onde o calorímetro central é alinhado verticalmente e horizontalmente com o eletrodo central), outro conjunto idêntico posicionado 152,4 mm abaixo do eixo central e um único calorímetro posicionado 152,4 mm acima do eixo central (representando a cabeça do ser humano). O espaçamento horizontal entre os calorímetros laterais e os centrais não é padronizado, no entanto, normalmente utiliza-se o mesmo espaçamento adotado verticalmente, e a distância entre os calorímetros e os eletrodos é determinada pela distância de trabalho, que varia entre 457 e 1193 mm.

É importante destacar que, com relação à EI resultante dos ensaios de arcos elétricos, é adotado o valor máximo de EI medido entre todos os calorímetros, conferindo à norma um caráter conservador [13]. Isso se justifica devido à periculosidade envolvida em acidentes relacionados a esses eventos, porém também pode resultar em superdimensionamento dos EPIs em casos específicos e causar desconforto ocupacional para os trabalhadores.

4.0 – ESTUDO DE CASO

Nesta seção é realizada a análise comparativa da medição da EI para um ensaio de arcos elétricos em laboratório, com relação à EI calculada pela IEEE Std 1584-2018 e simulada pelo ArcPro™ 4. Porém, antes do início dessa análise, é importante que sejam feitas algumas considerações relacionadas ao sistema de aquisição de dados, onde o software MATLAB® é utilizado como ferramenta auxiliar para a leitura e tratamento das correntes de arco e dos dados de temperatura extraídos da câmera termográfica.

As correntes de arco medidas são processadas no MATLAB®, com o objetivo de filtrá-las, por meio da aplicação de um filtro de cossenos para estimar a corrente de arco com base no valor eficaz

da componente fundamental em corrente alternada, conforme recomendado no Anexo G.5.2 do guia IEEE Std 1584-2018 [13]. Além disso, a utilização de um software auxiliar contribui para a obtenção de parâmetros relevantes, como o número de amostras, tempo de arco e o valor eficaz (rms) de I_{arc} , dados essenciais para a estimativa da EI. Na presente aplicação, um sistema de medição de I_{arc} com uma resolução de 16 amostras por ciclo foi utilizado.

No que se refere à aquisição e tratamento de dados de elevação de temperatura nos calorímetros, foi configurada uma taxa de amostragem de 60 amostras/segundo na gravação realizada pela câmera termográfica. Para o tratamento dos dados obtidos da gravação termográfica da ΔT nos calorímetros, também foi utilizado o software MATLAB® para realizar a leitura dos frames obtidos da gravação termográfica e calcular a EI (considerando o equacionamento demonstrado na Seção 2.2.3).

Para isso, foi desenvolvido uma rotina em MATLAB® para a seleção dos pixels (ou coordenadas) da gravação termográfica referentes aos orifícios posteriores dos calorímetros. Desta forma, o software é capaz de determinar a EI, através dos dados dos sete calorímetros (previamente cadastrados) e da aplicação dos equacionamentos discutidos anteriormente.

Dadas estas considerações, a Fig. 6 apresenta a metodologia utilizada para análise comparativa da EI obtida nas diferentes vias de estimativa consideradas: medição, cálculo e simulação.

Conforme indicado na Fig. 6, os diversos parâmetros de entrada presentes no escopo do guia IEEE Std 1584-2018 são ajustados antes do ensaio, entretanto, dois deles devem ser medidos para alimentar o modelo matemático do guia IEEE Std 1584-2018 e a simulação ArcPro™ 4, uma vez que há um elevado grau de incerteza relacionado à corrente e ao tempo de arco. Considerando a corrente e o tempo de arco medidos como parâmetro de entrada na simulação e no cálculo da EI, e o valor medido da EI nos calorímetros do sistema de

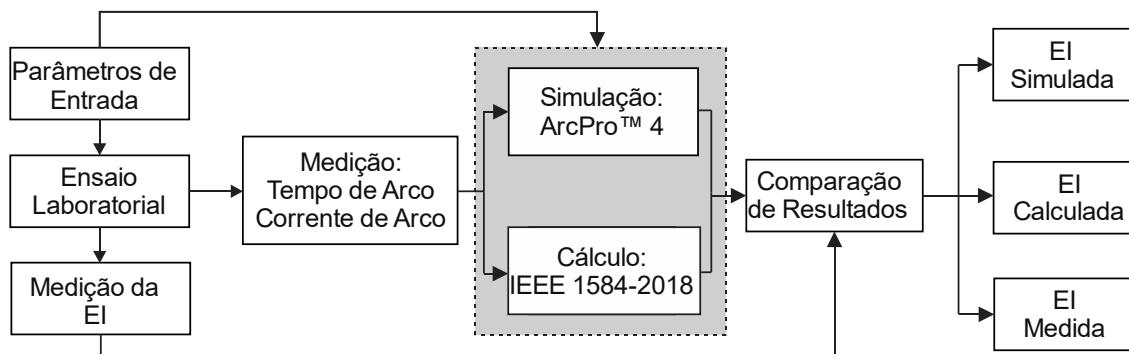


Fig. 6. Metodologia para análise comparativa dos resultados obtidos.

medição implementado, é possível realizar a análise comparativa através destas três vias de estimativa de EI, considerando o mesmo cenário.

Os parâmetros de entrada do caso escolhido para o exemplo demonstrativo são apresentados na Tabela 1. Já a Fig. 7 exibe os frames da gravação deste ensaio em diferentes períodos de tempo.

Pressupondo o ensaio descrito pela Tabela 1, e demonstrado em diferentes instantes de tempo na Fig. 7, a Fig. 8 apresenta a elevação de temperatura (ΔT) nos calorímetros devido ao ensaio de arco elétrico, considerando as temperaturas iniciais (T_i) e temperaturas finais (T_f) destes, antes e após o ensaio. O sensoriamento térmico foi realizado através de gravação termográfica e a ordem dos calorímetros da Fig. 8 é idêntica à apresentada pelo esquemático do arranjo de medição da Fig. 5-(a).

Conforme mencionado anteriormente, o modelo matemático do guia IEEE Std 1584-2018 considera o maior valor da EI medida entre os sete

calorímetros. Desta forma, a rotina de programação desenvolvida em MATLAB® calculou a EI nos sete calorímetros através das temperaturas iniciais e finais medidas em cada um deles (considerando também as propriedades individuais de cada dispositivo), e estimou a maior EI no calorímetro três – 2,55 cal/cm² –, através da aplicação das Eqs. (1)-(3). A imagem termográfica que indica o valor das temperaturas inicial e final neste calorímetro antes e após o ensaio é apresentada na Fig. 9.

Exemplificando, para o calorímetro três, que possui massa do disco de cobre de 18,6092 g, as dimensões fornecidas na Fig. 3, T_i e T_f de 22°C (295,15 K) e 40,68°C (313,83 K), respectivamente, e um C_p de 0,0922, a EI é obtida conforme a Eq. (4).

$$EI_{cal_3} = \frac{18,6092 \cdot 0,0922 \cdot (313,83 - 295,15)}{12,57} \cong 2,55 \text{ cal/cm}^2 \quad (4)$$

A escala para conferência dos valores de temperatura nos diversos *pixels* das imagens termográficas apresentadas na Fig. 9 podem ser conferidas através de suas respectivas barras laterais. É importante ressaltar que essa metodologia de medição não permite obter a curva de ΔT dos calorímetros em relação ao tempo, uma vez que ocorre a saturação da imagem termográfica durante o evento de arco elétrico, devido à alta intensidade do mesmo, sendo os frames relacionados a esta saturação descartados da análise. No entanto, em termos de cálculo da EI, este pode ser feito apenas com os valores de T_i e T_f nos discos de cobre, o que permite a aplicação dessa metodologia de medição. Pondera-se que este é um estudo em estágio inicial e que questões adicionais devem ser abordadas no futuro para consolidação.

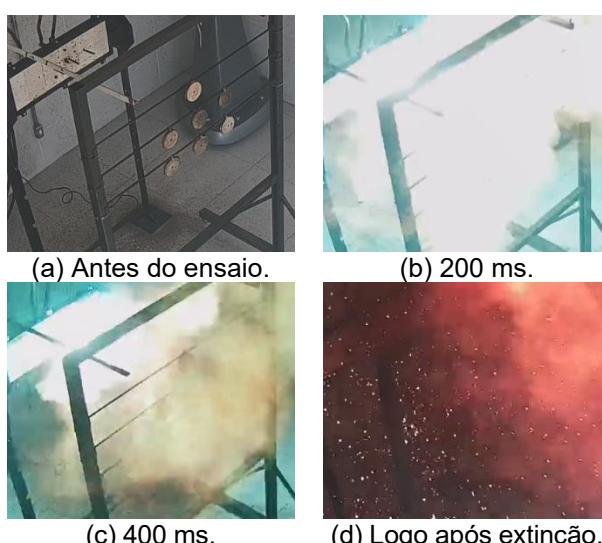


Fig. 7. Frames da gravação do ensaio descrito na Tabela 1.

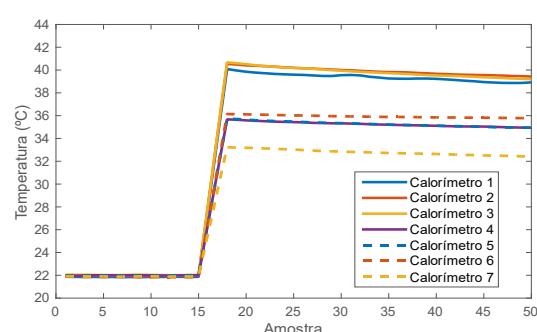


Fig. 8. Elevação de temperatura nos calorímetros.

7/10

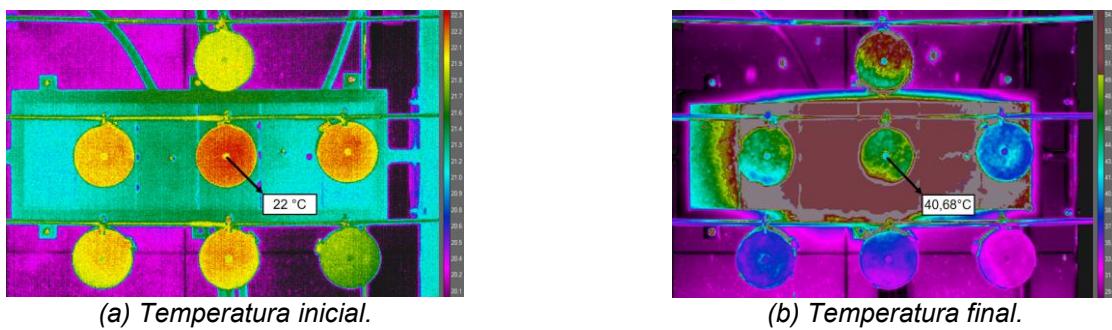


Fig. 9. Sensoriamento termográfico da ΔT no calorímetro três.

Os valores calculados para a EI do presente ensaio em cada um dos calorímetros de acordo com a ΔT apresentada na Fig. 8, considerando a respectiva massa do disco de cobre de cada um deles, são apresentados na Tabela 2, onde se pode constatar que a maior EI foi observada no calorímetro três, seguido pelos calorímetros dois e um, respectivamente.

Para dar continuação à análise comparativa da EI obtida através da metodologia de medição com as outras vias de comparação, ou seja, o modelo matemático do guia IEEE Std 1584-2018 e a simulação através do software ArcPro™ 4, é sejam configurados os parâmetros do ensaio descritos na Tabela 1. Desta forma, as Figs. 10 e 11 apresentam os valores de EI medidos para o ensaio em questão, através do modelo matemático do guia IEEE Std 1584-2018 e do software ArcPro™ 4, respectivamente.

Tabela 2. Energia incidente nos calorímetros.

Número	ΔT °C	Massa (g)	EI (cal/cm ²)
1	18,23	18,8556	2,52
2	18,35	18,8584	2,54
3	18,68	18,6092	2,55
4	13,76	18,8523	1,90
5	13,77	18,9418	1,91
6	14,33	18,3750	1,93
7	11,33	18,7814	1,56

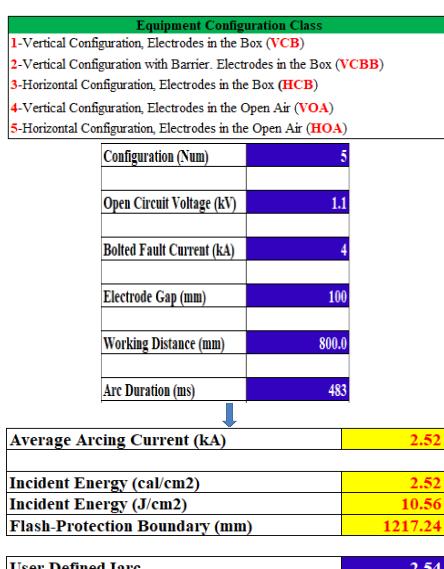


Fig. 10. Estimação da EI através do guia IEEE Std 1584-2018 para o caso considerado [11].

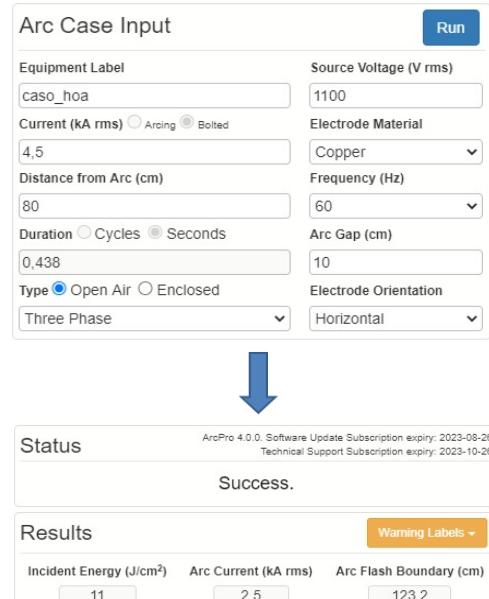


Fig. 11. Estimação da EI em J/cm² através do software ArcProTM 4 para o caso considerado.
*11 J/cm² = 2,63 cal/cm².

Conforme é demonstrado pelas Figs. 10 e 11, todos os parâmetros de entrada utilizados em ambas aplicações estão de acordo com os disponibilizados pela Tabela 1. No caso da corrente de arco, na planilha do IEEE DataPort™ é utilizado um recurso para realizar o cálculo da EI através do modelo matemático do guia IEEE Std 1584-2018 diretamente através de I_{arc} (medida em laboratório), desprezando-se a corrente de curto-círcito trifásico franco (I_{bf}). Já no caso da simulação no ArcPro™ 4, obtém-se empiricamente uma I_{arc} equivalente à medida em laboratório através de testes de correntes de curto-círcito trifásico franco que resultem, dentro do software, a uma I_{arc} próxima à medida.

Desta forma, considerando o valor de EI máximo medido presente na Tabela 2, o valor estimado conforme o modelo matemático do guia IEEE Std 1584-2018 de acordo com a Fig. 10, e o simulado conforme o ArcPro™ 4 na Fig. 11 é possível realizar a análise comparativa dos valores de EI obtidos para o caso descrito na Tabela 1. Para facilitar esta análise, a Tabela 3 exibe o sumário dos resultados obtidos.

Tabela 3. Sumário dos valores de EI obtidos nas no exemplo demonstrativo.

Método	EI (cal/cm ²)	Diferença em relação à medição (%)
Medição	2,55	x
Cálculo	2,52	-1,18
Simulação	2,63	3,14

A partir da análise comparativa realizada na Tabela 3 para os resultados da EI obtidos no exemplo demonstrativo, é possível concluir que os valores medidos no ensaio laboratorial foram próximos aos calculados e simulados, fornecidos pelas Figs. 10 e 11, com diferenças inferiores a 5%. Isso permite inferir que, apesar de algumas limitações, a metodologia desenvolvida para medição termográfica da EI é capaz de determinar o valor da EI resultante de arcos elétricos, considerando ensaios realizados dentro do escopo o guia IEEE Std 1584-2018.

Também é importante considerar que, para os mesmos parâmetros de entrada, a estimação da EI de acordo com o guia IEEE Std 1584-2018 e conforme a simulação realizada pelo ArcPro™ 4 apresentaram divergências de aproximadamente 5% na EI resultante, o que pode ser condicionado ao fato de utilizarem métodos diferentes para tal objetivo. Isso pode ser correlacionado à existência de diversas incertezas associadas aos arcos elétricos e a respectiva estimativa de sua EI, uma vez que os próprios métodos fortemente aceitos utilizados para tal comparação, não fornecem exatamente os mesmos resultados, mesmo quando considerados os mesmos parâmetros de entrada do arco elétrico.

Sob o ponto de vista da distância segura de aproximação (AFB), ou seja, a distância de um corpo da fonte de arco elétrico na qual a EI calculada é de 1,2 cal/cm² e, desta forma, capaz de causar queimaduras de segundo grau, havendo a necessidade do emprego de EPIs em distâncias mais próximas da fonte, o guia IEEE Std 1584-2018 e o ArcPro™ 4 estimaram valores muito próximos. Conforme observado nas Fig. 10 e Fig. 11, para o exemplo estudado, uma EI de 1,2 cal/cm² seria observada a uma distância de 121,72 cm da fonte conforme o guia IEEE Std 1584-2018, enquanto segundo o ArcPro™ 4, a uma distância de 123,2 cm².

5.0 – CONCLUSÕES

Este trabalho detalhou a implementação de um laboratório de arcos elétricos e propôs uma metodologia para medição da EI através de termografia, considerando ensaios dentro do escopo do guia IEEE Std 1584-2018. É válido destacar, que a utilização de termografia permite alta taxas de aquisição de dados, além de suprimir a necessidade de utilização de filtros matemáticos para eliminar interferências eletromagnéticas devido ao arco

elétrico, problema existentes nos termopares normalmente empregados juntos aos calorímetros para medição da EI.

Com este propósito, foi montado em laboratório o mesmo arranjo de medição utilizado no guia e desenvolvidas rotinas de programação para a aquisição e processamento de dados. Para critério comparativo, foram utilizados os valores obtidos para a EI através de um ensaio demonstrativo, comparando os valores medidos, calculados através do guia IEEE Std 1584-2018 e também simulados através do software ArcPro™ 4.

Os resultados obtidos para o ensaio demonstrativo descrito neste trabalho mostraram diferenças muito baixas da EI medida pelo sistema proposto da estimadas pelo guia IEEE Std 1584-2018 e pelo ArcProTM 4, indicando que o sistema proposto é capaz de medir satisfatoriamente a EI.

6.0 – AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da “Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001”. Os autores também agradecem o apoio técnico e financeiro da CPFL Energia no Projeto “DE3069 – Metodologia e Ferramenta Computacional para Avaliação e Modelagem das Condições de Arco Elétrico em Sistemas Elétricos de Potência no Contexto Brasileiro”, desenvolvido sob o Programa P&D ANEEL PD-00063-3069/2020. A realização deste trabalho também contou com o apoio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFSM e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída de Energia Elétrica (INCT-GD).

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Queiroz, A. R. S., "Utilização de Relés Digitais Para Mitigação dos Riscos Envolvendo Arco Elétrico". Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- [2] Lee, R.H., "The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns". IEEE Trans. Ind. Appl. IA-18 (1982) pg. 246–251.
- [3] Standard for Electrical Safety in the Workplace (NFPA 70E) 2021st ed. NFPA. National Fire Protection Association, Quincy, EUA, 2021.
- [4] Campbell, R.B.; Dini, D.A., Occupational Injuries from Electrical Shock and Arc Flash Event. Quincy, EUA, 2015. Acessado em: 02/06/2022 de: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Electrical/RAArcFlashOccData.ashx>

- [5] Luz, D.P.; Millan, L.S.; Alessi, M.S. et al., "Electrical burns: A retrospective analysis across a 5-year period. Burns. 35 (2009) 1015–1019. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2009.01.014>.
- [6] Bacin, P. O.; Marchesan, A. P. G.; Beltrame, R. C. et al., "Contribuição ao Desenvolvimento de um Laboratório de Arco Elétrico Controlado para Medição da Energia Incidente. IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Santa Maria, 2022: p. 8.
- [7] Anuário Estatístico de Acidentes de Origem Elétrica 2023 ano base 2022. Danilo Ferreira de Souza, Edson Martinho, Meire Biudes Martinho e Walter Aguiar Martins Jr., Salto, São Paulo, 2023. <https://doi.org/10.29327/5194308>.
- [8] Boletim Epidemiológico v. 53 n°47. Ministério da Saúde, Brasília, 2023. Acessado em 24/05/2023 de: <https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins/epidemiologicos/edicoes/2022/boletim-epidemiologico-vol-53-no47/view>.
- [9] Farneze, G., Brasil é único país do Hemisfério Sul que tem um laboratório especializado em estudos de segurança contra efeitos do arco elétrico. AUN/USP, 2021. Acessado em 30/04/2022 de: <https://aun.webhostusp.sti.usp.br/index.php/2021/10/28/brasil-e-unico-pais-do-hemisferio-sul-que-tem-um-laboratorio-especializado-em-estudos-de-seguranca-contra-efeitos-do-arco-elettrico/>.
- [10] IEEE DataportTM, IEEE Standards Association, Arc Flash and Iarc Calculations. 2019.. Acessado em 15/05/2022 de: <https://ieeedataport.org/open-access/arc-flash-ie-and-iarc-calculators>
- [11] OSHA 1910.269, Protection from Flames and Electric Arcs: Appendix E. Washington, EUA, 2014. Acesso em: 14/06/2022 de: <https://www.osha.gov/laws-regulations>.
- [12] Sweeting, D; Stokes, A.D., "Energy transfers within arcing faults in electrical equipment". 8th Int. Conf. Electr. Fuses Their Appl. ICEFA , 2007, pg. 169–178.
- [13] IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations. IEEE STD 1584. IEEE Press, Nova Iorque, EUA, 2018. Acesso em 05/03/2022 de: <https://standards.ieee.org/standard/1584-2018.html>.
- [14] Heat transfer through fabrics. Alice Mary Stoll, Editora: PN, ASIN : B00B06MTCK, Warmister, Reino Unido, 1970.
- [15] Doughty R.L.; Neal T.E.; Floyd, L., "Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600-V power distribution systems". IEEE Trans. Ind. Appl. 36 (2000) pg. 257–279.
- [16] Camponogara, M; Bernardon, D.P.; Marchesan, T.B., et al., "Estimation of Electric Arc Incident Energy in Electric Power Distribution Grids". Energies, 2023. pg. 16.
- [17] Kinetics. Arc Hazard Assessment. Toronto, 2023. Acessado em: 18/06/2022, de: <https://www.kinetics.com/capabilities/services/transmission-distribution-field-services-testing/arc-hazard-assessment>.
- [18] Kinetics. ArcProTM 4 Brochure. Toronto, 2021. Acessado em: 20/06/2022 de: https://www.kinetics.com/files/brochures/ArcPro4_BrochureAP062921.pdf.
- [19] Neal, T.E; Bingham, A.H; Doughty, R.L., "Protective clothing guidelines for electric arc exposure". IEEE Trans. Ind. Appl. 33 (1996) pg. 1041–1054.
- [20] ASTM. ASTM 1959/F1959M: Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing. West Conshohocken, EUA, 2014.
- [21] NIST. Solid Phase Heat Capacity: Copper. EUA, 2021. Acessado em 07/06/2022 de: <https://webbook.nist.gov/cgi/inchi?ID=C7440508&Type=JANAFS&Plot=on#JANAFS>.
- [22] ABNT NBR IEC 61482-1-1: Trabalhos em tensão — Vestimenta de proteção contra riscos térmicos de um arco elétrico Parte 1-1: Métodos de ensaio — Método 1: Determinação da resistência ao arco elétrico (ATPV ou EBT50) de materiais resistentes à chama para vestimenta. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 38 p.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ARCOS ELÉTRICOS TRIFÁSICOS PARA ESTIMAÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE COM BASE NA TEORIA MAGNETO-HIDRODINÂMICA

Mateus Franco Fava
UFSM

mateus.fava@acad.ufsm.br

Pedro de Oliveira Bacin
UFSM

pedro.bacin@acad.ufsm.br

Rodolfo Pilar Londero
UFSM

rodolfolp@gmail.com

Tiago Bandeira Marchesan
UFSM
tiago@ufsm.br

Rafael Contato Beltrame
UFSM
beltrame@ufsm.br

Vitor Cristiano Bender
UFSM
vitor.bender@ufsm.br

Daniel Pinheiro Bernardon
UFSM
dpbernardon@ufsm.br

Lucas Melo de Chiara
CPFL Energia
lucaichiara@cpfl.com.br

Fernando Cesar Pepe
CPFL Energia
fernandopepe@cpfl.com.br

RESUMO

Um dos principais riscos associados ao arco elétrico é o aumento significativo da temperatura na área afetada. Preocupações relacionadas a este fenômeno podem causar diversas mudanças no projeto de equipamentos e instalações elétricas, tendo uma relação direta com a segurança do trabalho devido às queimaduras de primeiro, segundo e até terceiro graus que podem ser geradas pelo arco. Portanto, é importante quantificar essa energia para determinar o nível de proteção necessário visando a segurança humana durante a exposição ao fenômeno. A partir do plasma gerado pelo arco, é possível calcular a energia calorífica por unidade de área recebida em uma superfície localizada a uma determinada distância do arco elétrico, chamada de distância de trabalho, conhecida como energia incidente (EI). Um dos métodos de referência mais difundido para estimar a EI de um arco elétrico é apresentado no guia IEEE Std 1584-2018. A maioria dos estudos realizados com esse propósito utilizam métodos empíricos, os quais possuem alto custo financeiro e complexidade elevada para obtenção de resultados confiáveis em relação ao fenômeno. Portanto, devido a essas dificuldades, a simulação surge como uma alternativa viável para obter campos eletromagnéticos, temperaturas e demais parâmetros de interesse. Além disso, a simulação oferece uma variedade de possibilidades e mudanças nas configurações e situações em que os arcos elétricos possam surgir. Uma vez que o arco

elétrico pode ser representado como um fluido com interações eletromagnéticas, este artigo propõe o uso dos softwares comerciais ANSYS Fluent®, para a solução das equações de Navier-Stokes relacionadas à fluidodinâmica, e ANSYS Electronics Desktop®, para a resolução das equações de Maxwell relacionadas aos fenômenos eletromagnéticos. Esses softwares utilizam o método dos volumes finitos (FVM) e elementos finitos (FEM), respectivamente. O objetivo principal é comparar os resultados da EI obtidos por meio da simulação com os calculados através do guia IEEE Std 1584-2018.

1.0 – INTRODUÇÃO

O arco elétrico se origina através da passagem de corrente elétrica em um meio não condutor, gerando um plasma que sustenta a descarga. Em outras palavras, ocorre uma quebra do isolamento ao redor do circuito elétrico, permitindo que a corrente flua através do ar ionizado e do material vaporizado dos condutores [1],[2]. Esses fenômenos são complexos e envolvem eventos relacionados à fluidodinâmica, termodinâmica, reações químicas, eletromagnetismo e, em algumas situações, movimentos mecânicos [3].

À medida em que o arco elétrico se constitui em seu meio de propagação, ele origina riscos de alta magnitude, irradiação de calor em elevadas temperaturas, fumaça tóxica, gotículas derretidas de

1/10

material condutor fundido, estilhaços, luz intensa e forte variação de pressão em seus arredores [4].

Os primeiros estudos para dimensionar o perigo que o arco elétrico representa para os seres humanos foram realizados por Ralph Lee em 1982. Lee se baseou nos experimentos conduzidos por Alice Stoll, que resultaram na curva de Stoll, a qual quantifica o nível de calor e o tempo de exposição necessários para causar uma queimadura de segundo grau, definida como $1,2 \text{ cal/cm}^2$ [5],[6]. A partir dos resultados obtidos, Lee desenvolveu um modelo teórico para estimar a energia incidente (EI) de um arco elétrico trifásico em ambientes externos, para tensões acima de 480 V, que serviu de base para o desenvolvimento de outros modelos [7]. Um dos modelos que surgiram posteriormente aos estudos de Lee é o do guia IEEE Std 1584-2002, o qual passou por atualização em 2018, onde mais de 1.705 ensaios de arcos elétrico trifásicos foram efetuados para a elaboração de seu modelo matemático. O guia IEEE Std 1584-2018 é, atualmente, uma das referências normativas mais empregadas para o cálculo da EI proveniente dos arcos elétricos [8].

Entretanto, experimentos empíricos, como os realizados pelo guia IEEE Std 1584-2018, demandam alto custo financeiro e um longo período de preparação, além da complexidade na visualização e definição de parâmetros, como temperatura e campo magnético. Diante disso, o uso de simulações torna-se uma alternativa viável para reproduzir o fenômeno, facilitando a visualização e a obtenção de resultados qualitativos e quantitativos. Além disso, as simulações possibilitam a redução de custos, maior agilidade e a oportunidade de realizar experimentos com diferentes tipos configurações.

Para descrever e compreender o comportamento de um arco elétrico em um sistema trifásico, o método utilizado neste trabalho se baseou na teoria magneto-hidrodinâmica (MHD), que é capaz de realizar a caracterização dos fenômenos físicos e químicos que ocorrem durante o arco elétrico [9]. A teoria MHD descreve o fluxo de fluidos condutores de eletricidade, como eletrólitos, metais fundidos e plasmas, na presença de campos eletromagnéticos. Além disso, também descreve a evolução ao longo do tempo de diferentes parâmetros sob perspectiva microscópica, como densidade, velocidade, pressão e campos magnéticos [3].

Dessa forma, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um método para simulação de arcos elétricos trifásicos e estimativa da EI resultante, seguindo as diretrizes do guia IEEE Std 1584-2018. Para as simulações realizadas neste estudo, utiliza-se a teoria MHD em conjunto com o FEM e FVM aplicados no software Ansys® que é responsável por realizar as simulações necessárias. Para validar a metodologia proposta, são realizadas comparações entre os resultados obtidos por meio da simulação computacional e os cálculos realizados com base no modelo matemático do guia IEEE Std 1584-2018.

2.0 – MODELAGEM MHD

Através do uso das equações de Navier-Stokes e Maxwell, a teoria MHD fornece um modelo macroscópico do fenômeno do arco elétrico, caracterizando grandezas fundamentais como densidade, velocidade, pressão e campo magnético, abrangendo aspectos de conservação de massa, momento e energia [10]. Além disso, as equações da força de Lorentz são consideradas, pois, de acordo com [3] e [11], é por meio delas que o software atualiza o campo magnético gerado pelo arco elétrico e calcula a direção de propagação do arco.

No uso da teoria MHD para este fim, duas considerações importantes devem ser feitas [12]: a primeira é a suposição de equilíbrio térmico local, onde a temperatura do gás, elétrons e íons é considerada igual [13]; e a segunda é a exclusão dos vapores próximos aos eletrodos no modelo.

2.1 – EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES

As equações de Navier-Stokes descrevem a relação entre velocidade, pressão, temperatura e densidade de um fluido em movimento, em que, dentro de um volume de controle específico, a quantidade de massa é constante, sem possibilidade de criação ou destruição, embora a densidade, volume e forma do fluido (líquido ou gás) possam se alterar ao longo do tempo.

A massa pode se mover por todo o domínio, porém não ocorre destruição de massa dentro desse domínio, ou seja, a massa total dentro de um volume de controle não muda ao longo do tempo, desde que não haja entrada ou saída de massa através das fronteiras desse volume [11]. Dessa forma, o fluxo de massa em um domínio ou volume de controle, para problemas computacionais, é constante, conforme indicado pela equação da conservação da massa, expressa pela Eq. (1).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

onde ρ corresponde à densidade de massa (kg/m^3) e \vec{v} o vetor de velocidade.

A conservação do momento afirma que, dentro de algum domínio do problema, a quantidade de movimento permanece constante. A equação de Navier-Stokes para o momento é dada por (2):

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \rho \vec{v} = -\vec{\nabla} p + \left(\eta \vec{\nabla}^2 \vec{v} \right) + \rho \vec{g} + \vec{S} \quad (2)$$

onde η é a viscosidade dinâmica (Pa s), p é a pressão (Pa), \vec{g} é o vetor da aceleração da gravidade (m/s^2) e \vec{S} corresponde às fontes adicionais. Em vias gerais, quanto à Eq. (2):

- O primeiro termo indica a taxa de variação do momento em um volume de controle específico;
- O segundo termo expressa a diferença de momento entre as entradas e saídas do volume;
- O terceiro termo representa a força de aceleração resultante da distribuição de pressão;
- O quarto termo representa as forças de superfície relacionadas à viscosidade;
- O quinto termo refere-se à força gravitacional;
- O último termo engloba outras fontes que podem ser adicionadas à equação.

Em um volume de controle específico, a Eq. (2) pode ser descrita a partir do princípio da conservação de energia conforme a Eq. (3).

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \vec{\nabla} \bullet (\partial \rho H \vec{v}) = \vec{\nabla} \bullet \left(\frac{\lambda}{C_p} \vec{\nabla} H \right) - \vec{\nabla} \bullet \vec{q}_r + S_j \quad (3)$$

onde H é a entalpia, λ é a condutividade térmica (W/mK), C_p é o calor específico (J/kgK) e \vec{q}_r é o calor produzido por radiação e S_j é relacionado a termos adicionais que podem ser inseridos na equação.

2.2 – EQUAÇÕES DE MAXWELL

A teoria MHD realiza modificações nas equações de Navier-Stokes para incorporar os fenômenos eletromagnéticos descritos pelas equações de Maxwell, que englobam a Lei de Gauss para campos elétricos e magnéticos, a Lei da Indução de Faraday e a Lei de Ampère-Maxwell. Dessa forma, a teoria MHD abrange e integra esses aspectos fundamentais para uma compreensão mais completa dos sistemas que envolvem interações fluido-magnético. Assim, Eqs. (4)–(7) descrevem as equações de Maxwell utilizadas para a aplicação da teoria MHD em ambiente de simulação [14].

$$\vec{\nabla} \bullet \vec{E} = \frac{\rho_e}{\epsilon} \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \bullet \vec{B} = 0 \quad (5)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu \vec{J} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (7)$$

onde \vec{E} é o vetor de intensidade de campo elétrico (V/m), \vec{B} é o vetor de densidade de fluxo magnético (Wb/m^2), ρ_e densidade de carga elétrica (C/m^3), $\mu = \mu_0$ é a permeabilidade do ar e \vec{J} corresponde a densidade de corrente elétrica (A/m).

O conjunto de equações descritos implica em dois termos adicionais na Eq. (2) que são a força magnética (\vec{F}_l) e a força eletrostática (\vec{F}_e) descritas pelas Eqs. (8) e (9), respectivamente, expressos em N/m^3 .

$$\vec{F}_l = \vec{J} \times \vec{B} \quad (8)$$

$$\vec{F}_e = \rho_e \vec{E} \quad (9)$$

Além das forças descritas pelas Eqs. (8) e (9), o aquecimento Joule também é considerado como um termo adicional, podendo ser expresso através da Eq. (10) em W/m^3 [3].

$$Q_j = \frac{J^2}{\sigma} = \vec{E} \bullet \vec{J} \quad (10)$$

onde σ é a condutividade elétrica do meio (S/m).

Portanto, ao reescrever a equação de Navier-Stokes dada pela Eq. (2) e introduzir a força de Lorentz e o aquecimento Joule, as Eqs. (8)–(10) resultam nas equações de conservação do momento e da energia, expressas pelas Eqs. (11) e (12), respectivamente.

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + (\vec{v} \bullet \vec{\nabla}) \rho \vec{v} = -\vec{\nabla} p + \left(\eta \vec{\nabla}^2 \vec{v} \right) + \rho \vec{g} + \vec{S} + (\vec{F}_l + \vec{F}_e) \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \vec{\nabla} \bullet (\partial \rho H \vec{v}) = \vec{\nabla} \bullet \left(\frac{\lambda}{C_p} \vec{\nabla} H \right) - \vec{\nabla} \bullet \vec{q}_r + Q_j \quad (12)$$

3.0 – GUIA IEEE STD 1584-2018

O guia IEEE Std 1584-2018 apresenta um modelo matemático para estimar a EI proveniente de arcos elétricos trifásicos para diferentes cenários, de acordo com uma diversidade de parâmetros [15].

O guia apresenta cinco configurações distintas de posicionamento dos eletrodos, sendo três para ambientes fechados e duas para ambientes abertos, que variam em direção e sentido. No entanto, neste trabalho, optou-se pela configuração que utiliza eletrodos horizontais em ambiente aberto (HOA), conforme ilustrado na Fig. 1. Essa escolha foi feita devido à maior praticidade de simular os arcos elétricos em ambiente aberto, além de a EI medida pelos calorímetros nas configurações horizontais ser maior em comparação com as configurações verticais. Isso facilita a análise comparativa e quantitativa dos resultados.

O método de estimação da EI do guia IEEE Std 1584-2018 é dividido em dois modelos matemáticos, baseados em várias equações interpoladas de acordo com a tensão do sistema, variando entre 208

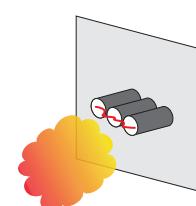


Fig. 1. Configuração HOA.

a 600 V para um modelo e 601 a 15 kV para o outro. Ambos os modelos requerem como dados de entrada variáveis elétricas relacionadas à tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de falta trifásica franca (I_{bf}) e diversas variáveis espaciais, que incluem o tipo de ambiente, configuração e espaçamento dos eletrodos e a distância de trabalho, que é correspondente à distância do ponto de arco elétrico ao trabalhador ou sistema de medição. Além destas, o tempo de duração do arco elétrico é uma variável de entrada de grande relevância, pois está diretamente relacionada à EI. O resultado da aplicação do modelo matemático do guia IEEE Std 1584-2018 fornece a EI em cal/cm^2 e a distância segura de aproximação (AFB) do arco elétrico.

3.1 – MEDIÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE

A configuração de medição adotada segue as instruções do guia IEEE Std 1584-2018, que utiliza de sete calorímetros dimensionados de acordo com as normas ASTM 1459/1459M e IEC 61482-1-1:2019. O calorímetro utilizado na simulação é composto por um disco de cobre condutor térmico e elétrico envolvido por Marinite (neste trabalho, é utilizado o Marinite A[®]), um material isolante térmico e elétrico.

O disco de cobre possui 40 ± 1 mm de diâmetro, $1,6 \pm 1$ mm de espessura e massa de 18 ± 1 g. Os calorímetros são posicionados em locais e configurações específicas em relação ao ponto de origem do arco elétrico (eletrodos), emulando o torso humano. Este arranjo pode ser visualizado na Fig. 2(a). Além disso, foram consideradas as principais orientações das normas mais recentes e relevantes, como F1959M:2014 e ISO 9151:2016, no dimensionamento dos calorímetros utilizados na simulação [13], [16] e [17].

Conforme é observado na Fig. 2(b), três calorímetros estão localizados na mesma altura da ponta dos eletrodos de cobre, enquanto três calorímetros estão posicionados abaixo e um único calorímetro central acima, com distâncias verticais de 152 mm entre eles. O calorímetro central sempre deve estar alinhado, verticalmente e horizontalmente, com o eletrodo central. A distância entre os calorímetros e os eletrodos (distância de trabalho) pode variar entre 381 e 1193 mm.

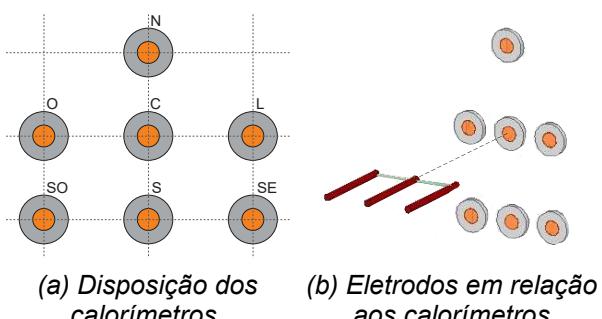


Fig. 2. Arranjo de medição utilizado na simulação.

É válido ponderar que, em termos de EI, é considerado como valor final do modelo a temperatura mais elevada medida entre os sete calorímetros, conferindo ao guia IEEE Std 1584-201 um caráter conservador [8].

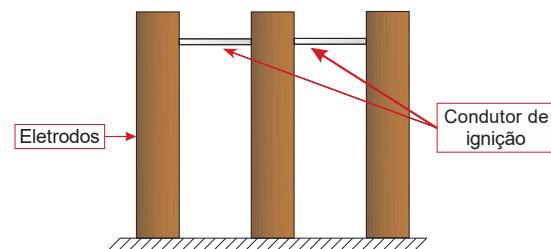
4.0 – METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

O modelo proposto para simulação de arcos consiste na representação através dos métodos FEM e FVM. Esses métodos foram empregados nos softwares Ansys Electronics Desktop[®] para as simulações eletromagnéticas (EMAG) e Ansys Fluent[®] para simulação de dinâmica dos fluídos (CFD), com o objetivo de descrever todas as fases do fenômeno. O software de EMAG tem como objetivo resolver as equações fundamentais do eletromagnetismo, enquanto o software CFD lida com as relacionadas à mecânica dos fluídos, tendo estas sido descritas na Seção 2.0. Para facilitar o entendimento, a metodologia proposta foi dividida em etapas, sendo detalhada nos próximos tópicos dessa seção.

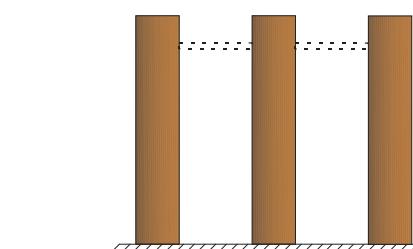
4.1 – GEOMETRIA E MATERIAIS

A geometria é criada utilizando um software de desenho assistido por computador (CAD) e posteriormente, importada nos CFD e MAG. Os componentes e materiais utilizados na simulação (como eletrodos e calorímetros) são os mesmos utilizados pelo guia IEEE Std 1584-2018, descritos na Seção 3.0. A Fig. 3 detalha as geometrias utilizadas nos softwares.

Para criar um caminho inicial para propagação do arco elétrico gerando um curto-circuito trifásico, assim como no guia IEEE Std 1584-2018, é implementado em ambos os softwares um condutor de ignição de espessura pequena entre os eletrodos, con-



(a) Modelo de geometria no software EMAG.



(b) Modelo de geometria no software CFD.

Fig. 3. Geometrias utilizadas nas simulações.

forme pode ser observado na Fig. 3. Todavia, no software CFD, este não são é representado fisicamente como no software EMAG, por se tratar de uma região dinâmica na qual o CFD calculará as equações e fornecerá a corrente ou movimento da região. É importante ressaltar que, em ambos os softwares, são definidos os pontos de entrada e saída de corrente dos eletrodos, conforme demonstrado na Fig. 4.

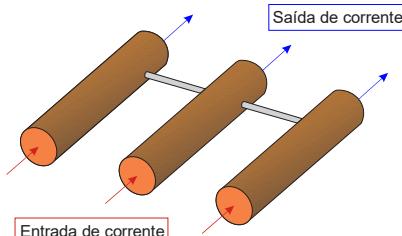


Fig. 4. Fluxo de corrente nos eletrodos.

4.1 – ARRANJO DE SIMULAÇÃO

Ambos os softwares, necessitam o fornecimento de variáveis de entrada para caracterizar o comportamento do arco elétrico durante a simulação. O EMAG utiliza apenas a corrente de arco (I_{arc}), enquanto o CFD exige a corrente e o tempo de duração do arco elétrico. Em cada ferramenta, é necessária a criação de uma configuração de simulação para definir inúmeros parâmetros, como o número de etapas e iterações a serem executadas.

A parametrização da simulação no software CFD abrange modelos físicos, materiais, condições de contorno e definição do tipo de solução. Além disso, o usuário pode definir parâmetros iniciais e comandos a serem executados durante a simulação e usufruir de diversos recursos, como plotagem de gráficos, contornos, vetores e outros recursos para pós-processamento dos resultados.

Para atingir o tempo de simulação desejado (que corresponde à duração do arco elétrico), algumas configurações devem ser definidas, como "Número de intervalos de tempo", "Tamanho do intervalo de tempo" e "Iterações". Após a análise de custo computacional, chegou-se à conclusão que, para obter um desempenho otimizado mantendo-se a confiabilidade dos resultados, o tamanho do passo de tempo adequado para este tipo de simulação é de aproximadamente 83,3 μ s, o que corresponde a 200 pontos de um ciclo senoidal a 60 Hz. O número necessário de iterações por etapa varia de acordo com a precisão necessária dos resultados. Portanto, para encontrar o número de passos utilizados na simulação utiliza-se a Eq. (13).

$$N_{t_steps} = \frac{t_{af}}{t_{step_size}} \quad (13)$$

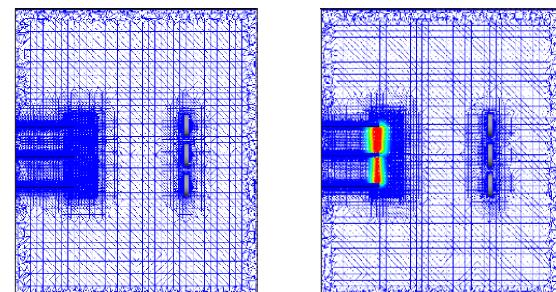
onde, t_{af} corresponde à duração do arco e t_{step_size} ao tamanho do passo.

4.2 – MALHA

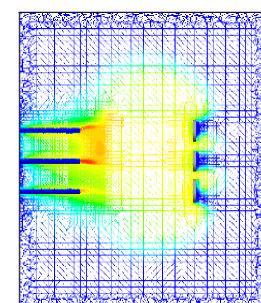
Após a definição da geometria e dos domínios, torna-se necessário realizar a discretização, que envolve a construção da malha. Conforme mencionado na Seção 2.0, para este fim são utilizados o FEM no software EMAG e o FVM no software CFD. Embora a criação da malha seja necessária em ambos os softwares, é no CFD que os resultados finais são obtidos e, como consequência disso, neste é realizado um maior refinamento da malha. A Fig. 5 apresenta o refinamento da malha, onde é possível observar um alto grau de detalhamento, especialmente nas regiões que envolvem os eletrodos, os calorímetros e a região de inicialização do arco elétrico.

A qualidade da malha no software CFD pode ser avaliada por meio da análise da assimetria das células, a qual está relacionada à sua proporção de aspecto. A proporção de aspecto refere-se à relação entre a aresta mais longa e a aresta mais curta de uma determinada célula, e pode ser utilizada para avaliar diversos tipos de elementos, tais como triângulos, tetraedros, quadriláteros e hexaedros.

Para avaliar a qualidade da malha utilizada na simulação, utilizou-se a técnica de controle de malha ortogonal inversa. Esta abordagem determina a qualidade de cada célula utilizando o vetor normal de suas faces (A_k), o vetor centroide da célula em relação a cada das células adjacentes (c_k) e o vetor centroide de cada célula em relação às faces das células vizinhas (f_k). A Fig. 7 apresenta orientação dos vetores para a análise da qualidade ortogonal inversa [18].



(a) Regiões de refinamento. (b) Inicialização do arco.



(c) Expansão do arco.

Fig. 5. Configuração da malha no software CFD.

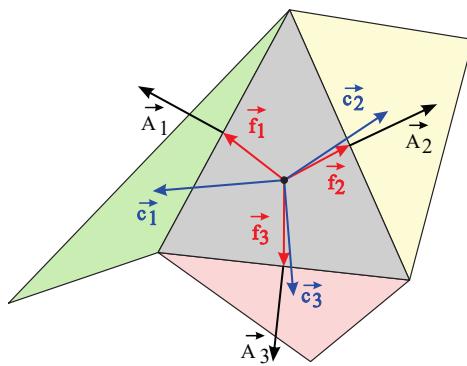


Fig. 6. Vetores referentes à assimetria ortogonal e à qualidade ortogonal inversa.

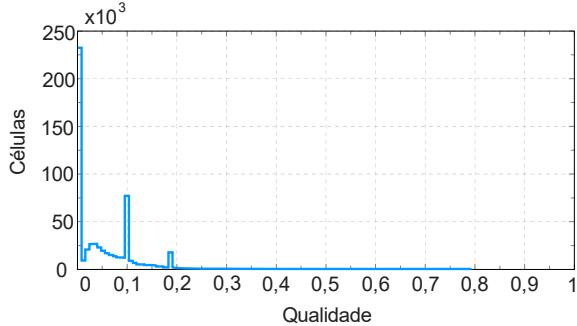


Fig. 7. Qualidade ortogonal inversa da malha utilizada na simulação.

Para cada face é calculado o cosseno dos ângulos entre \vec{A}_k e \vec{c}_k e entre \vec{A}_k e \vec{f}_k . O menor valor calculado corresponde à ortogonalidade da célula e, portanto, a ortogonalidade inversa de uma célula é obtida subtraindo o menor valor de 1. As melhores células (que apresentam uma alta qualidade de malha), terão valores de ortogonalidade inversa próximos de 0. Já as piores células, valores próximos de 1.

A malha criada para as simulações realizadas neste trabalho possui 579.920 elementos, incluindo elementos poliédricos e hexaédricos. Através da Fig. 7 pode-se constatar que a maioria das células está na faixa entre 0 e 0,25 de valores de ortogonalidade inversa, indicando excelente qualidade das células e, consequentemente, produzindo resultados mais confiáveis.

4.3 – ACOPLAMENTO

O processo de acoplamento entre os softwares é fundamental para o sucesso da simulação de arcos elétricos utilizando a teoria MHD. A Fig. 8 sintetiza o conceito deste processo: durante cada iteração, o software CFD fornece os dados de corrente elétrica de condutividade elétrica do fluido em questão para o software EMAG, permitindo que este atualize as informações em seu ambiente de simulação e, consequentemente, calcule e exporte o campo magnético gerado com os dados atualizados. Por sua vez, o CFD atualiza o campo magnético gerado pelo arco elétrico e calcula a força de Lorentz, que influencia na direção e sentido de expansão do arco elétrico.

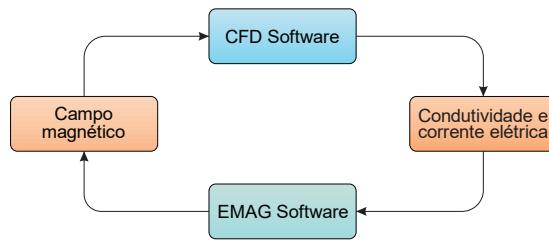


Fig. 8. Processo de acoplamento entre os softwares CFD e EMAG.

4.4 – FUNÇÃO DEFINIDA PELO USUÁRIO

O gerenciamento da transferência de informações resultantes do acoplamento dos softwares é realizado por meio de uma função definida pelo usuário, também conhecida como *user-defined function* (UDF), que corresponde a uma função criada em uma linguagem de programação específica e compatível com os softwares, com o objetivo de aprimorar os seus recursos CFD. Para possibilitar as implementações necessárias nas simulações descritas neste trabalho, foi necessário utilizar UDFs específicas, com funções como, por exemplo, atualizar o campo magnético e a corrente elétrica entre os softwares durante a simulação.

As UDFs oferecem a possibilidade de personalização de várias propriedades, tais como condições de contorno, termos de origem da equação de transporte e ajuste de valores calculados em cada iteração. Além disso, podem ser executadas de forma assíncrona, sob demanda e no final de cada iteração.

Considerando a presente aplicação, o uso das UDFs desempenha um papel ainda mais importante no processo de simulação, uma vez que a solução do campo magnético obtida por meio do software EMAG é estática e não varia com o tempo. Portanto, a maneira mais conveniente de realizar o acoplamento entre os softwares é utilizando corrente contínua (CC), mantendo-se os mesmos valores de entrada em ambos. No entanto, para análises de corrente alternada (CA), como é o caso desta aplicação, é necessário atualizar a corrente de entrada do EMAG a cada iteração do CFD. Para realizar esse processo, foi criada uma UDF que calcula a corrente elétrica em cada instante de tempo e, antes de executar o software EMAG, atualiza o respectivo arquivo correspondente às entradas de corrente lidas no CFD.

4.5 – SELEÇÃO DOS MODELOS FÍSICOS

Em termos gerais, para fins de simulação, os materiais podem ser classificados em duas categorias: sólidos e fluidos. No contexto deste trabalho, os eletrodos e os discos dos calorímetros são feitos de cobre, enquanto o isolamento térmico do calorímetro é constituído de Marinite A®. O ar é usado como fluido, sendo que o comportamento do arco elétrico está diretamente

relacionado às propriedades termodinâmicas do ar, incluindo densidade, calor específico, condutividade térmica e viscosidade, dependentes da temperatura.

Para modelar as características desses elementos no software, é necessário ter referências confiáveis que forneçam os valores de suas propriedades. A condutividade térmica do cobre e do Mari-nite A® podem ser obtidas através de [19] e [20], respectivamente. Quanto às propriedades do ar, as informações utilizadas são baseadas em [21], que implementou os dados no software utilizando funções lineares por partes.

5.0 – RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados de EI obtidos em dois cenários de arcos elétricos de acordo com a metodologia de simulação implementada. Para isso, foram realizadas duas simulações que descrevem a expansão da temperatura do arco elétrico e o aumento da temperatura nos calorímetros. Para validar o método, é realizada uma análise comparativa dos resultados com os valores calculados de acordo com o guia IEEE Std 1584-2018, uma vez que os casos simulados estão dentro do escopo deste guia.

Para a modelagem da simulação, utilizam-se os parâmetros de entrada presentes no guia IEEE Std 1584-2018, conforme discutido na Seção 3.0. Levando esse aspecto em consideração, a Tabela 1 apresenta os parâmetros adotados para os dois casos simulados neste trabalho.

Tabela 1. Parâmetros de entrada utilizados nas simulações.

Sim.	V_{oc} (kV)	I_{arc} (kA)	t_{arc} (ms)	Config.	Gap (mm)	Dist. de trab. (mm)
1	1,10	5,47	179	HOA	100	457
2	4,16	8,50	100	HOA	100	914

Ambas as simulações foram realizadas em uma estação de trabalho equipada com um processador Intel Xeon E2-2699 v3 @ 2,30 GHz (18 CPUs) e 64 GB de RAM.

4.1 – SIMULAÇÃO 1

Os parâmetros de simulação foram definidos no software CFD, incluindo um total de 2150 etapas, com um passo de simulação de 83,33 μ s e 40 iterações por etapa. Além disso, conforme a Tabela 1, utilizou-se uma I_{arc} de 5,47 kA. A simulação levou 79 horas e 26 minutos para ser concluída, totalizando 71.520 iterações. Esses parâmetros resultaram na simulação de um arco elétrico com duração de 179 ms. As Figs. 9 e 10 apresentam o aumento da temperatura nos calorímetros e a distribuição e a expansão da temperatura devido ao arco elétrico, respectivamente.

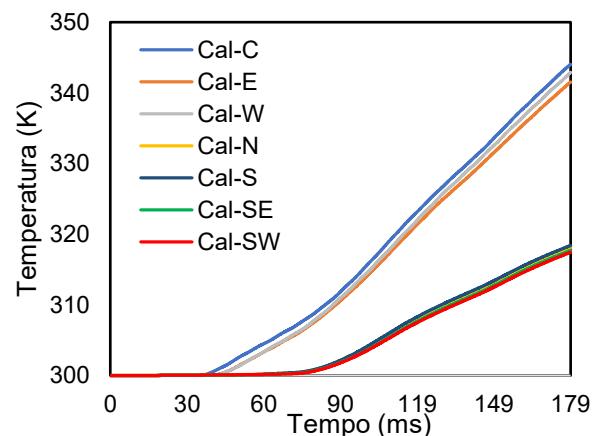


Fig. 9. Aumento de temperatura nos calorímetros para a simulação 1.

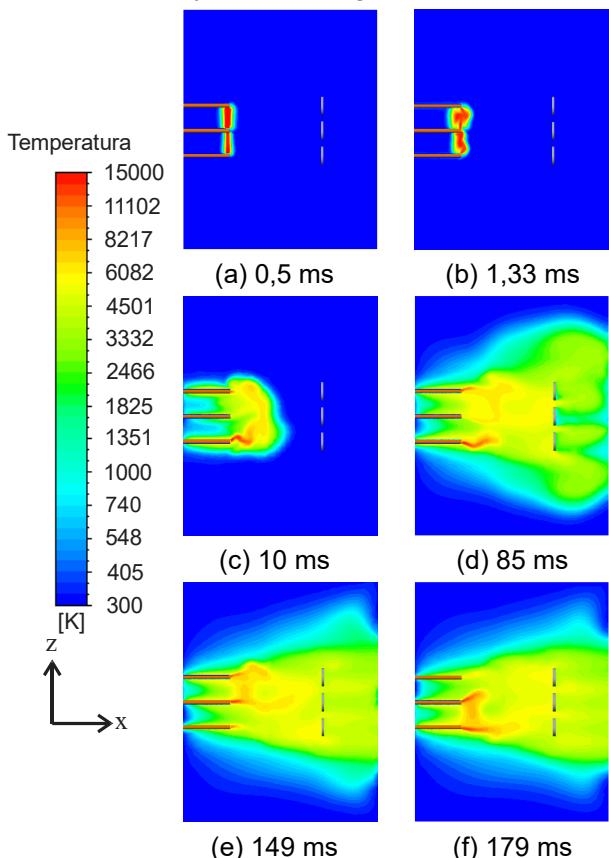


Fig. 10. Distribuição da temperatura na simulação 1.

4.2 – SIMULAÇÃO 2

Analogamente à primeira simulação, foram definidos no software CFD os parâmetros, que incluem um total de 1204 etapas, um tamanho de etapa de 83,33 μ s e 40 iterações por etapa. Além disso, conforme a Tabela 1, utilizou-se uma corrente de arco de 8,50 kA. A simulação 2 demandou um tempo de aproximadamente 40 horas e alcançou um total de 48.160 iterações. Esses parâmetros representaram 100 ms do fenômeno. As Figs. 11 e 12 apresentam o aumento da temperatura nos calorímetros e a distribuição e a expansão da temperatura devido ao arco elétrico, respectivamente.

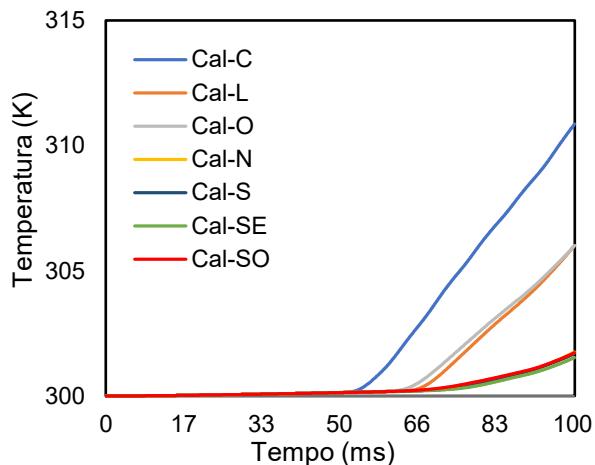


Fig. 11. Aumento de temperatura nos calorímetros para a simulação 2.

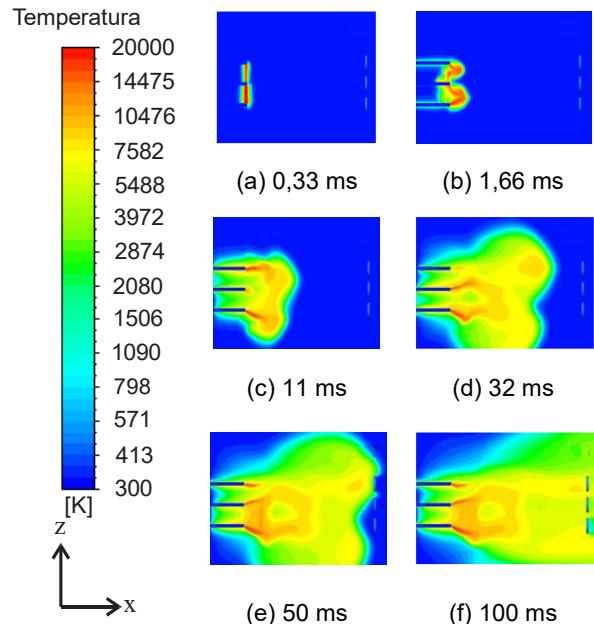


Fig. 12. Distribuição da temperatura na simulação 2.

5.0 – ANÁLISE E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Desta forma, através da análise resultados obtidos por meio das simulações, as Figs. 9 e 11 exibem a expansão da temperatura gerada pelos arcos elétricos até que esta atinja os calorímetros. A temperatura do plasma no início do fenômeno apresenta valores próximos a 20.000 K. Segundo [7], esse resultado era esperado, uma vez que a temperatura do arco elétrico pode ser até de 2,5 a 4 vezes maior do que a temperatura da superfície solar, que é em torno de que é em torno de 5.772 K. Este fato indica que a simulação, a princípio, é capaz de emular o arco elétrico de maneira satisfatória.

Além disso, ao realizar a análise comparativa das Figs. 10 e 12, percebe-se que a expansão de temperatura na simulação 1 atinge os calorímetros em um tempo menor, o que se deve ao fato destes estarem mais próximos dos eletrodos em compara-

ção à simulação 2. Desta forma, como a simulação 1 possui um tempo de simulação maior e os calorímetros estão mais próximos da origem do arco elétrico, estes ficam expostos por mais tempo à energia térmica gerada pelo arco elétrico, refletido na EI.

Outro ponto de análise se refere à adoção de diferentes valores de corrente de arco nas simulações. Na simulação 2, conforme indicado na Tabela 1, utiliza-se uma I_{arc} aproximadamente 55% maior do que na simulação 1, o que reflete na expansão de temperatura decorrente do arco elétrico. A partir de uma análise das Figs. 10 e 12 pode ser constatado que na simulação 2 os pontos de temperatura são de maior magnitude em relação à simulação 1, o que se deve principalmente à adoção de uma maior I_{arc} na simulação, refletindo diretamente no aumento da energia dissipada pelo arco elétrico (considerando a análise até 100 ms).

Destaca-se, ainda, que também houve a adoção de uma V_{oc} maior na simulação 2 do que na simulação 1, e isso também reflete numa maior energia térmica dissipada pelo arco elétrico. Entretanto, a adoção de uma maior I_{arc} é mais preponderante nesse quesito, refletindo mais fortemente na EI do que a V_{oc} , de acordo com o que é descrito pelo modelo matemático do guia IEEE Std 1584-2018.

Para os arcos elétricos simulados, em ambos os casos, o disco de cobre central (C) apresentou o maior aumento de temperatura, representando o pior cenário possível (maior EI). Por esse motivo, esse foi o calorímetro considerado para a análise da EI final gerada na simulação de arco elétrico. Na simulação 1, houve um aumento de temperatura de 44 K, e na simulação 2, de 10,8 K. Dessa forma, é possível estimar a energia incidente utilizando a metodologia proposta pela ASTM 1959/1959M, que se baseia na equação fundamental da calorimetria [22]. Assim, obtém-se valores de energia incidente de aproximadamente 5,84 cal/cm² para a simulação 1 e 1,43 cal/cm² para a simulação 2.

A validação da metodologia utilizada na simulação é realizada por meio de uma análise comparativa entre a EI obtida na simulação e a calculada através do guia IEEE Std 1584-2018, conforme demonstrado na Fig. 13.

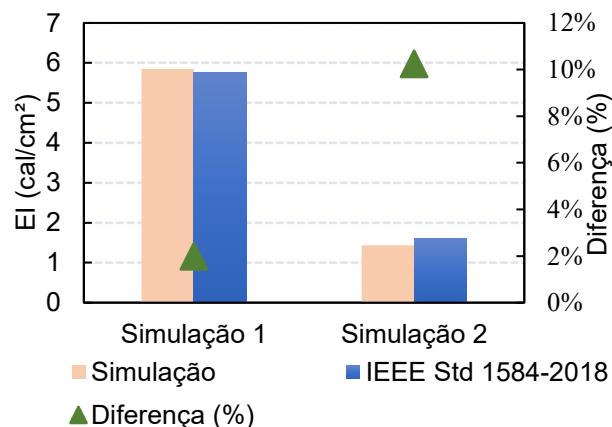


Fig. 13. Gráfico comparativo da EI obtida via simulação e através do guia IEEE Std 1584-2018.

Conforme constatado na Fig. 13, existe uma correlação entre os valores de EI simulados e os estimados pelo guia IEEE Std 1584-2018. Na simulação 1, a EI simulada é cerca de 1% maior do que a calculada pelo guia IEEE Std 1584-2018. Enquanto que para a simulação 2, a EI calculada pelo guia IEEE Std 1584-2018 é cerca de 11% maior. Entretanto, é importante ressaltar que os resultados da simulação são afetados por diversos fatores, como aproximações nos modelos de temperatura ambiente, pressão, umidade, características do material, simplificações estruturais e propriedades físico-químicas dos arcos elétricos, que não são abordadas no guia IEEE Std 1584-2018.

6.0 – CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia para simulação de arcos elétricos trifásicos em CA utilizando a teoria MHD por meio dos softwares Ansys Electronics Desktop® para as simulações eletromagnéticas (EMAG) e Ansys Fluent® para simulação de dinâmica dos fluidos (CFD). Essa abordagem permite analisar o arco elétrico como um fluido condutor de electricidade na presença de campos eletromagnéticos, possibilitando observar as propriedades macroscópicas do fenômeno. O método calcula as interações causadas pelos campos eletromagnéticos, bem como a variação das propriedades do ar em função do aumento da temperatura, principalmente devido à radiação emitida pelo fenômeno. Assim, por meio da simulação, é possível identificar a ignição, sustentação e expansão do arco elétrico ao longo do tempo.

Para auxiliar na validação dos resultados obtidos, foram realizadas simulações seguindo as configurações descritas no guia IEEE Std 1584-2018, que é a referência mais proeminente para a estimativa da EI de arcos elétricos trifásicos. Considerando a variabilidade do arco elétrico e a complexidade das simulações, os resultados simulados para a EI demonstram valores muito próximos aos valores calculados pelo guia IEEE Std 1584-2018, o que possibilita estudos futuros de simulação de arcos elétricos em diferentes condições e cenários utilizando a teoria MHD.

Desta forma, por meio dessa categoria de simulação, é possível analisar com maior precisão o fenômeno do arco elétrico, que é um fenômeno estocástico. Isso pode contribuir para estudos mais efetivos sobre a EI em diferentes cenários, proporcionando uma melhor compreensão do fenômeno, funcionando como uma ferramenta com potencial de auxiliar no dimensionamento de medidas de proteção e segurança dos trabalhadores do setor elétrico.

7.0 - AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da “Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) –

Código de Financiamento 001”. Os autores também agradecem o apoio técnico e financeiro da CPFL Energia no Projeto “DE3069 – Metodologia e Ferramenta Computacional para Avaliação e Modelagem das Condições de Arco Elétrico em Sistemas Elétricos de Potência no Contexto Brasileiro”, desenvolvido sob o Programa P&D ANEEL PD-00063-3069/2020. A realização deste trabalho também contou com o apoio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFSM e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída de Energia Elétrica (INCT-GD).

8.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation: Das/ARC Flash Hazard*. Das, J. C. Editora John Wiley & Sons, 2012, Hoboken, NJ, USA.
- [2] Rau, Shiuan-Hau; Lee, Wei-Jen. “DC Arc Model Based on 3-D DC Arc Simulation”. *IEEE Transactions On Industry Applications*, vol. 52, no. 6, pg. 5255-5261, nov. 2016.
- [3] Mačák, Martin; Výroubal, Petr; Maxa, Jiří. “Magnetohydrodynamic model of electric arc during contact opening”. *Advances in Military Technology*, vol. 14, no. 2, pg. 347–361, nov 2019.
- [4] Samy Faried, P. E.; Hakelberg, Wolfgang. “Arc Flash – IEEE 1584-2018, NFPA 70E 2018, & OSHA Final Rule Highlights and Arc Flash Mitigation Technologies”. *IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference (IAS/PCA)*, pg. 1 -10, jun 2019.
- [5] Mary Stoll, Alice; Chianta, Maria. “Heat transfer through fabrics as related to thermal injury”. *Transactions of the New York Academy of Sciences*, vol. 33, no. 7, pg. 649–670, nov 1971.
- [6] Bottaro, Marcio *et al.* “Analysis of asymmetrical component influence on arc current in the determination of arc thermal performance value of protective personal equipment”. *IEEE transactions on industry applications*, vol. 55, no. 2, pg. 2130–2137, out 2019.
- [7] Lee, Ralph H. “The other electrical hazard: Electric arc blast burns”. *IEEE transactions on industry applications*, vol. IA-18, no. 3, pg. 246–251, maio 1982.
- [8] *IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*. Editora IEEE, 2019. Piscataway, NJ, USA.
- [9] Swierczynski, B *et al.* “Advances in low-voltage circuit breaker modelling” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 37, no. 4, pg. 595–609, jan 2004.

- [10] De Souza, Marcelo Maraschin. "Solução das Equações de Navier-Stokes para Fluidos Incompressíveis via Elementos Finitos". Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 2013.
- [11] Aio, Aritz Iturregi. "Modelization and analysis of the electric arc in low voltage circuit breaker". Tese de Doutorado, Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea, 2013.
- [12] Rong, Mingzhe; Li, Mei; Wu, Yi; et al. "3-D MHD modeling of internal fault arc in a closed container". *IEEE transactions on power delivery*, vol. 32, no. 3, pg. 1220–1227, jun 2017.
- [13] *Electrical Contacts*. Paul G. Slade. Editora Taylor & Francis, 2017, Flórida, US.
- [14] *Fundamentals of Physics, extended*. David Halliday; Robert Resnick; Jearl Walker. Editora John Wiley & Sons, 2021, New Jersey, USA.
- [15] Marroquin, Albert.; Parsons, Antony. "Application of incident energy reference boundary area plots in TCCs considering IEEE 1584-2018 input parameter variability". *IEEE transactions on industry applications*, vol. 56, no. 5, pg. 4640 - 4651, jun 2020.
- [16] Nilsson, Alfred. *Pre-study of arc extinguishing techniques for a 4-pole 1500 VDC contactor*. Acessado em: 20/04/2023 de: <https://odr.chalmers.se/handle/20.500.12380/209403>
- [17] Cruz, Bautista; César, Julio. *Characterization of arc extinction in direct current residential circuit breakers*. Acessado em: 07/04/2023 de: <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/629893>.
- [18] ANSYS, *Ansys Fluent User's Guide*. Canonsburg, 2021, <http://www.ansys.com>.
- [19] BNZ Materials, *Marinite I*, Billerica, 2013. Acessado em 14/04/2023 de: <https://www.bnzmaterias.com/marinite/>.
- [20] *Thermal Conductivity of Selected Materials*, NBS. R.W. Powell, C.Y. Ho, P.E. Liley. 1967, Washington D. C., United States, 1967,
- [21] Murphy, Antony B. "Transport coefficients of air, argon-air, nitrogen-air, and oxygen-air plasmas". *Plasma chemistry and plasma processing*, vol. 15, no. 2, pg. 279–307, jun 1995.
- [22] ASTM. *ASTM 1959/F1959M: Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing*. West Conshohocken, EUA, 2014.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

ELETRICÔMETRO

Rafael Eloi

Vale S.A

rafael.eloi@vale.com

Geovane Souza

Vale S.A

geovane.souza@vale.com

Tiago Alves Borges

PROGEN

C0605895@vale.com

Thiago Henrique Pereira

Vale S.A

thiago.henrique.pereira@vale.com

Usama Asrieh

Vale S.A

usama.asrieh@vale.com

Wender Pinheiro

PROGEN

C0623814@vale.com

Helberth Gonçalves

Vale S.A

helberth.goncalves@vale.com

Eduarda Gomes

Vale S.A

eduarda.gomes@vale.com

Rafael Souza

SM&A

c0607950@vale.com

RESUMO

A norma Regulamentadora – NR 10 preconiza os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade. Garantir que as etapas de; projetar, construir, operar e manutenir ocorra em observância as normas técnicas é uma prerrogativa importante para o processo de adequação as normas regulamentadoras, em especial à NR-10. Um sistema de gestão de segurança em eletricidade requer a implementação de um programa de avaliação periódica dos sistemas elétricos de forma garantir atendimento a legislação. Esse trabalho tem objetivo de apresentar uma ferramenta de avaliação dos riscos das instalações elétricas da Vale, denominado de "Eletricômetro". Essa ferramenta, elaborada pelo corpo técnico da empresa, permite ranquear as instalações pelo nível de aderência aos requisitos técnicos. Essa ferramenta passou a fazer parte do programa de gerenciamento dos riscos elétricos, que permite a tomada de decisão com relação a priorização da alocação de investimentos para revitalização e adequação das instalações. Os resultados alcançados com a adoção deste modelo de gerenciamento podem contribuir na mitigação de riscos em outras empresas que buscam atingir este mesmo objetivo.

1.0 – INTRODUÇÃO

Diante das revisões das Normas que regem o setor elétrico com relação à saúde e segurança dos colaboradores, adequações e funcionalidades do sistema, faz-se necessário o diagnóstico elétrico das subestações que operam nas dependências da Vale no que diz respeito à Sinalização e Identificação, Segurança (Emergência), Documentação, Condições das Salas Elétricas e dos Painéis.

O objetivo deste trabalho é procurar estabelecer e elencar os itens mais críticos da instalação elétrica e consequentemente definir uma abordagem técnica para identificação das não conformidades e a proposição das soluções mínimas para sua adequação.

Este trabalho foi aplicado nas salas elétricas principais e secundárias do Complexo Paraopeba (minas de Fábrica, Viga, Mutuca, Terminal de Olhos D'Água, Jangada, Feijão) e Complexo Vargem Grande (mina do Pico, Tamanduá, Horizontes, Aboboras, Vargem Grande I, Vargem Grande II e Terminal Ferroviário de Andrade), totalizando 209 instalações diagnosticadas.

O objeto deste trabalho é uma síntese das condições atuais das salas elétricas e desenvolver uma metodologia para priorização da adequação das subestações baseado em seu percentual de atendimento avaliando o nível de risco a fim de minimizar os potenciais envolvidos.

2.0 – GRUPO TÉCNICO

Em 2020, a equipe de Engenharia Elétrica da Vale identificou a necessidade de formar um grupo multidisciplinar para abordar o tema "Diagnóstico de Subestações Elétrica". Esta definição foi motivada principalmente pelo alto risco envolvido na operação e manutenção de seus sistemas elétricos e complexidade do tema.

O objetivo do grupo técnico foi padronizar a metodologia do diagnóstico de forma que sua aplicação seja viável e utilizada para priorização das revitalizações de subestações elétricas.

2.1 – METODOLOGIA DE APLICAÇÃO

Para realização desse trabalho foi elaborado em conjunto ao grupo técnico um checklist para diagnosticar e classificar o nível de risco das subestações denominado "Eletrômetro".

Este check list é baseado em requisitos de normas técnicas e padrões normativos internos Vale (PNR) tais como NR-10 (segurança em instalações e serviços em eletricidade), NR-26 (Sinalização de Segurança), NR-23 (Proteção contra Incêndios), NBR-14039 (Instalações Elétricas de Média Tensão de 1,0kV a 36,2kV), NBR-10898 (Sistema de Iluminação de Emergência), NBR-16384 (Segurança em Eletricidade), NBR-5410 (Instalações Elétricas de Baixa Tensão), NBR-5419 (Proteção contra Descargas Atmosféricas), NBR-13231 (Proteção contra Incêndios em Subestações), PNR-00051 (Sistemas Elétricos - Geral - Energia Incidente), PNR-00052 (Aterramento-PDA), PNR-00053 (Sistemas Elétricos), PNR-00069 (Requisitos de Atividades Críticas) e PNR-00080 (Sistemas de Proteção).

2.2 – CHECK LIST

O Check list contém 33 requisitos subdivididos em:

- 8 itens - Sistema Elétrico;
- 7 itens - Estrutura;
- 7 itens – Painéis;
- 4 itens - Sinalização e Segurança;
- 3 itens - Emergência;
- 3 itens – Documentos.

Figura 1: Check list Eletrômetro

Para os critérios de pesos definimos as seguintes premissas a seguir:

Peso 7 - Quando dos itens não conformes possam ocasionar acidentes de **grau N1** (Fatalidades e mudanças de vida);

Peso 5 - Quando dos itens não conformes possam ocasionar acidentes de **grau N2** (Lesões registráveis com alto potencial, afastamentos, restrições);

Peso 3 - Quando dos itens não conformes possam ocasionar acidentes de **grau N3** (Primeiros socorros / dano material, quase acidente, condição insegura);

Peso 1 - Não conformidade que fere a rotina operacional e que se enquadre na classificação grau de risco "Baixa".

Para o critério do Grau de Risco foi definido conforme as seguintes premissas:

Muito alta - Quando dos itens não conforme, algum ou mais apresentam condições de risco a saúde para pessoas e vulnerabilidade das instalações. Obrigatoriamente deverá ser interditado o painel que se encontra com a condição de risco para efetuar manobras ou intervenções com o sistema energizado.

Alta - Quando dos itens não conformes, algum ou mais apresentam risco de perda operacional ou que ferem as normas técnicas e regulamentadoras.

Média - Quando dos itens não conformes, algum ou mais apresentam condições que requerem atenção e que podem evoluir ou que apresentam uma oportunidade de melhoria.

Baixa - Quando dos itens não conformes, apresentam apenas a rotina normal do ativo sem apresentar nenhum risco ao mesmo.

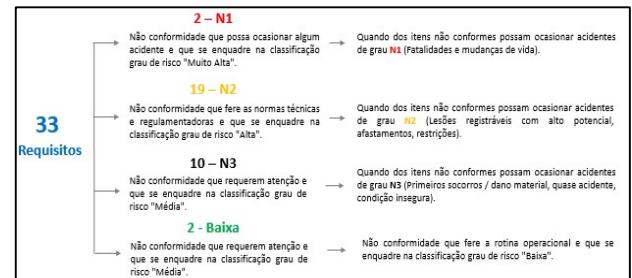


Figura 2: Classificação do Grau de Risco

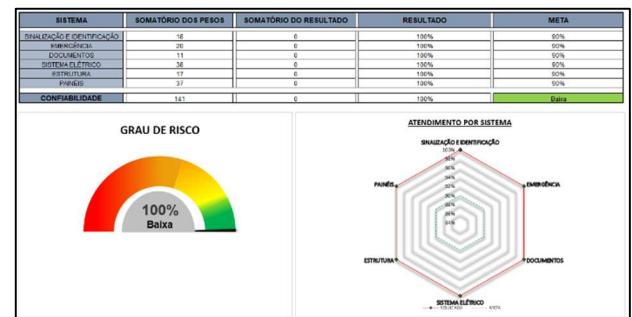


Figura 3: Grau de Risco / Atendimento por Sistema

O Farol será representado automaticamente nas cores abaixo, a medida em que for alcançando seu percentual informado através do Checklist.

Entre 0 e 60%
Entre 61 e 85%
Entre 86 e 100%

Figura 4: Farol percentual de atendimento

Para as subestações que atingirem um percentual de atendimento superior ou igual a 86%, entendesse que ela atende o nível de risco mínimo para que o profissional trabalhe com segurança.

Através do diagnóstico, será sinalizado se os requisitos estão **conforme**, **não conforme** ou **não aplica**, o Nível de Risco da subestação será avaliado conforme o percentual de atendimento e o grau de risco de acordo com o check lis onde vamos inserir na Matriz de Nível de Risco abaixo:

Matriz Nível de Risco - Inicial		GRAU DE RISCO			
		BAIXA	MÉDIA	ALTA	MUITO ALTA
% ATENDIMENTO	0% a 60%				
	61% a 85%				
	86% a 100%				

Figura 5: Matriz do Nível de Risco

Como premissa, foi definido que a aplicação do check list será de forma não intrusiva, ou seja, todos os itens serão inspecionados visualmente sem a necessidade de interação com os circuitos elétricos energizados.

3.0 – ESTUDOS DE CASOS

Apresentamos neste artigo duas subestações com aplicação do Eletricômetro na prática, onde uma delas foi necessário realizar a uma revitalização completa onde foi substituído toda a estrutura, componente e equipamentos. E a outra foi possível realizar adequações na própria estrutura da subestação e aproveitamento de alguns componentes e equipamentos.

3.1 – ESTUDO DE CASO 27SE02

A primeira subestação é a 27SE02 localizada na mina da Mutuca do Complexo Paroapeba. O percentual de atendimento após o diagnóstico foi de 40% e o grau de risco classificado como muito alta.

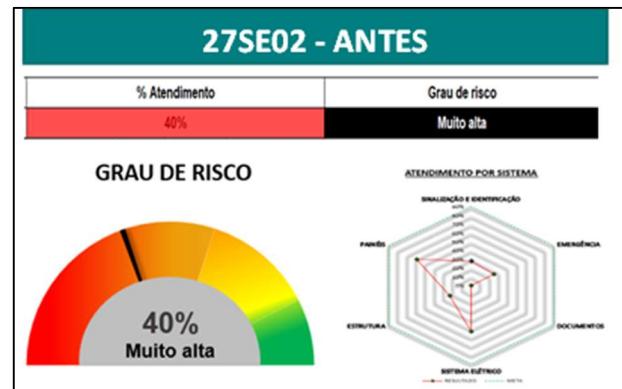


Figura 6: Resultado 27SE02 - antes



Figura 7: Fotos 27SE02 - antes

O ponto mais crítico encontrado para essa subestação eram os constantes alagamentos nos períodos chuvosos onde as galerias de cabos e painéis elétricos ficavam submersos e eram danificados.

Matriz Nível de Risco - Inicial		GRAU DE RISCO			
		BAIXA	MÉDIA	ALTA	MUITO ALTA
% ATENDIMENTO	0% a 60%				X
	61% a 85%				
	86% a 100%				

Figura 8: Nível de Risco 27SE02 - antes

Foi desenvolvido o projeto executivo para adequação dos itens não conforme e verificado que seria necessário realizar a revitalização completa da subestação.

Na aplicação deste projeto, viu-se a necessidade de elevar o nível da subestação para evitar novos alagamentos, optamos por construir uma base civil para receber um eletrocentro onde este viria com grande parte dos itens do check list adequados, entre eles a substituição dos painéis de baixa e alta tensão, instalação dos sistemas de SDAI (Sistema de detecção e alarme de incêndio), instalação do sistema de aterramento e SPDA

(sistema de proteção de descarga atmosférica) além de toda documentação atualizada da subestação.

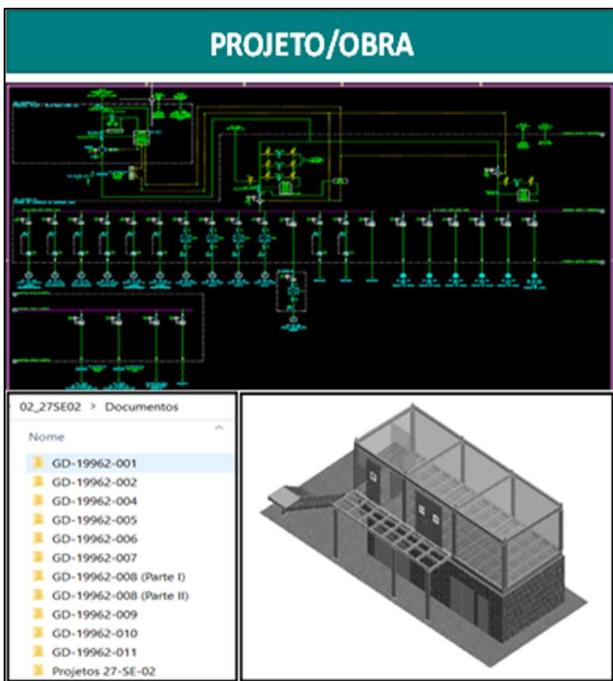


Figura 9: Projeto executivo 27SE02

Após conclusão das obras de adequação da 27SE02 aplicamos novamente o check list do Electricômetro onde obtivemos o percentual de atendimento de 98% aos requisitos ficando com o grau de risco classificado como médio.

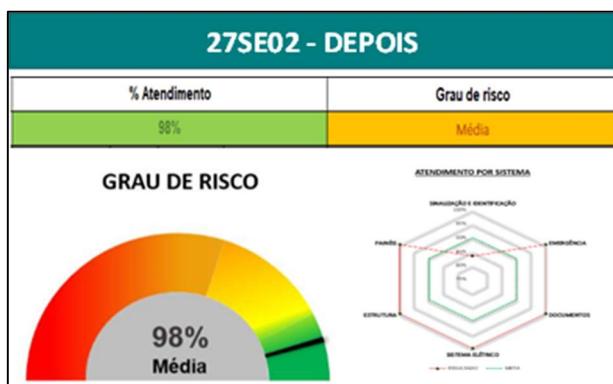


Figura 10: Resultado 27SE02 - depois



Figura 11: Fotos 27SE02 - depois

Matriz Nível de Risco - Inicial	GRAU DE RISCO			
	BAIXA	MÉDIA	ALTA	MUITO ALTA
% ATENDIMENTO	0% a 60%			
	61% a 85%			
	86% a 100%	X		

Figura 12: Nível de Risco 27SE02 - depois

2.4 – ESTUDO DE CASO SE6020_VG01

Apresentaremos a subestação SE6020_VG01 localizada Usina de Vargem Grande II do Complexo Vargem Grande. O percentual de atendimento inicial do diagnóstico foi de 62% e o grau de risco classificado como muito alta.

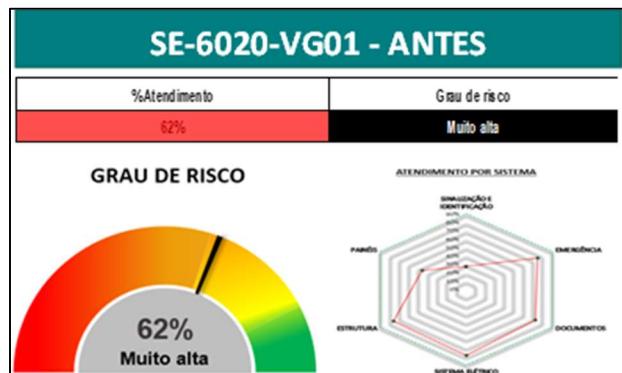


Figura 13: Resultado SE6020_VG01 - antes



Figura 14: Fotos SE6020_VG01 – antes

Essa subestação foi construída com recursos interno a empresa, onde houve o reaproveitamento de equipamentos existentes, os itens mais críticos encontrado durante diagnóstico estão relacionados com os painéis elétricos, onde apresentavam fragilidades durante manobras e a estrutura a subestação devido espaço físico.

Matriz Nível de Risco - Inicial		GRAU DE RISCO			
		BAIXA	MÉDIA	ALTA	MUITO ALTA
% ATENDIMENTO	0% a 60%				
	61% a 85%				X
	86% a 100%				

Figura 15: Nível de Risco SE6020_VG01 - antes

Esta subestação foi realizada um projeto de executivo de adequação mantendo a estrutura física, porém refazendo o layout dos equipamentos em seu interior, durante o projeto foi visto a necessidade de substituição dos painéis mais críticos e manter os painéis em boas condições de operação. Com o andamento das obras de melhorias e adequações já foi possível verificar o atendimento aos itens do check list.

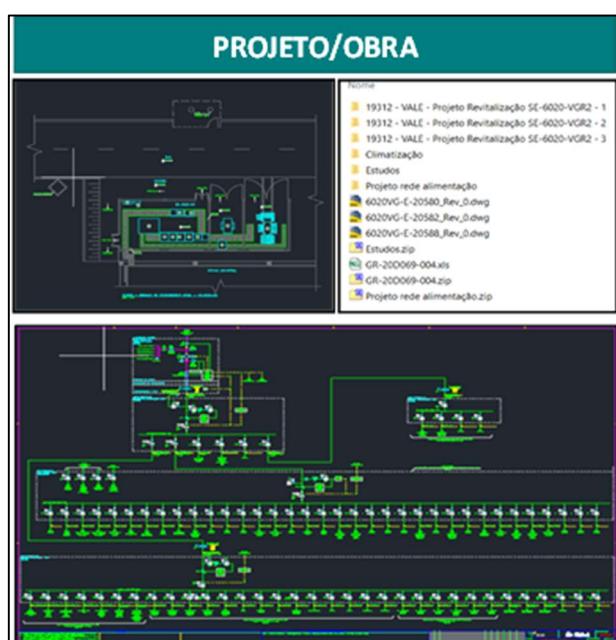


Figura 16: Fotos SE6020_VG01 – depois

Após conclusão das obras de adequação da SE6020_VG01 aplicamos novamente o check list do Eletricômetro onde obtivemos o percentual de atendimento de 99% de atendimento aos requisitos com o grau de risco classificado como baixa.

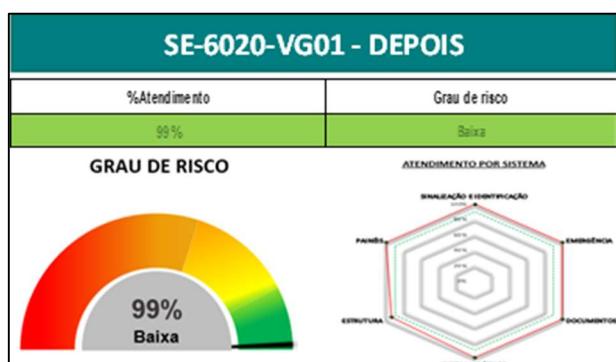


Figura 17: Resultado SE6020_VG01 - depois



Figura 18: Fotos SE6020_VG01 – depois

Matriz Nível de Risco - Inicial		GRAU DE RISCO			
		BAIXA	MÉDIA	ALTA	MUITO ALTA
% ATENDIMENTO	0% a 60%				
	61% a 85%				
	86% a 100%	X			

Figura 19: Nível de Risco SE6020_VG01 - depois

4.0 – CONCLUSÕES

Diante da necessidade de padronizar uma forma de diagnosticar as subestações elétricas, o grupo técnico elaborou um check list denominado “Eletricômetro” onde consolidamos os principais itens normativos de forma a quantificar e classificar o nível de risco das subestações elétricas, além de possuir uma gestão de risco como base para as adequações das instalações tornando-as mais seguras e confiáveis para as pessoas.

Aplicamos o diagnóstico nas 209 subestações dos Complexos Paraopeba e Vargem Grande onde obtivemos uma base robusta para priorização dos investimentos plurianuais dedicada a esse programa.

Para exemplificar a aplicação do “Eletricômetro” apresentamos nesse artigo 2 subestações no qual o nível de risco estava classificado como muito alto e através destes diagnósticos foram priorizadas e inseridas dentro do programa de revitalização para adequação dos itens não conformes, reduzindo o nível de risco para médio ou baixo.

Com os riscos mapeados e classificados o trabalho permitiu uma atuação pontual em requisitos no quais foram adequados dentro da estratégia da empresa, quando identificado um risco crítico (muito alto) e não possibilita a adequação de imediato, é possível tratar risco como prevenção, realizando identificação de advertência e/ou procedimentos de trabalho.

Dessa maneira, a proposta de trabalhos futuros contempla em manter a atualização do check conforme normas vigentes e inclusão de itens que o grupo técnico julgar pertinente, além de realizar de

forma sistemática a aplicação em campo para possuir uma base atualizada.

Esse trabalho também direciona para a elaboração de um capítulo de revitalização elétrica dentro do plano diretor dos complexos.

5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRASIL. Portaria MTE n.º 598, de 07 de dezembro de 2004, Norma Regulamentadora 10, Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. 2004.
- [2] BRASIL. Portaria MTE n.º 704, de 28 de maio de 2015, Norma Regulamentadora 26, Sinalização de Segurança. 2015.
- [3] BRASIL. Portaria SIT n.º 221, de 06 de maio de 2011, Norma Regulamentadora 23, Proteção Contra Incêndios. 2011.
- [4] ABNT - NBR 16384:2020, Segurança em eletricidade — Recomendações e orientações para trabalho seguro em serviços com eletricidade, 2020.
- [5] ABNT - NBR 14039:2005, Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV, 2005.
- [6] ABNT - NBR 14039:2005, Sistema de iluminação de emergência. 2013.
- [7] ABNT - NBR 5419:2018, Proteção contra Descargas Atmosféricas, 2018.
- [8] ABNT - NBR 13231:2015, Proteção contra Incêndios em Subestações, 2015.
- [9] Vale.S.A, SISPAV – Sistema de padronização Vale, Acessado em 10 de setembro de 2020: <https://vale.softexpert.com/softexpert/workspace?page=home>



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

AUDITORIA SISTEMICA DE NR10

Rosinildo Honorato da Silva
Companhia Nitroquímica
rosinildo.honorato@nitro.com.br

RESUMO

Este artigo apresenta a sistematização de uma auditoria da norma regulamentadora 10 que estabelece os critérios para segurança dos trabalhadores e das instalações elétricas. Foi abordado os critérios de aplicação de multas de acordo com a norma 28 e toda a sistematização de preenchimento do check list, os resultados finais da auditoria trouxeram valores de possíveis multas, assim como o plano de ação para não ocorrência de multa em caso de fiscalização dos órgãos competentes.

1.0 – INTRODUÇÃO

[1] A segurança elétrica nas indústrias assume uma importância crucial, tendo em vista que os perigos relacionados à eletricidade podem resultar em acidentes graves e, em casos extremos, até fatais. Garantir a integridade dos trabalhadores e a eficiência e confiabilidade das operações requer a certificação de que tanto as instalações elétricas quanto as documentações e processos estejam em total conformidade com as normas técnicas e regulamentos pertinentes.

Nesse contexto, a Auditoria de NR 10 desempenha um papel essencial para as organizações que desejam ter conhecimento da atual situação dos seus processos ligados a NR 10.

Neste artigo, exploraremos a relevância dessa auditoria, os critérios de avaliação, os pontos sensíveis a serem considerados e os benefícios que ela proporciona ao setor industrial.

2.0 – A IMPORTÂNCIA DA AUDITORIA DE NR10

A auditoria de verificação de conformidade com a NR 10, norma regulamentadora estabelecida pelo Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil,

desempenha um papel fundamental na promoção de um ambiente de trabalho seguro em relação à eletricidade. Seu propósito principal é assegurar que todas as instalações elétricas e documentações relacionadas ao prontuário de instalações estejam em estrita conformidade com os padrões de segurança, com o intuito de minimizar os riscos de acidentes e preservar a integridade e a vida dos trabalhadores. Outro aspecto crucial da auditoria é assegurar que a organização não seja sujeita a penalidades financeiras devido ao descumprimento de requisitos da NR10 que possam ser verificados por órgãos fiscalizadores.

3.0 – ESTRUTURAÇÃO DA AUDITORIA

A auditoria consiste em uma análise abrangente de todos os elementos da NR10, sendo tanto a inspeção das instalações em campo, quanto a verificação de todas as documentações, com o objetivo de verificar se esses elementos estão em conformidade ou não. Cada item que não esteja em conformidade deve ser identificado e registrado. Em seguida, essas não conformidades são comparadas com os valores de multas estipulados de acordo com as classes de infração estabelecidas pela norma relevante, que considera os níveis de gravidade das irregularidades e seus respectivos valores monetários.

Todos os itens auditados devem possuir evidências de atendimento ou não nos itens, essas evidências devem ser armazenadas e guardadas para futuras consultas.

Durante uma auditoria relacionada à NR 10, diversos aspectos das instalações elétricas e dos procedimentos de segurança são minuciosamente avaliados:

Documentação e Procedimentos: O processo de auditoria começa com a análise de toda a

AUDITORIA SISTEMICA DE NR10

documentação relacionada à segurança elétrica, como diagramas elétricos, planos de manutenção e procedimentos operacionais. É essencial garantir que esses documentos estejam sempre atualizados e prontamente acessíveis, pois desempenham um papel crítico na segurança.

Treinamento e Qualificação: A qualificação dos profissionais que lidam com eletricidade é de suma importância. A auditoria verifica se os colaboradores passaram pelos treinamentos adequados, levando em consideração os riscos inerentes, e se possuem a qualificação ou capacitação necessária para desempenhar suas funções de forma segura.

Equipamentos e Instalações: Todos os equipamentos elétricos, desde quadros de distribuição até ferramentas, são minuciosamente avaliados quanto à conformidade com as normas de segurança e às condições para uma operação segura e confiável.

Medidas de Proteção: A auditoria verifica a presença e a eficácia das medidas de proteção, tais como interruptores, dispositivos de proteção contra surtos e sistemas de aterramento, para garantir que estejam em conformidade e funcionando adequadamente.

Manutenção Preventiva: As auditorias também avaliam se as práticas de manutenção preventiva estão sendo seguidas conforme as normas e se os equipamentos estão em boas condições de funcionamento, minimizando os riscos de falhas elétricas.

Sinalização e Identificação: A sinalização adequada e a identificação de riscos elétricos são aspectos críticos para alertar os trabalhadores sobre os perigos potenciais e garantir que estejam cientes dos riscos elétricos presentes no ambiente de trabalho.

Esses são os principais pontos que uma auditoria de conformidade com a NR 10 aborda para garantir um ambiente de trabalho seguro em relação à eletricidade, protegendo tanto os trabalhadores quanto a integridade das instalações elétricas.

3.1 – NORMA NR 28

[2] A Norma Regulamentadora 28 (NR 28) é uma das normas estabelecidas pelo Ministério do Trabalho e Emprego (atualmente Ministério da Economia) do Brasil, e seu foco principal está relacionado à fiscalização e penalidades em ambientes de trabalho. A NR 28 tem o propósito de orientar as empresas e instituições sobre as responsabilidades e procedimentos relacionados à fiscalização do trabalho, garantindo o cumprimento das demais NRs e das leis trabalhistas.

A seguir, estão alguns dos principais pontos abordados pela NR 28:

Definição de Fiscalização do Trabalho: A norma define o que é fiscalização do trabalho, seus objetivos e como ela deve ser conduzida.

Designação de Fiscal do Trabalho: A NR 28 estabelece como ocorre a designação dos fiscais do trabalho, que são os agentes responsáveis por fiscalizar o cumprimento das normas trabalhistas.

Direitos e Deveres do Fiscal do Trabalho: A norma delinea os direitos e deveres dos fiscais do trabalho durante o exercício de suas funções, incluindo o acesso a informações e documentos das empresas.

Registro de Autuação: A NR 28 estabelece os procedimentos para o registro de autuações e infrações, detalhando como as empresas devem ser notificadas sobre as irregularidades encontradas.

Prazos e Recursos: Define os prazos para apresentação de recursos pelas empresas, caso discordem das autuações realizadas pelos fiscais do trabalho.

Penalidades e Multas: A norma trata das penalidades e multas que podem ser aplicadas em caso de descumprimento das normas trabalhistas.

Condições para Cancelamento de Multas: Define as condições sob as quais multas podem ser canceladas ou reduzidas.

Sigilo das Denúncias: Estabelece a importância do sigilo das denúncias feitas por trabalhadores ou terceiros que motivaram a fiscalização.

A NR 28 é essencial para assegurar que as empresas estejam cientes de suas obrigações e responsabilidades no que diz respeito às normas trabalhistas e para garantir que os direitos dos trabalhadores sejam protegidos. Além disso, ela estabelece um sistema de fiscalização que visa coibir práticas inadequadas e promover um ambiente de trabalho mais seguro e justo. Portanto, as empresas devem estar familiarizadas com a NR 28 e seguir suas diretrizes para evitar penalidades e contribuir para um ambiente de trabalho mais saudável e em conformidade com a legislação trabalhista brasileira.

O item 28.2 da NR 28 que trata de "Embargo e Interdição" estabelece que, quando uma situação de trabalho é considerada insegura e pode causar danos à saúde ou à integridade física dos trabalhadores, a autoridade competente, como um auditor fiscal do trabalho, pode determinar o embargo (paralisação) ou interdição (limitação) das atividades no local de trabalho.

Resumindo, o item sobre "Embargo e Interdição" da NR 28 autoriza as autoridades competentes a paralisarem ou limitar temporariamente as operações em um local de trabalho quando condições inseguras são identificadas, a fim de proteger a saúde e a segurança dos trabalhadores

AUDITORIA SISTEMICA DE NR10

até que as irregularidades sejam corrigidas e as condições de trabalho estejam em conformidade com as normas de segurança.

3.2 – DEFINIÇÃO DE MULTAS DE ACORDO COM A NR 28

O anexo I (Figura 1) da NR28 trata sobre a graduação das multas de acordo com alguns fatores que agravam essas penalidades, sendo considerado o tipo de atuação, se relacionado a Segurança e Medicina do Trabalho, a quantidade de funcionários da empresa auditada e o tipo de classe de inflação que é de determinado no anexo II da NR28.

GRADAÇÃO DE MULTAS (EM BTN)					
Número de Empregados	SEGURANÇA DO TRABALHO				M
	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	
01-10	630-729	1129-1393	1691-2091	2252-2792	378-428
11-25	730-830	1394-1664	2092-2495	2793-3334	429-498
26-50	831-936	1665-1935	2496-2898	3335-3876	499-580
51-100	964-1104	1936-2200	2899-3302	3877-4418	581-662
101-250	1105-1220	2201-2303	3303-4419	4419-5634	663-744

Figura 1- ANEXO I da NR28

O anexo II da NR28 (Figura 2) Determina a o valor da multa em UFIR (Unidade fiscal de referência), de acordo com o item não conforme auditado na respectiva norma, cada item possui um código de inflação, a classe de inflação e o tipo de inflação.

NR 10 (210.000-0)					
Item/Subitem	10.2.1	10.2.2	10.2.3	10.2.4, alíneas "a", "b", "c", "d", "e", "f" e "g"	10.2.5

Figura 2- ANEXO II da NR28

Na auditoria realizada como exemplo desse artigo possuía no momento da auditoria 950 funcionários se enquadrando na graduação de multas conforme a figura 3. O Valor da UFIR no momento da auditoria foi de R\$ 1,0641

Número de empregadores	GRADAÇÃO DAS MULTAS (EM UFIR)				
	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅
1-10	630-729	1129-1393	1691-2091	2252-2792	378-428
11-25	730-830	1394-1664	2092-2495	2793-3334	429-498
26-50	831-936	1665-1935	2496-2898	3335-3876	499-580
51-100	964-1104	1936-2200	2899-3302	3877-4418	581-662

Figura 3- Faixa de graduação das multas da empresa auditada

O ITEM 28.3.1.1 da NR28 fala que em caso de reincidência, embargo ou resistência a fiscalização, ou evidência de simulação ou fraude os valores serão fixos, podendo ocasionar o embargo ou interdição do estabelecimento.

3.3 – CHECK LIST DE AUDITORIA

Para auxiliar na auditoria foi elaborado um checklist (Figura 4) que possui todos os itens da NR10 que possam ser auditaveis de acordo com a NR28, de forma que o preenchimento já traga ao final do check list os valores simulados de multa, e o plano de ação .

Item auditado	Classe de infração do item	Status do item
 nitro		
CHECK LIST DE ADERÊNCIA		
Data da auditoria	20/02/2022	Empresa
Nitro - SMP		Auditor
Item	Descrição do Item	Rosinado Honório
10.2	Medidas de controle	
10.2.1	Em todas as intervenções em instalações elétricas devem ser adotadas medidas preventivas de controle do risco elétrico e de outros riscos adicionais, mediante técnicas de análise de risco, de forma a garantir a segurança e a saúde no trabalho.	4 AT
10.2.2	As medidas de controle adotadas devem integrar-se as demais iniciativas da empresa, no âmbito da preservação da segurança, da saúde e do meio ambiente do trabalho.	1 AT
10.2.3	As empresas estão obrigadas a manter e esquemar unifilarmente atualizados das instalações elétricas dos seus estabelecimentos com as especificações do sistema de aterramento e demais equipamentos e dispositivos de proteção.	3 AT 10/09/2022 João Salvador
10.2.4	Construção do Prontuário das Instalações Elétricas para cargas > 75 kW, com conjunto de procedimentos e instruções técnicas e administrativas de segurança e saúde, implantadas e relacionadas a esta NR e descrição das medidas de controle existentes;	2 AT 1- Criar sistematicamente alterações nas instalações

Figura 4 - Check list de auditoria

No check list os principais itens são.

Item auditado: Número do item e descrição do item de acordo com o escrito na NR10.

Classe de inflação do item: Classe de inflação do item de acordo com o anexo II da NR28.

Status do item: Situação encontrada no momento da auditoria, podendo ser preenchido como:

Atende Totalmente: Item evidenciado o atendimento total do item.

Atende Parcialmente: Itens que possuem um atingimento parcial, são situações em que poderia levar a interpretação do auditor, as evidências devem ser claras e objetivas.

Não Aplicável: São situações em que o item auditado não tem relação com a realidade da organização, um exemplo seria a verificação de itens relacionados a instalações em áreas classificadas em instalações sem essas características.

AUDITORIA SISTEMICA DE NR10

Não Conforme: São itens onde foi evidenciado o não cumprimento do item auditado, como exemplo a falta de diagramas unifilares da instalação.

Responsável da ação: Em caso de não conformidade ou atingimento parcial, no momento da auditoria o recomendável é que já seja criado um plano de ação para que em um tempo pré-determinado aquela ação seja normalizada, importante que o responsável pela ação tenha conhecimento e competência para realização da ação determinada.

Recomendações gerais: São informações que o auditor julgar necessário no momento do preenchimento.

Evidências de não conformidades: Nesse campo o auditor pode colocar informações que comprovem a não conformidade.

Após o preenchimento de todos os itens auditados de acordo com o check list foi gerado um resumo (Figura 5) com as informações da quantidade de itens atendidos, não atendidos, conformidade de atingimento e valores de multa.

Itens Atendidos	Itens não conformes
7	32
% de conformidade total	Valor mínimo da multa
21%	R\$ 250.000,00

Figura 5 - Quadro resumo da auditoria

Também foi gerado um quadro resumo com as multas por parágrafos da NR10 (Figura 6), considerando a porcentagem de atingimentos e os valores mínimos e máximos possíveis de multa.

Itens da NR 10 auditados	% de Atingimento	Valor mínimo da multa	Valor máximo da multa
10.2 Medidas de Controle	100%	R\$ 10.000,00	R\$ 100.000,00
10.3 Segurança em Projetos	100%	R\$ 10.000,00	R\$ 100.000,00
10.4 Segurança na Construção, Montagem, Operação e Manutenção	100%	R\$ 10.000,00	R\$ 100.000,00
10.5 Segurança em Instalações Elétricas Desenergizadas	100%	R\$ 10.000,00	R\$ 100.000,00
10.6 Segurança em Instalações Elétricas Energizadas	100%	R\$ 10.000,00	R\$ 100.000,00
10.7 Trabalhos Envolvendo Alta Tensão (AT)	100%	R\$ 10.000,00	R\$ 100.000,00
10.8 Habilitação, Qualificação, Capacitação e Autorização dos Trabalhadores	100%	R\$ 10.000,00	R\$ 100.000,00
10.9 Proteção Contra Incêndio e Explosão	100%	R\$ 10.000,00	R\$ 100.000,00
10.10 Sinalização de Segurança	100%	R\$ 10.000,00	R\$ 100.000,00

Figura 6 - Quadro resumo de atingimento por item

3.4 – CRONOGRAMA DE AÇÕES.

Uma etapa importante da auditoria é oficialização do cronograma de ações oriundas da auditoria.

As não conformidades encontradas na auditoria devem relatadas e tratadas para que as não conformidades encontradas na auditoria, não se

tornem multas futuras em caso de fiscalização dos órgãos competentes.

O plano de ação (Figura 7) deve conter o responsável pela ação, a ação de reestabelecimento e data limite de execução da ação.

CRONOGRAMA DE AÇÕES DO RELATÓRIO D						
Item	Descrição do item	C	S	Z	Prazo	Responsável
10.2.4	documentação das inspeções e medições do sistema de proteção contra descargas atmosféricas e aterramento elétricos;	2	AP		30/01/2022	Rosinilco Honorato
10.2.4	As empresas que operam em instalações ou equipamentos integrantes do sistema elétrico de potência devem constituir prontuário com o conteúdo do item 10.2.4 e acrescentar ao prontuário os documentos a seguir listados:	2	NC		10/09/2022	Rosinilco Honorato
10.2.5		4	NC			

Figura 7 - Cronograma de ações

4.0 – CONCLUSÕES

Após a auditoria foi possível evidenciar pontos passíveis de multas e os valores que poderiam ocasionar multas, podendo em muitas vezes ser maiores do que os gastos para sanar a não conformidade encontradas,

Com a realização da auditoria foi possível obter uma verba de R\$ 250.000,00 (Duzentos e cinquenta mil reais) para a regularização dos pontos encontrados como não conformidades.

Um outro ponto muito importante foi a aceitação dessa auditoria interna em auditorias de órgãos certificadores, seguradoras, órgãos estaduais e federais assim como as auditorias de clientes.

Após a realização da auditoria na Matriz da empresa, foi solicitado que essa auditoria fosse expandida as demais unidades da empresa.

5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] *Manual de auxílio na interpretação e aplicação da nova NR-10.* Joaquim Gomes Pereira e João José Barrico de Souza. Editora LTr, 2005, Rio de Janeiro, RJ.

[2] Itami Paulo . *NR 28 Fiscalização e Penalidades.* Acessado em 01/09/2023 de: <https://pt.slideshare.net/itami2000/nr-28-63447423>



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

SUPRESSORES DE ARCOS ELÉTRICOS

Sergio Roberto Santos
Lambda Consultoria Ltda.
sergio@lambdaconsultoria.com.br

RESUMO

A proteção contra os arcos elétricos está fundamentada em medidas de controle, proteção coletiva e proteção individual, coordenadas entre si. Entre as medidas de proteção coletiva, ainda não são amplamente conhecidos os supressores de arcos elétricos, dispositivos desenvolvidos para interromper o arco, reduzindo a energia liberada por ele. Este trabalho introduz este equipamento, apresentando sua finalidade, princípios de funcionamento e aplicações.

1.0 – INTRODUÇÃO

A proteção das pessoas e instalações contra os arcos elétricos depende de um conjunto de medidas entre as quais a utilização de Equipamentos de Proteção Coletiva (EPC). Atualmente no Brasil, e em muitos outros países, a proteção contra arcos elétricos se baseia principalmente na desenergização das instalações elétricas e na utilização de Equipamentos de Proteção Individual (EPI), incluindo as vestimentas de proteção térmica [1], o que é necessário mas insuficiente. Como trabalhar em instalações elétricas energizadas pode ser inevitável e a utilização de EPI reduz mas não evita queimaduras e outras consequências provocadas por arcos elétricos, são necessárias medidas de proteção coletiva, entre as quais a instalação de supressores de arcos elétricos em quadros e painéis, para reduzir a energia liberada na ocorrência de um arco elétrico. Por este motivo é necessário que os profissionais da área conheçam as medidas de proteção ativa contra os arcos elétricos, entre elas a utilização de supressores de arcos elétricos, dispositivos que identificam o surgimento de um arco, o interrompendo o mais cedo possível, para limitar a energia liberada por ele.

2.0 – ARCOS ELÉTRICOS

Um arco elétrico corresponde à condução de uma corrente elétrica de grande intensidade através de um meio normalmente não condutivo, como o ar, por exemplo. Ele se origina do aumento do campo elétrico entre dois pontos, possibilitando a ionização do meio isolante e a condução da corrente através de outros caminhos que não os condutores metálicos [2], como normalmente acontece. Por esse motivo, a energia elétrica se converte em outras formas de energia, como o calor, pressão e luz, em valores altos e por isso extremamente destrutivos.

A energia liberada por um arco elétrico pode ultrapassar 100 cal/cm² por segundo, capaz de elevar a temperatura da pele humana, quando atingida por ela, em até 500°C. Além desse fato, o ar em torno do arco, ao ser aquecido, expande o seu volume em aproximadamente 2,5 vezes, causando uma explosão, cujos efeitos também podem atingir, direta ou indiretamente, quem estiver no local, neste caso com um pequeno retardo em relação às ondas de calor, que alcançam o seu alvo quase instantaneamente [3].

3.0 – MEDIDAS DE PROTEÇÃO PASSIVA.

As consequências de um arco elétrico dependem da energia incidente, função da tensão e corrente do sistema, duração do arco e sua distância ao ponto de impacto. Como a tensão do sistema atende aos aspectos operacionais da instalação, normalmente impossíveis de serem alterados, devem ser trabalhadas a distância, barreiras de segurança, redução da intensidade da corrente e duração do arco.

Do ponto de vista normativo, no Brasil a proteção contra os arcos elétricos está descrita em um conjunto de medidas inseridas na norma

regulamentadora NR 10 e na norma técnica ABNT NBR 16384:2020 [4], podendo ser resumidas em:

- 1) Medidas de prevenção que evitem a ocorrência de um arco elétrico;
- 2) Procedimentos operacionais para tornar as intervenções em instalações elétricas intrinsecamente seguras;
- 3) Fornecimento de EPC e EPI aos trabalhadores, os capacitando para que os utilizem de forma correta, sempre que necessário;
- 4) Difusão de informações sobre acidentes já acontecidos, fornecendo as lições aprendidas com eles.

A proteção passiva contra os arcos elétricos consiste principalmente na desenergização das instalações, utilização de EPI e painéis com elementos extraíveis e resistentes ao arco. Do ponto de vista da segurança, painéis resistentes ao arco são eficazes enquanto suas portas estiverem fechadas, situações que não ocorrem sempre na prática.

Tecnicamente, um equipamento à prova de arco elétrico deve direcionar todo o material produzido por combustão para sua parte superior, evitando atingir quem esteja próximo a ele. Ao mesmo tempo, suas portas e anteparos de proteção devem permanecer fechados, impedindo a liberação de fragmentos, e que o arco não perfure as paredes do painel, mantendo ainda a integridade do seu aterramento [5]. Dessa forma, painéis resistentes ao arco são eficazes enquanto suas portas estiverem fechadas, situações que não ocorrem sempre na prática.

4.0 – Supressores de arcos elétricos

Embora a utilização de EPI e a instalação de painéis resistentes ao arco sejam medidas de proteção necessárias e válidas, elas não têm eficácia em relação à redução da energia incidente.

Segundo a norma técnica IEEE 1584-2018 [6], a energia incidente é diretamente proporcional à duração do arco elétrico, sendo ela reduzida quando ele é rapidamente interrompido. Ela pode ainda ser definida como a quantidade de energia térmica impressa em uma superfície, a uma dada distância da fonte, gerada durante a ocorrência de um arco elétrico. Geralmente, a quantificação desta energia é expressa em cal/cm^2 e mensurada através de um estudo baseado em metodologias bem definidas, sendo seu valor fundamental para o estabelecimento da proteção mais adequada para se trabalhar próximo a circuitos elétricos que se encontram energizados [7].

O princípio de proteção ativa tem como objetivo reduzir a duração do arco, limitando os seus efeitos destrutivos. Nesse cenário as proteções ativas atuam no sentido de diminuir o

tempo de eliminação do arco, limitando os seus efeitos negativos, conforme pode ser observado na tabela 1.

Tabela 1. Consequências de um arco elétrico em função da medidas de proteção adotadas.

Proteção	Consequências	
	Pessoas	Instalação
EPI	Danos parciais	Danos gerais
Painéis resistentes aos arcos elétricos	Sem danos	Danos parciais
Automatização e monitoramento remoto do painel	Sem danos	Danos gerais
Supressores de arcos elétricos	Danos reduzidos	Danos reduzidos

Fonte: [8]. Adaptação do autor.

Entre os métodos de proteção ativa, um dos principais é a instalação de supressores de arcos elétricos em quadros e painéis, para desconexão da alimentação de energia imediatamente após o início do arco.

Resumidamente, seria essa a sequência de operação de um supressor de arcos elétricos: Os transformadores de corrente no barramento do painel identificam uma sobrecorrente associada ao arco elétrico, transmitindo essa informação ao dispositivo de comando, visualizado na figura 1. Simultaneamente sensores de luminosidade, ou de pressão, detectam a luz emitida pelo arco, transmitindo essa outra informação para o mesmo dispositivo de comando. Caso os critérios pré-definidos que identificam a existência do arco elétrico sejam confirmados, são emitidos sinais de comando para uma unidade que irá extinguir o arco, diretamente um disjuntor, ou um dispositivo que curta-circuita os barramentos do painel, para que a sua corrente de curto-circuito acione o disjuntor. Após a extinção do arco são emitidos comandos para que o sistema seja desativado, permitindo que o painel seja energizado novamente, após uma avaliação dos responsáveis por eles.



Figura 1 – Dispositivo de comando.
Fonte: Portal Universo Lambda.

A eficiência de um supressor de arcos elétricos está diretamente relacionada a sua não atuação não ocorrência do arco, significando que o supressor deve diferenciar sobrecorrentes e curtos-circuitos de arcos elétricos, não interrompendo a alimentação dos circuitos quando não for necessário. Para isso, os supressores de arcos elétricos utilizam detectores de luz ou pressão, associados a medição da corrente nos barramentos do painel protegido.

Essa dupla validação é possível, porque a detecção de arco pode ser feita por outros meios que não a medição da corrente elétrica. Como a energia do arco se relaciona diretamente com a luminosidade que ele produz, é possível correlacioná-las, tornando a detecção luminosa uma ótima ferramenta para identificação da ocorrência de um arco elétrico [9].

A detecção luminosa se iniciou na década de 1980, adquirindo relevância a partir do ano 2000, sendo atualmente utilizados dois tipos de sensores, os pontuais, visualizados na figura 2, e os de fibra ótica.



Figura 2 – Sensor de luz.
Fonte: Portal Universo Lambda.

Para um atuação mais eficiente, os sensores pontuais são instalados em pontos selecionados do painel, correspondendo às zonas de proteção, dentro do painel, que serão monitoradas. Já os sensores de fibra ótica monitoram uma região, sempre dentro do painel, maior, já que utilizam para isso toda a sua superfície [8], sendo então mais indicados, mas ao mesmo tempo com maior custo. Um outro objetivo para a utilização de fibras óticas em supressores de arcos elétricos é a eliminação de interferências causados pelas correntes no barramento do painel que poderiam induzir correntes espúrias nos condutores de sinal do supressor, comprometendo a sua atuação.

Uma outra opção para identificação da ocorrência de um arco elétrico é através da

deteção da pressão ou do som, embora esta possibilidade apresente resultados inferiores à detecção através da luminosidade, sendo por isso cada vez menos utilizada.

O método mais eficiente de suprimir um arco elétrico é curto circuitar o circuito que o alimenta, acionado assim o disjuntor a montante, reduzindo a tensão e extinguindo o arco em no tempo mais curto possível, atualmente na ordem de milissegundos. Para este objetivo é utilizado um dispositivo que curto circuita os barramentos, visualizado na figura 3, em único ponto, mesmo que o painel seja monitorado em diversos pontos.



Figura 3 – Unidade curto circuitante.
Fonte: Portal Universo Lambda

Por esse motivo, o tempo total de atuação de um supressor de surto é determinado pelo disjuntor, já que a sua atuação, a abertura dos contatos, é mais lenta do que a dos dispositivos de detecção [10]. Mesmo assim, a atuação dos supressores de surto mais modernos se situa na faixa de milissegundos, o necessário para limitar significativamente o valor da energia incidente.

Embora os componentes dos supressores de arco elétrico sejam dispositivos padronizados, fabricados em série. Eles devem ser especificados em função das características de cada painel, em função das suas dimensões e criticidade. Idealmente, o supressor de arco elétrico deve ser incluído no projeto do painel, para que não sejam necessárias adaptações que comprometam o seu desempenho ou aumentem o seu custo.

6.0 – CONCLUSÕES

Supressores de arcos elétricos são soluções eficazes para reduzir os danos provocados pelos arcos elétricos. Embora sejam ainda pouco utilizados no Brasil, já são equipamentos amplamente utilizados em outros países, com resultados comprovados. Por esse motivo, eles devem ser conhecidos pelos profissionais da área elétrica, principalmente

aqueles que trabalham diretamente no fornecimento de energia.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Norma regulamentadora número 10 (NR10), Segurança em Instalações e Serviços em Eletrociade. Ministério do Trabalho e Emprego.

[2] Campos, Mateus Polito. Estudo da Energia Incidente do Arco Elétrico em Quadros/Painéis Elétricos. Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. 2016.

[3] Lobo, Deonizio; Cabral, Sergio H.L. Métodos de especificação de EPIs para proteção contra arcos elétricos. *Revista Eletricidade Moderna*. Nº509. Agosto de 2016.

[4] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 16384:2020 Segurança em eletricidade. Recomendações e orientações para trabalho seguro em serviços com eletricidade. 2020.

[5] Tomiyoshi, Luiz. *Vestimenta de proteção contra queimaduras por arcos elétricos*. Acessado em 30/07/2023 de: <https://www.voltimum.com.br/artigos/artigos-tecnicos/vestimenta-de-protectao>

[6] IEEE 1584-2018. IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations.

[7] Quadros, Secco de. Trabalho em painéis elétricos energizados: O estudo de energia incidente baseado nas normas NFPA 70E e IEEE 1584: 2018. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2019.

[8] Queiroz, Alan Rômulo Silva. Utilização de relés digitais para mitigação dos riscos envolvendo arco elétrico. Universidade de São Paulo. 2011.

[9] Mendes, Celso Luiz Pereira. Proteção contra faltas a arco: estado da arte e perspectivas. *Revista Eletricidade Moderna*. Nº516. Março de 2017.

[10] Kumpulainen, Lauri. Aspects and Directions of Internal Arc protection. University of Vaasa. Setembro de 2016.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

DANOS POR RAIOS EM INVERSORES DE PLANTAS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL INSTALADOS SEM ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO E DE EQUIPOTENCIALIZAÇÃO

Me. Swytz J. S. Tavares

SENAI WDS CE e

Univ. Estadual do Ceará (UECE)

swytztavares21@gmail.com

Esp. Satyro L. S. Tavares

Universidade de Fortaleza

(Pós-UNIFOR)

satyrolst@gmail.com

Me. José Batista S. Filho

Univ. 7 de Setembro

(Uni7)

jbriexe@gmail.com

RESUMO

Os sistemas de microgeração de energia solar fotovoltaica dominam o segmento residencial. Contudo, seus equipamentos são susceptíveis aos efeitos danosos das descargas atmosféricas, principalmente, em edificações antigas que não modificaram ou adaptaram suas instalações para receber estes novos sistemas. Assim, este trabalho elaborou cinco estudos de caso com a estimativa dos valores de sobretensões induzidas por raios na forma de diferença de potencial elétrico (d.d.p.) nos terminais neutro-terra dos inversores, em diversas configurações de operação com os sistemas de aterramento, equipotencialização e SPDA. Para este fim, foram aplicadas as equações básicas do Eletromagnetismo ou da Indução por campo elétrico de Maxwell e pelas 1^a. e 2^a. Leis de Ohm sobre resistência e resistividade elétrica para a modelagem matemática e geoelétrica do solo. Os resultados comprovaram que a instalação de SPDA, aliada ao método da equipotencialização dos eletrodos de aterramento (malha de terra), levaram a redução significativa das sobretensões que, no pior caso, foram estimadas em 214,5 kV.

Palavras-chave: Equipotencialização, aterramento, d.d.p, inversor, hidrogênio-verde.

1.0 – INTRODUÇÃO

A microgeração de energia fotovoltaica residencial é uma fonte importante de benefícios econômicos para a sociedade com a redução do valor da conta de luz que, além da valorização do imóvel, é uma opção viável de energia limpa, renovável e sustentável, além de combater o

aquecimento global do planeta (efeito estufa) [6].

Contudo, trata-se de um sistema que entre suas partes constituintes estão os equipamentos eletrônicos sensíveis aos efeitos da eletricidade. E entre estes dispositivos eletrônicos identificam-se os inversores que convertem a corrente contínua (c.c.) em corrente alternada (c.a.), ou seja, um dos componentes fundamentais ao funcionamento dos sistemas de geração de energia solar fotovoltaica.

Este equipamento representa em média 20% da composição do custo total nestes tipos de projetos de microgeração solar. E realiza a conversão da energia do tipo c.c., produzida pelos módulos fotovoltaicos, ao tipo c.a. que é própria ao funcionamento dos equipamentos residenciais.

Os inversores são o único meio de conversão da energia gerada pelos módulos às cargas elétricas, onde em caso de um mal funcionamento (*breakdown*) haverá a desconexão entre o sistema fotovoltaico e as instalações elétricas da edificação. Assim, entre as possíveis fontes de danos para estes conversores c.c./c.a. (d.c./a.c.) estão os efeitos provocados por transientes eletromagnéticos durante a ocorrência de descargas atmosféricas (raios), conforme as quatro condições S1 a S4 previstas pela norma técnica da ABNT, a NBR-5419/2015.

Nos últimos anos vem ocorrendo no Brasil uma média anual de mais de 70 milhões de descargas atmosféricas (d.a.), computando o valor médio de 9,16 d.a./km².ano ou 213.000 d.a./dia, nos colocando entre os primeiros países do ranking mundial [9]. Inclusive, o recorde do raio mais extenso no mundo ocorreu em 2018 no sul do Brasil computando 709 km de comprimento, sendo mais do que o dobro do recorde anterior registrado em Oklahoma (EUA) com 321 km de extensão.

O recorde da descarga com a mais longa

1/8

duração ocorreu na fronteira com a Argentina e durou 16,73 segundos em 2019, sendo mais do que o dobro do recorde anterior de 7,74 segundos registrado na França em 2012, na região de Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Outra informação importante sobre o cenário brasileiro é que no ano de 2019 ocorreu um super-raio de 249 kA detectado em vila romana na cidade de São Paulo por pesquisadores do INPE.

Portanto, parte de um milhão e quinhentos mil sistemas Solar Fotovoltaico Residencial (SFVR) instalados e em operação no Brasil até o ano de 2022, segundo a ANEEL, estão suscetíveis aos efeitos danosos, diretos e indiretos, das descargas atmosféricas. Assim, antes da instalação de SFVR em edificações antigas o sistema de aterramento e de equipotencialização existente necessita ser reavaliado, o que na prática não vem ocorrendo na maioria destes projetos SFV residenciais.

Os critérios técnicos e padrões normativos sobre aterramento e equipotencialização a serem empregados na segurança operacional dos sistemas de microgeração solar fotovoltaica residenciais (SFVR) já se encontram estabelecidos nas normas técnicas da ABNT, entre elas, a NBR-5410, NBR-5419 e NBR-16690, na forma de condições mínimas e obrigatórias para prevenção e controle de riscos de lesões por choque elétrico, danos em equipamentos e etc.

O estudo levanta a possibilidade de que tais não-conformidades degradam a vida útil e a segurança operacional dos inversores. Inclusive, comprometendo o benefício do retorno financeiro (lucro) idealizado nestes tipos de projetos.

Assim, este trabalho propõe estimar os valores da diferença de potencial (ddp) gerados nos terminais dos inversores residenciais durante a incidência de descargas atmosféricas diretas na estrutura da edificação, ou seja, na condição S1 (NBR-5419), nas alternativas de com e sem a existência de um sistema de para-raios (SPDA).

Foram consideradas quatro tipos de situações básicas para simulação, sendo duas condições técnicas considerando tanto a ausência como a existência de um SPDA na edificação. E, também, outras duas situações tais como: com e sem equipotencialização.

Para este fim, foram aplicadas as equações básicas da Lei do Eletromagnetismo de Maxwell ou da Indução por campo elétrico e pelas 1^a. e 2^a. Leis de Ohm sobre resistência e resistividade elétrica.

2.0 – METODOLOGIA CIENTÍFICA

Neste item, se encontram descritas as fundamentações básicas ao devido entendimento científico deste trabalho. Assim, à elaboração das estimativas referentes aos valores dos potenciais elétricos e d.d.p., foram aplicadas as equações

detalhadas nos itens 2.1 e 2.2, respectivamente.

Segundo a teoria do eletromagnetismo, representada através da equação de Laplace (1) para modelagem matemática do solo considerando um campo elétrico conservativo [4], quaisquer tipos de eventos que envolvam a injeção de corrente elétrica diretamente na terra, como por exemplo, os raios, as correntes de fuga, os curtos circuitos monofásicos ou faltas homopolares e etc., irão gerar diferenças de potencial elétrico (d.d.p.) tanto nas camadas internas como na superfície do solo:

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \quad (1)$$

Durante a ocorrência deste fenômeno, a interação vetorial entre os potenciais elétricos no plano tridimensional distribuídos nas camadas do solo, resultará na simplificação da equação de Laplace (1), conforme a expressão (2):

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2)$$

Sendo V , o valor do potencial elétrico em relação a um ponto referenciado no infinito e ∇^2 o operador de uma equação diferencial de segunda ordem ou operador Laplace-Beltrami.

A equação (1) representa a quantificação das diferenças de potencial que surgem no solo com a incidência de raios no SPDA ou na própria estrutura das edificações. As cargas elétricas ao atingirem o solo seguirão em um formato de espraiamento omnidirecional, onde no caso do SPDA ocorrerá um afastamento radial a partir do eletrodo da malha de aterramento [7], [8] e [10].

2.1 – POTENCIAL ELÉTRICO

Considere-se o ponto C , conforme a Figura 1, localizado na camada de um solo uniforme, tridimensional, infinito, com resistividade elétrica constante e espraiando, omnidirecionalmente, determinada corrente elétrica i de fluxo constante, divergente e radial (esfera) [4].

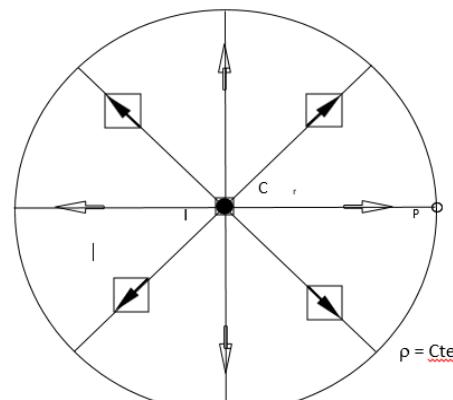


Figura 1: Fluxo de cargas pontuais no solo [4].

2/8

Assim, o módulo do vetor campo elétrico E_p em V/m em um ponto P qualquer na superfície de uma esfera, deduzida pela Lei de Ohm, pode ser obtido conforme a expressão (3):

$$E_p = \rho J_p \quad (3)$$

Sendo J_p a densidade de corrente (A/m²) no ponto P e ρ é a resistividade do solo (Ω.m).

Assim, considerando-se que a densidade de corrente é definida por unidade de área e apresenta o mesmo valor em qualquer tamanho de secção tomada na superfície de uma esfera com determinado valor de raio r e com centro em C , esta grandeza elétrica pode ser calculada através da equação geral (4), conforme descrita a seguir:

$$J_p = \frac{I}{4\pi r^2} \quad (4)$$

Substituindo-se a equação (4) na (3), teremos a expressão (5) do campo elétrico (V/m):

$$E_p = \frac{\rho I}{\pi 4 r^2} \quad (5)$$

Onde ao cálculo de qualquer valor de potencial elétrico, em Volts, em um determinado ponto P no solo com presença de um campo elétrico (V/m), com relação a um ponto no infinito, é dado pela equação matemática (6):

$$V_p = \int_r^{\infty} E_p dr \quad (6)$$

E substituindo-se a expressão (5) na equação matemática (6), obtém-se a equação (7):

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi r} \quad (7)$$

2.2 – DIFERENÇA DE POTENCIAL

Para o cálculo da d.d.p. foi aplicada uma metodologia que considerou a estimativa da resistividade elétrica volumétrica da camada do solo em segmentos de 1,0 m, a partir de uma haste de terra isolada [11]-[14]. Assim, uma queda de tensão (tensão de passo) surgirá durante o espraiamento radial desta corrente elétrica entre as camadas resistivas da terra, conforme a equação (8) [12]:

$$R \cong \rho \frac{d}{2\pi r \cdot (1 + (r^2/3))} \quad (8)$$

Onde, ρ é o valor da resistividade elétrica do solo, d é a distância entre as duas superfícies S_a e S_b , tipo cilíndrica-semiesféricas, concêntricas e consecutivas. Sendo l o comprimento da haste e

r a distância radial da haste entre as camadas em passos de 1,0 m cada um.

Para a estimativa da resistividade elétrica R_{ab} do volume do solo utiliza-se a equação (8). E por fim, aplica-se a 1^a Lei de Ohm para o cálculo da queda de tensão (d.d.p.) entre dois pontos na superfície ou camadas internas do solo [11].

Na Figura 2 se encontra ilustrado o efeito eletromagnético ou a indução dos potenciais elétricos (d.d.p.) no solo durante o espraiamento da corrente decorrente por descarga atmosférica [11].

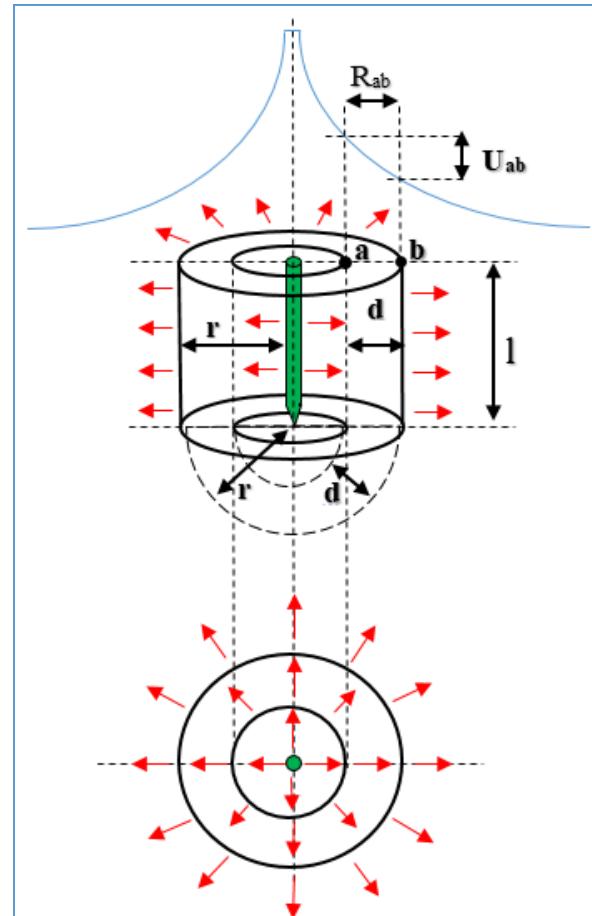


Figura 2: d.d.p. no solo por fluxo de cargas elétricas emitidas por uma haste de aterramento [11].

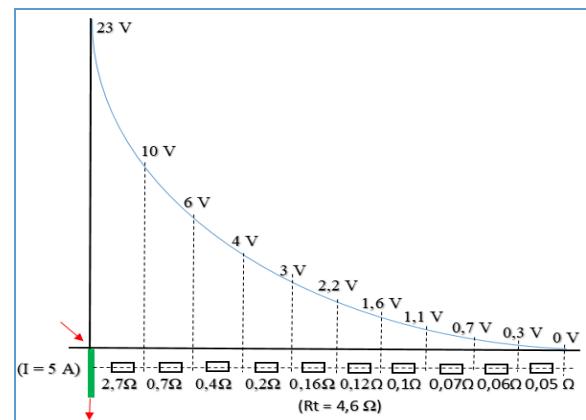


Figura 3: Gráfico-padrão da queda de tensão a partir de uma haste de aterramento [12].

A curva da Figura 3, representa a queda de tensão (U_{ab}), do tipo exponencial-decrescente, gerada pelo efeito de cargas elétricas no solo a partir de uma haste de aterramento isolada [11].

3.0 – FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA

Fundamentado nas bases científicas descritas no item anterior, este capítulo foi desenvolvido com referência nas normas técnicas da ABNT, que estão descritos nos itens 3.1 a 3.3.

Em particular, esta parte do trabalho focou em um entendimento de cunho técnico mais prático e aplicado aos projetos de engenharia.

3.1 – NBR 5410

Esta norma da ABNT estabelece os critérios técnicos para a aplicação do aterramento e da equipotencialização em instalações elétricas de baixa tensão (BT). E entre os tipos específicos de esquemas de aterramento disponibilizados pela norma há o modelo denominado TN-S que é considerado como um padrão de segurança [1].

No anexo G, a referida norma relaciona os principais sistemas ou instalações que devem ser considerados neste processo de aterramento e/ou equipotencialização, a saber:

- Eletrodo de aterramento (fundações);
- Armaduras de concreto armado e todas as estruturas metálicas;
- Tubulações metálicas de utilidades, bem como os elementos estruturais metálicos a elas associados:
 - Água;
 - Gás;
 - Esgoto;
 - Ar-condicionado e etc.
- Condutos metálicos, as blindagens e as coberturas metálicas de cabos:
 - Linha elétrica de energia.
 - Linha elétrica de sinal e etc.
- Condutor de aterramento principal.

3.2 – NBR 5419

A NBR 5419-1, no item 8, estabelece as medidas de proteção contra descargas na forma de zonas de proteção ou ZPRs, onde tais medidas contra os efeitos de raios devem considerar a análise das zonas ZPR 0A e 0B. Respectivamente, uma zona externa e não-protégida da incidência direta de raios, e uma zona externa da edificação mas dentro do volume de proteção do SPDA [2].

O item 3.24 da norma NBR 5419-3 define o Barramento de Equipotencialização Principal (BEP) como o barramento destinado a servir de via de

interligação de todos os elementos que possam ser incluídos na equipotencialização principal [2].

E o item 3.25 da NBR 5419-4 conceitua que a equipotencialização é um conjunto de medidas aplicada para a redução dos potenciais elétricos causados por descargas atmosféricas em instalações, a níveis suportáveis em equipamentos e em instalações, associada a diminuição da possibilidade de risco de choque elétrico [2].

Estas medidas consistem, tipicamente, em ligações entre as partes metálicas das instalações e destas ao SPDA, direta ou indiretamente (por meio de DPS), envolvendo massas metálicas de equipamentos, condutores de proteção, malhas de condutores instaladas sob ou sobre equipamentos sensíveis, blindagens de cabos e condutos metálicos, elementos metálicos estruturais e tubulações metálicas, entre outros [2].

3.3 – NBR 16690

Este regulamento estabelece as condições mínimas de segurança dos projetos de sistemas fotovoltaicos, incluindo-se os esquemas de aterramento e equipotencialização, especificando os requisitos de acordo com as configurações dos arranjos fotovoltaicos, visto que os sistemas em corrente contínua oferecem riscos peculiares em comparação aos dos sistemas elétricos de potência em corrente alternada, incluindo-se os tipos mais severos de arcos elétricos [3].

Um estudo apresentado no CONADSE de 2018 levantou, esquematicamente, os modelos básicos de aterramento elétrico para a operação segura de sistemas fotovoltaicos (SFV) instalados nas edificações em geral, a saber [5]:

- Sem SPDA (Figura 4);
- SPDA e o “SFV interligado” a um subsistema de descida do SPDA, onde a distância entre os módulos e SPDA é menor que uma distância mínima de segurança “s” (Figura 5);
- SPDA e o “SFV não interligado” a um subsistema de descida do SPDA, onde a distância entre SFV e SPDA é maior que uma distância mínima de segurança “s” (Figura 6).

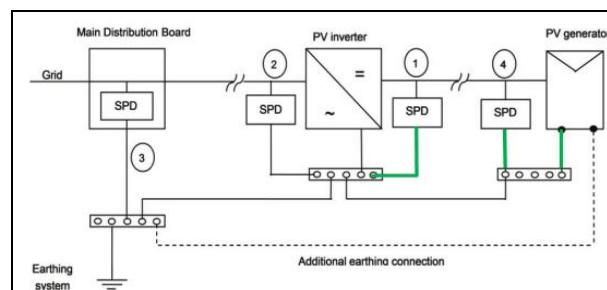


Figura 4: Edificação sem SPDA e com DPS.

**DANOS POR RAIOS EM INVERSORES DE PLANTAS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL
INSTALADOS SEM ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO E DE EQUIPOTENCIALIZAÇÃO.**

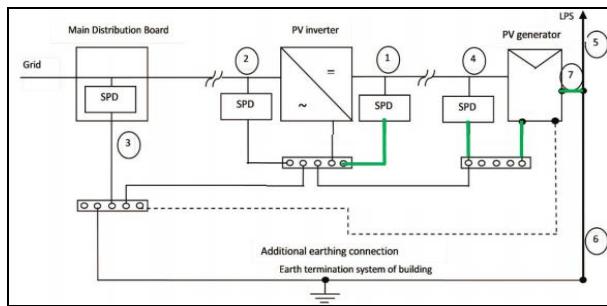


Figura 5: Edificação com SPDA e DPS (Dreal < Dseg).

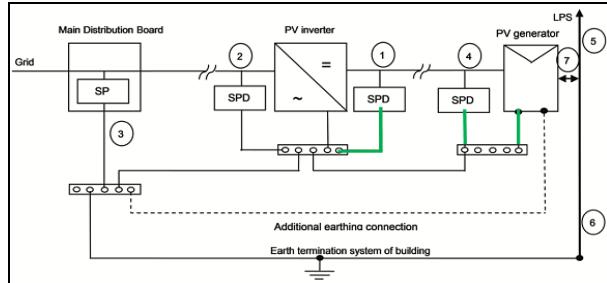


Figura 6: Edificação com SPDA e DPS (Dreal > Dseg).

As situações anteriores descritas exigem um conhecimento mais aprofundado para a elaboração dos sistemas de SPDA, considerando-se todas as Zonas de Proteção contra Raios (ZPR), conforme os detalhes prescritos no Anexo A da norma NBR-5419-1 [2].

Através destas três situações supracitadas, pode-se deduzir que cada configuração poderá subsidiar tanto a escolha da classe do DPS (SPD) tipo c.a. como c.c., referente ao nível de proteção requerida contra as descargas atmosféricas [3].

4.0 – ESTUDOS DE CASOS

Os itens 4.1 a 4.6 descrevem os estudos de casos propostos, os valores levantados pelas estimativas dos potenciais elétricos e as respectivas d.d.p. entre os eletrodos de terra nas diferentes configurações possíveis envolvendo os sistemas de aterramento e equipotencialização de plantas de microgeração SFVR, a saber:

- Com SPDA e sem equipotencial;
- Com SPDA e equipotencial parcial;
- Com SPDA e equipotencial total;
- Sem SPDA e equipotencial;
- Sem SPDA e com equipotencial.

4.1 – INDUÇÃO NO SOLO (d.d.p.)

Através da equação (8), fundamentada nas metodologias científicas dos itens 2.1 e 2.2, estimou-se os valores relacionados na Tabela 1. Eles foram simulados pela variação dos parâmetros de Ir , que representa o valor da

corrente da descarga atmosférica em kA , a resistividade do solo ρ em $\Omega \cdot m$ e l é o comprimento do eletrodo de aterramento em m [12].

Os dados da Tabela 1, também, foram utilizados na elaboração da curva exponencial decrescente do Gráfico 1. Foi plotado apenas com os dados relacionados na última coluna e utilizados como referência em todos os estudos de caso.

Tabela 1: d.d.p. no solo a partir de uma haste.

Ir (kA)	10	20	30	10	20	30
ρ ($\Omega \cdot m$)	50	50	50	100	100	100
l (m)	2,4	2,4	2,4	3,0	3,0	3,0
Cotas (m)						
0,0 – 1,0	23,4	46,8	70,2	39,8	79,6	119,4
1,0 – 2,0	6,71	13,4	20,1	11,7	23,4	35,1
2,0 – 3,0	3,49	6,98	10,4	6,22	12,43	18,7
3,0 – 4,0	2,20	4,39	6,59	3,98	7,96	11,9
4,0 – 5,0	1,53	3,05	4,58	2,80	5,60	8,41
5,0 – 6,0	1,13	2,26	3,38	2,09	4,19	6,28
6,0 – 7,0	0,87	1,74	2,61	1,63	3,26	4,89
7,0 – 8,0	0,69	1,39	2,08	1,31	2,62	3,93
8,0 – 9,0	0,57	1,13	1,70	1,08	2,15	3,23
9,0 – 10,0	0,47	0,94	1,41	0,90	1,80	2,70
10,0 – 11,0	0,40	0,80	1,19	0,77	1,53	2,30
11,0 – 12,0	0,34	0,68	1,02	0,66	1,32	1,98
12,0 – 13,0	0,30	0,59	0,89	0,57	1,15	1,72
13,0 – 14,0	0,26	0,52	0,78	0,50	1,01	1,51
14,0 – 15,0	0,23	0,46	0,69	0,45	0,89	1,34
15,0 – 16,0	0,20	0,41	0,61	0,40	0,80	1,19
16,0 – 17,0	0,18	0,36	0,55	0,36	0,71	1,07
17,0 – 18,0	0,16	0,33	0,49	0,32	0,64	0,97
18,0 – 19,0	0,15	0,30	0,45	0,29	0,59	0,88
19,0 – 20,0	0,14	0,27	0,40	0,27	0,53	0,80

Os valores relacionados na Tabela 1 em kV (ΔV) representam as estimativas de d.d.p. ou tensões de passo no solo, em segmentos de 1,0 m, a partir de uma haste de terra isolada onde está sendo injetada uma corrente elétrica, conforme a teoria exposta no item 2.2 e ilustrado pela Figura 2.

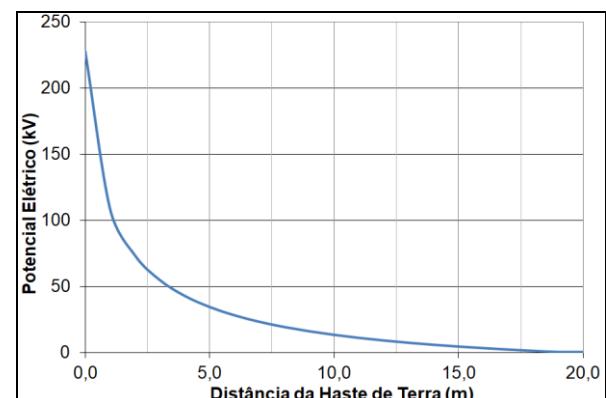


Gráfico 1: Queda de tensão no solo (Tabela 1).

4.2 – COM SPDA E SEM EQUALIZAÇÃO

Nesta configuração, a edificação possui um sistema SFVR, um SPDA e três eletrodos de terra

**DANOS POR RAIOS EM INVERSORES DE PLANTAS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL
INSTALADOS SEM ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO E DE EQUIPOTENCIALIZAÇÃO.**

independentes ou não equipotencializados (H1 a H3), conforme a Figura 7. Inclusive, em todos os cinco estudos de casos, subitens 4.2 a 4.6, os eletrodos de aterramento estão definidos como:

- H1, do SPDA;
- H2, do INVERSOR;
- H3, do MEDIDOR;
- DPS-ca 1 e 2, e;
- DPS-cc 3 e 4.

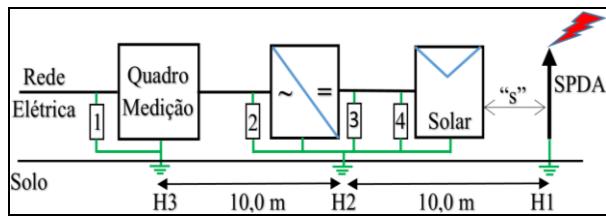


Figura 7: Sistema SFVR (item 4.2).

Os resultados da d.d.p., em kV , assumidas pelas referidas hastes de terra na configuração descrita neste subitem, estão relacionados na Tabela 2 para análise comparativa com as demais situações também em estudo.

Os parâmetros que foram utilizados nas referidas estimativas são os relacionados na 6^a ou última coluna da Tabela 1, a saber:

- $I_r = 30 \text{ kA}$;
- $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$;
- $I = 3,00 \text{ m}$.

4.3 – COM SPDA E EQUALIZAÇÃO PARCIAL

Nesta outra situação, a edificação tem o sistema SFVR e SPDA, mas o eletrodo H1 está independente dos outros dois, H2 e H3, que estão equipotencializados (BEP), conforme a Figura 8. Os resultados estão relacionados na Tabela 2.

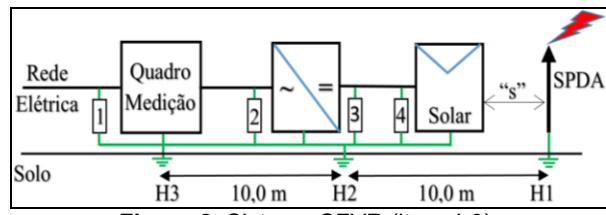


Figura 8: Sistema SFVR (item 4.3).

4.4 – COM SPDA E EQUALIZAÇÃO GERAL

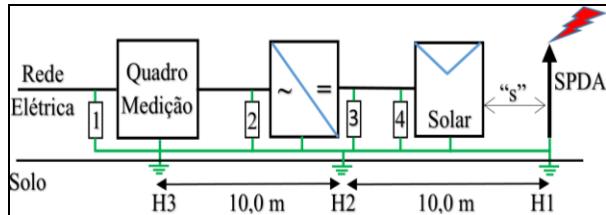


Figura 9: Sistema SFVR (item 4.4).

Nesta outra, a edificação tem um sistema SFVR, o SPDA e os eletrodos (H1 a H3) estão todos equipotencializados com o mesmo eletrodo de aterramento do solo, conforme a Figura 9. Os resultados estão relacionados na Tabela 2.

4.5 – SEM SPDA E EQUALIZAÇÃO

A Figura 10 representa uma edificação com um sistema SFVR, mas sem SPDA. Os eletrodos H2 e H3 não se encontram equipotencializados. Os resultados estão relacionados na Tabela 2.

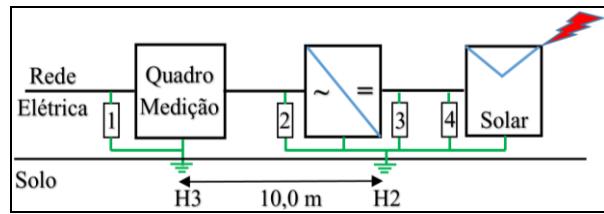


Figura 10: Sistema SFVR (item 4.5).

4.6 – SEM SPDA E COM EQUALIZAÇÃO

O diagrama da Figura 11 mostra uma edificação com sistema SFVR, sem SPDA e os eletrodos H2 e H3 equipotencializados.

Os resultados estão na Tabela 2.

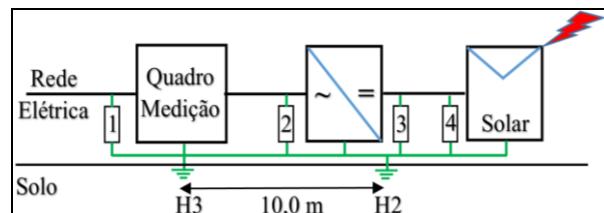


Figura 11: Sistema SFVR (item 4.6).

5.0 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 2: Potencial e d.d.p. entre os eletrodos.

Estudo de Caso - SFVR (Configuração)	Potencial Elétrico (Eletrodos de Aterramento)			Entre Eletrodos (d.d.p.)		
	H1	H2	H3	H1-H2	H1-H3	H2-H3
	V (kV)	ΔV (kV)				
4.2	228,3	13,76	0,80	214,5	227,5	12,96
4.3	228,3	13,76	13,76	214,5	214,5	0,0
4.4	228,3	228,3	228,3	0,0	0,0	0,0
4.5	n.a.	228,3	13,76	n.a.	n.a.	214,5
4.6	n.a.	228,3	228,3	n.a.	n.a.	0,0
Parâmetros	$I_r = 30 \text{ kA}$	$\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$	$I = 3,00 \text{ m}$			

A Tabela 2 relaciona as estimativas dos valores de potencial elétrico dos eletrodos de terra H1 a H3, de acordo com a situação técnica simulada em cada um dos cinco estudos de casos (itens 4.1 a 4.6). Além disso, esta tabela também lista os valores referentes as estimativas da

6/8

**DANOS POR RAIOS EM INVERSORES DE PLANTAS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL
INSTALADOS SEM ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO E DE EQUIPOTENCIALIZAÇÃO.**

diferença de potencial (d.d.p.) entre as malhas de aterramento (H1 a H3), equipotencializadas ou não.

A Figura 12 ilustra as conexões do inversor que poderão ficar susceptíveis ao surgimento de sobretensões induzidas pelos transientes eletromagnéticos durante a ocorrência das descargas atmosféricas ou raios.

A seta de cor verde representa a d.d.p. induzida por um raio entre os fios positivo (+) e negativo (-), que foi transferida às conexões do inversor pela fiação da instalação elétrica de corrente contínua (c.c.) dos módulos fotovoltaicos.

A seta de cor vermelha representa a d.d.p. induzida entre a fiação fase (F) da instalação elétrica de corrente alternada (c.a.) e o aterramento (T). E a seta azul é a d.d.p. entre o fio neutro (N) e o terra (T) nas conexões do inversor.



Figura 12: Conexões c.a. e c.c. do Inversor (d.d.p.).

Os estudos de caso que foram objetos deste trabalho tratou, exclusivamente, as d.d.p. induzidas entre as conexões neutro e terra do inversor. Assim, analisando-se os dados da Tabela 2 sobre as estimativas das d.d.p. induzidas entre os terminais N-T do inversor (Vnt), observam-se as seguintes situações simuladas em edificações com planta de microgeração SFVR instalada no teto e diversas configurações de aterramentos:

- Com SPDA, mas sem a equipotencialização dos eletrodos H1 a H3, a d.d.p. induzida Vnt é estimada em **12,96 kV**;
- Com SPDA e com a equipotencialização de todos os eletrodos H1 a H3, a estimativa de Vnt é nula ou **0,0 kV**;
- Com SPDA e com a equipotencialização dos eletrodos H2 e H3, a estimativa de Vnt é nula ou **0,0 kV**;
- Sem SPDA e sem a equipotencialização dos eletrodos H2 e H3, a Vnt é estimada em **214,5 kV**;
- Sem SPDA e com a equipotencialização dos eletrodos H2 e H3, a Vnt estimada é nula ou **0,0 kV**.

Então, a pior situação ocorreu em uma edificação com um sistema de microgeração Solar Fotovoltaico, sem SPDA e com eletrodos de aterramento, tanto da caixa de medição bidirecional

como do inversor, instalados de forma isolada, independente ou sem equipotencialização.

Os detalhes da simulação estão descritos no item 4.5 (Figura 10). Neste caso, a estimativa da sobretensão por d.d.p. induzida entre os terminais neutro (N) e terra (T) do inversor foi de **214,5 kV**, com alta possibilidade de danificar o inversor através das conexões c.a. Em um trabalho futuro poder-se-á investigar a possibilidade destes danos alcançarem os módulos fotovoltaicos através das interligações com as conexões c.c.

No caso do item 4.2, mesmo diante de eletrodos não-equipotencializados, o valor da d.d.p. estimada foi menor e de apenas **12,9 kV** (Vnt), devido a existência do SPDA na edificação.

O valor **0,0 kV** (nulo) da d.d.p. apresentado no resultado dos demais estudos dos itens 4.3, 4.4 e 4.6, foi unicamente decorrente do processo de equipotencialização, mesmo com ou sem um SPDA na edificação.

É importante, também, salientar que os estudos apresentados nos itens 4.5 e 4.6, na condição “sem SPDA”, não foi analisada a possibilidade de danos nos módulos fotovoltaicos durante a incidência direta ou indireta de raios ou descargas atmosféricas na estrutura da edificação.

6.0 – CONCLUSÕES

Algumas práticas mercadológicas para fornecimento de sistemas fotovoltaicos ao segmento residencial consideram apenas a oferta do menor valor de investimento, em detrimento dos custos da implementação das condições mínimas de segurança e adequação das instalações existentes ao recebimento dos novos sistemas.

As obrigações técnicas dos projetistas englobam a segurança operacional e patrimonial destas plantas de microgeração solar residencial. Além disso, se caracterizam como um dever amplo e legal no âmbito técnico, civil e criminal.

Os estudos de caso demonstraram que a aplicação das técnicas ou métodos normativos já conhecidos sobre aterramento, equipotencialização e SPDA reduzem ou anulam significativamente os riscos contra a integridade destes tipos de sistemas de geração solar.

Ressalte-se que o pior caso em questão foi a edificação sem SPDA e equipotencialização dos eletrodos de aterramento, cuja configuração é a mais comum entre os projetos brasileiros.

Neste caso, o valor da sobretensão induzida por d.d.p. (raio) nos bornes neutro (N) e terra (T) do inversor foi estimada em 214,5kV. As dimensões dos danos neste equipamento eletrônico não foram levantadas e nem foi investigada a possibilidade de sua extensão aos módulos do sistema fotovoltaico.

Assim, este trabalho não esgotou a

exploração do tema em epígrafe. Assim, outros trabalhos futuros necessitam ser desenvolvidos com o objetivo de mais aprofundamento em benefício destes tipos de projetos tanto no Brasil como no mundo.

Inclusive, a presente metodologia, que foi elaborada a partir da dissertação de mestrado do principal autor deste trabalho, será aplicada em prol da avaliação da segurança de sistemas de geração, armazenamento, transporte e consumo de Hidrogênio Verde (H2V).

Agradecimentos

Ao Prof. **Lutero Carmo de Lima**, meu orientador do curso de mestrado em Ciências Físicas da UECE, precursor da pesquisa científica em Hidrogênio Verde no Brasil e “2022 Eni Award Finalist to Nobel Prize in Energy”.

E, na pessoa do Prof. **Sales Brandão**, ao SENAI-CE/WDS e a FIEC pelo investimento na minha formação em H2V através do programa de certificação da agência governamental alemã GIZ (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*).

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT NBR 5410. *Instalações Elétricas de Baixa Tensão*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.
- [2] ABNT NBR 5419. *Proteção contra descargas atmosféricas*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.
- [3] ABNT NBR 16690. *Instalações Elétricas de Arranjos Fotovoltaicos - Requisitos de Projeto*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.
- [4] *Aterramento Elétrico*. Kindermann, Geraldo, Campagnolo, Jorge Mário. Editora Sagra-DC Luzzatto. 1996, Florianópolis, SC.
- [5] AYRÃO, V. *NBR 16690 – Instalações Elétricas de Baixa tensão: Arranjos Fotovoltaicos*. VI Congresso Nacional ABRACOPEL de Atualização Docente em Segurança com Eletricidade - CONADSE, Salto - SP, 2018.
- [6] De Lima, Lutero Carmo et al. Performance analysis of a grid connected photovoltaic system in northeastern Brazil. *Energy for Sustainable Development*, v. 37, p. 79-85, 2017.
- [7] Garcia, Felipe Ribeiro Parente. “Análise dos Potenciais Elétricos e Avaliação dos Riscos relacionados às Tensões de Toque e de Passo devidos à Incidência de Descarga Atmosférica em Edificação”. *Monografia de Graduação*, 2016, UFC.
- [8] Garcia, Felipe Ribeiro Parente et al. “Assessment of risks related to touch and step potentials due to a lightning strike on an edification”. *8th International Conference on Lightning Physics and Effects*. Pirenópolis, Brazil,

May, 2018.

[9] INPE-ELAT. Grupo de Eletricidade Atmosférica. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*, Acessado em 04/12/2019: <http://www.inpe.br/webelat/homepage>

[10] *Instalações elétricas*. Cotrim, Ademar, Alberto Machado Bittencourt. Editora Pearson Prentice Hall do Brasil. 2009, São Paulo, SP.

[11] Tavares, Swytz Jose Silva et al. “Equipotencialização como prevenção de danos em sistemas prediais de gás por descargas atmosféricas: um estudo de caso com abordagem científica”. *X IEEE ESW-Brasil*, 2021.

[12] Tavares, Swytz Jose Silva. “Estimativas dos efeitos eletromagnéticos induzidos por descargas atmosféricas em sistemas de microgeração de energia solar fotovoltaica: um estudo de caso da UECE”. *Dissertação (Mestrado académico)*. Universidade Estadual do Ceará, UECE, Fortaleza, 2021.

[13] Tavares, Swytz Jose Silva et al. “Lightning protection of rooftop photovoltaic systems: a scientific approach”. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, v. 8, fevereiro 2021, IJAERS, p. 2 - 12.

[14] Tavares, Swytz Jose Silva et al. “Proteção de sistemas de microgeração solar fotovoltaica contra descargas atmosféricas: uma abordagem técnico-científica”. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*, 2020.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

SIMULAÇÃO DE MELHORIAS NA SEGURANÇA DO TRABALHO ATRAVÉS DA GESTÃO DE EPI's: IEE/USP

Tadeu Osano de Oliveira
IEE - USP
tosano@iee.usp.br

Alan Takashi Tutumi
UNIVESP
1831089@aluno.univesp.br

Leandro Sousa Freitas
EACH - USP
leandrofreitas@usp.br

RESUMO

Com o objetivo em atender os requisitos da norma regulamentadora Nº 6 (NR 6 - equipamentos de proteção individual - EPI), este trabalho aponta uma proposta para a gestão de controle dos EPI's utilizados no Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE – USP). As informações encontradas e a problemática apresentada gerou a busca de uma ferramenta factível, através de pesquisas com profissionais da área como também referenciais teóricos em gestão de controles, sempre tendo como norte as especificações da NR 6. A implantação do sistema de controle através de *dashboards*, automatizando o gerenciamento de entrada, saída e inventário dos equipamentos, propõe a redução da quantidade de papéis provenientes do processo de controle anterior, como também melhoramento da gestão dos equipamentos em posse dos colaboradores, informando a eles de forma automatizada o período de vencimento e de substituição, tendo a garantia de que os EPI's sejam entregues aos colaboradores, evitando assim possíveis sanções em inspeções dos órgãos pertinentes.

1.0 – INTRODUÇÃO

Com a integração dos meios de produção com inovadoras tecnologias de automatização, surgem novos desafios e oportunidades para os gestores de áreas correlatas e intrinsecamente ligadas à área de produção, como a área de segurança do trabalho. Esses novos desafios se traduzem na necessidade de atualização e melhoria contínua dos equipamentos de proteção individual (EPI's) dos trabalhadores da indústria 4.0, como forma de zelar pela segurança destes, prevenindo acidentes e minimizando prejuízos a todos os envolvidos, evitando afastamentos e paralisações das linhas de produção. Dessa forma,

esse assunto passa a ser prioritário nesse novo cenário e, questões como a gestão da segurança, podem ser otimizadas com a simulação de melhorias na gestão de EPI's, na qual é possível estudar a necessidade de aquisição, controle de estoque e efetividade do uso desses equipamentos, sob diversas condições, sem que isso acarrete riscos físicos aos trabalhadores e/ou grandes custos à instituição e/ou corporação.

Após verificação dos requisitos impostos pela norma regulamentadora Nº 6 (NR 6 - Equipamentos de proteção individual - EPI) e das necessidades da área que faz a gestão da segurança do trabalho no Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE – USP), um conjunto de possíveis soluções passou a ser estudado para que as ferramentas de gestão já existentes fossem adequadas e integradas a novas tecnologias, com a devida colaboração do SESMT/USP¹.

Com o uso da técnica de brainstorming, aliada à técnica de design *thinking*, definiu-se que, para gerar propostas de melhorias dos processos de gestão de EPI's, adotara-se a técnica de análise e gestão dos riscos do negócio como forma de adequar o planejamento dos recursos da empresa às soluções propostas, ressaltando que esta não tem o compromisso em adotá-las, uma vez que a implementação de mudanças na estrutura técnico/gerencial da empresa não faz parte desse estudo.

Desta forma, o presente trabalho propõe como solução para o problema identificado, a automatização do processo de recebimento de EPI's, com a descontinuação do atual controle totalmente feito em meio físico (fichas em papel), agregando agilidade ao processo, menor retrabalho

¹ Serviços Especializados em Engenharia de Segurança e em Medicina do Trabalho da Universidade de São Paulo (USP) que tem como objetivo garantir a integridade física da equipe de trabalho no ambiente ocupacional.

e maior controle de informações através do uso de um sistema informatizado e/ou alguma ferramenta de interação, porém sem deixar de atender às normas de segurança do trabalho no que diz respeito ao controle da gestão das informações tratadas.

2.0 – DESENVOLVIMENTO

A problemática apresentada mostrou a necessidade de uma melhor gestão dos EPI's utilizados pelos funcionários da instituição este ponto foi ressaltado pelo Dr. Hélio Eiji Sueta do IEE/USP, demonstrando que a análise do controle de entrega e recebimento dos EPI's não era apenas uma formalidade para atendimento das normas da segurança do trabalho.

Atualmente, o fornecimento dos EPI's aos trabalhadores é registrado em fichas individuais de papel, um método que atende a legislação de forma a evitar possíveis sanções administrativas e/ou legais à instituição, sem controles específicos que demonstrem quais são os EPI's mais utilizados e qual a periodicidade de substituição de cada tipo de equipamento. Estes controles ainda demandam uma interação por meio físico, o que demonstra a carência de automatização, falta de controle, análise e tratamento das informações registradas.

2.1 – OBJETIVOS

Aplicar uma melhor gestão dos estoques, evidenciar a disponibilidade e uso do EPI's pelos funcionários, por meio de automação do processo com maior interação do funcionário, dando autonomia para informar possíveis necessidades dentro de parâmetros pré-definidos, bem como casos não detectados por esses parâmetros sendo necessários ajustes mais dinâmicos, de modo a definir a instrução de trabalho para aquisição, requisição, utilização, entrega, substituição, manutenção, conservação e treinamento de uso dos EPI's e uniformes.

Também tem como objetivo informar de forma dinâmica a gestão dos EPI's, e em paralelo estabelecer junto ao SESMT/USP um canal de comunicação e complementação das diretrizes, para que esses estejam de acordo com as regras institucionais obedecendo as devidas normativas.

A gestão do EPI's visa estabelecer uma forma de melhorar a percepção de uso e demanda desses equipamentos conforme a função e indicação de uso estabelecida em *book* de EPI's, e de acordo com as exigências do Ministério do Trabalho, quanto à obrigatoriedade de possuírem um Certificado de Aprovação (CA), segundo o que determina a legislação em vigor (art. 167 CLT – NR-06 Portaria 3214 – MTE). Controlar o consumo, estoque, entrega do EPI mediante registro eletrônico no sistema de cada colaborador, observando a data do recebimento, número do CA, descrição detalhado e quantidade. Mensalmente

deverá ser emitido um relatório de fornecimento, demonstrando a quantidade total de EPI's distribuídos para cada funcionário. Este relatório (físico ou eletrônico), deverá ser arquivado junto ao Prontuário de Instalações Elétricas (P.I.E.) do IEE/USP.

O presente artigo tem como premissa verificar alternativas viáveis para uma questão pontual no IEE/USP, sendo que foram identificados vários pontos críticos relativos à logística de entrega e recebimento de EPI's. Este deverá ser utilizado em conjunto com todos os procedimentos e/ou instruções de trabalho aplicados aos respectivos laboratórios e áreas operacionais, quando da execução dos ensaios e atividades operacionais, visando a segurança do colaborador.

O objetivo específico deste artigo, é avaliar o resultado da pesquisa-ação referentes a gestão dos EPI's. Através da análise e gestão dos riscos, identificar os principais itens pertinentes ao problema, por fim apresentar as melhorias no campo técnico/gerencial.

A aplicação de uma melhor gestão dos estoques através de um programa automatizado (*dashboard* em Excel), evidenciando a disponibilidade e uso do EPI's pelos funcionários por meio de automação do processo com interação do funcionário, proporcionando autonomia para informar possíveis necessidades, através de parâmetros pré-definidos, bem como casos não detectados por esses parâmetros, o que implicará ajustes mais dinâmicos, de forma a definir a instrução de trabalho para aquisição, requisição, utilização, entrega, substituição, manutenção, conservação e treinamento de uso dos EPI's e uniformes.

Também tem como objetivo informar de forma dinâmica, a gestão dos EPI's e, em paralelo estabelecer junto ao SESMT/USP um canal de comunicação e complementação das diretrizes, para que esses estejam de acordo com a legislação pertinente.

A gestão dos EPI's com o protótipo visa estabelecer uma forma de melhorar a percepção do uso e demanda desses equipamentos, conforme a função e indicação de uso estabelecida em relação de EPI's do Ministério do Trabalho e atendimento da legislação em vigor (art. 167 CLT – NR-06 Portaria 3214 – MTE), que permitirá controlar o consumo, estoque, entrega/recebimento do EPI mediante registro eletrônico na ficha virtual de cada trabalhador cadastrado no sistema, observando a data de entrega/recebimento, número do CA (certificado de aprovação), descrição detalhada dos itens e suas quantidades. Mensalmente deverá ser emitido um relatório de fornecimento, demonstrando a quantidade total de EPI's distribuídos para cada funcionário. Este relatório (físico ou eletrônico), deverá ser arquivado junto ao Prontuário de Instalações Elétricas (P.I.E.) do IEE/USP.

O estabelecimento destes controles visa o atendimento ao item 6.6 da NR-06 referente a responsabilidades do empregador, detalhado no item 6.6.1 o que cabe ao empregador quanto ao EPI, sendo:

- a) adquirir o adequado ao risco de cada atividade;
- b) exigir seu uso;
- c) fornecer ao trabalhador somente o aprovado pelo órgão nacional competente em matéria de segurança e saúde no trabalho;
- d) orientar e treinar o trabalhador sobre o uso adequado, guarda e conservação;
- e) substituir imediatamente, quando danificado ou extraviado;
- f) responsabilizar-se pela higienização e manutenção periódica;
- g) comunicar ao MTE qualquer irregularidade observada;
- h) registrar o seu fornecimento ao trabalhador, podendo ser adotados livros, fichas ou sistema eletrônico. (Inserida pela Portaria SIT/DSST 107/2009).

2.2 – JUSTIFICATIVA E DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA

Para o desenvolvimento do tema norteador, foram realizadas reuniões com o corpo funcional e com pessoas chaves diretamente envolvidas no processo de gestão de EPI's da instituição estudada, o que proporcionou uma análise do panorama atual da situação.

Com base nessas informações e, após realização de um *brainstorming* entre o grupo e da aplicação da metodologia do design *thinking* sobre o tema sugerido, procurou-se identificar a melhor abordagem a ser utilizada no trabalho e a forma de obter de modo mais dinâmico o retorno das informações relativas ao cenário atual da instituição observando que algumas delas não eram atualizadas desde 2013.

A pesquisa buscou respostas para a questão: É possível propor melhorias de processos realizando interações com produtos e serviços? Este questionamento fez com que o trabalho tivesse uma análise crítica direcionada sobre a seguinte questão: Como poderia ser feito esse tipo de melhoria? Uma vez que, num ambiente de expertise técnica, a proposta de uma solução poderia gerar restrições ou mesmo contestações.

Observou-se que o IIE/USP possui um sistema corporativo integrado para sua gestão que faz uso de produtos licenciados, como a nuvem da empresa Google e as planilhas eletrônicas do Microsoft Excel que dessa forma, se mostraram como os mais viáveis para implantação da automação proposta.

2.2.1 ASPECTOS RELEVANTES

Entende-se que ao propor uma melhoria que produz ganho de qualidade nos serviços

prestados pelo IIE/USP para a sociedade, contribui-se para a eficiência de seus serviços e gera um incremento na imagem de eficiência de gestão do instituto, enquanto instituição pública prestadora de serviços.

Assim como ocorre na indústria 4.0, a utilização da internet das coisas, gerou uma gama de possibilidades e demandas para muitos processos, quer seja nas indústrias ou nos escritórios. E as áreas de gestão de materiais/almoxarifados não ficam para trás. Dessa forma, a ideia de um sistema de controle automatizado e em tempo real das informações necessárias ao controle de estoque de EPI's dos trabalhadores traz um ganho significativo de segurança, eficiência e confiabilidade aos administradores da área em questão.

Esse método de gestão e controle mais dinâmico, gera de certa forma maior economia para o instituto, pois permitirá o envio no prazo correto de uma solicitação de aquisição de novos equipamentos quando estes forem realmente necessários, evitando assim, o acúmulo de material desnecessário em estoque, diminuindo o capital de giro no almoxarifado.

Alguns EPI's possuem controles específicos como: validade, desgastes, controle de vida útil, aspecto visual, coloração etc. Essa situação por vezes implica na compra de equipamento de marca e/ou fornecedores específicos, resultando muitas vezes custos altos, porém necessários.



Figura 1 – Capacetes de proteção
Fonte: "Casa dos EPI's", 2018.

Uma vez parametrizados os dados necessários à gestão dos EPI's, o controle se torna simples. A saída de um equipamento gera baixa no estoque e, contabilizado no montante, à medida que essa baixa atinge uma determinada previsão estipulada no controle, o responsável recebe o input do tipo "necessário programar a aquisição de equipamento XYZ". Desta forma, como uma KANBAN (termo japonês que descreve uma produção "puxada", na qual há sincronização entre as etapas de processo), o próprio usuário acaba

informando ao almoxarifado o momento certo da aquisição de mais equipamentos.

Portanto, fez-se necessária a criação de um sistema eletrônico que agregue informações dos funcionários e dos EPI's, para que, quando solicitado, os mesmos já possuam filtros que direcionem sua escolha e período de uso, ou seja, o sistema envia alerta sobre possível troca do EPI, data de validade, quantidade necessária, tamanhos e especificações, de forma que esse mesmo sistema possa ser acessado via internet para que o funcionário consiga realizar sua assinatura via *login* com uso senha e, desta forma, a documentação fique disponível em nuvem, evitando o uso de papel e fazendo deste um sistema automatizado e ecologicamente correto.

A base da proposta foi a criação de uma planilha eletrônica de controle que agregue informações dos colaboradores, nome completo, número de registro, setor, contatos, número do calçado, tamanho de uniforme, além dos tipos de EPI's que utiliza em seu local de trabalho, exemplo: tipo de óculos de segurança, tipo e tamanho do calçado, uso de luvas, máscaras, entre outros equipamentos dos quais ele necessita para executar suas atividades diárias.

A solicitação e a retirada de cada equipamento serão individuais e restritas ao colaborador que deverá utilizar login e senha para executar esta ação, o objetivo desta é o de controlar a saída do equipamento e a comprovação de que o instituto entregou o EPI ao colaborador para a segurança em seu trabalho, atendendo assim as especificações do requisito 6.6.1 – item “h” da NR 6.

Todo o histórico desse controle ficará à disposição em nuvem e/ou servidor para consultas do instituto e das comissões de segurança do trabalho, CIPA (Comissão Interna de Prevenção de Acidentes), SESMT (Serviço Especializado em Engenharia de Segurança e em Medicina no Trabalho), além de possíveis inspeções dos órgãos públicos.

3.0 PROCESSOS, CONTROLES E AUTOMAÇÃO

O desafio constante das empresas em sistematizar seus processos e controles, visa garantir o fluxo de informações de maneira clara e objetiva, obtendo relatórios e formulários que muitas vezes são utilizados como base de dados para estudos de melhorias, ganhos em produtividade ou até mesmo em diminuição dos custos operacionais.

Os controles internos através de relatórios e formulários podem gerar informações importantes para a gestão dos processos no dia a dia. Segundo Attie (1998), o controle interno compreende todos os meios planejados numa empresa para dirigir, restringir, governar e conferir suas várias atividades com o propósito de fazer cumprir os seus objetivos. Conforme O'Brien (2004), para produzir resultados de alta performance é imprescindível o investimento em tecnologia da informação sendo aplicável a qualquer empresa que queira atender seus clientes, estratégias e operações. A necessidade de dados efetivos com informações objetivas para facilitar e agilizar as tomadas de decisões, faz cada vez mais um sistema informatizado ser uma solução.

Segundo Pressman (2006), o software tem sua principal função ligada ao processamento dos dados, transformando dados em informação para a gestão, que pode além disso tratar estas informações gerando valor para as empresas.

Laudon e Laudon (2004), define os sistemas de informação da seguinte forma:

Hoje, todos admitem que conhecer sistemas de informação é essencial para os administradores, porque a maioria das organizações precisa deles para sobreviver e prosperar (LAUDON e LAUDON, 2004, p.4).

Os sistemas informatizados estão transformando as rotinas possibilitando as empresas a oferta de novos produtos, atendimento a normas e facilitando a gestão de vários indicadores, desde os mais complexos como



Figura 2 – Exemplo de planilha de cadastro
Fonte: “Prometalepis”. 2022.

As informações postadas nesta planilha eletrônica será o filtro da solicitação do colaborador, um pré-cadastro com todos os equipamentos que ele utiliza em seu dia a dia.

Os equipamentos de segurança terão seus controles de utilização baseados na data de validade, ou seja, quando o EPI for destinado ao colaborador, ele terá a informação de validade do equipamento e será cadastrada na planilha.

Esse é um controle importante para quem utiliza o EPI e para o instituto, pois terá a garantia que o equipamento em uso está dentro das conformidades exigidas, e da validade requerida, atendendo o requisito 6.3 da norma NR 6, que informa sobre o dever da empresa em entregar o EPI adequado ao trabalho do colaborador em perfeito estado de conservação e funcionamento.

variáveis críticas de processo como a gestão de controle de EPI's.

3.1 NORMAS E FERRAMENTAS DE QUALIDADE

Em 1978 foi emitida a sétima lei com referência a segurança do trabalho no Brasil: A lei referente aos equipamentos de proteção individual, onde a portaria 3.214 de 08 de julho de 1978 aprova a Lei 6.514 de 22 de dezembro de 1977 referente as normas regulamentadoras - NR - do capítulo V, título II, da consolidação das leis do trabalho, relativas à segurança e medicina do trabalho.

Segundo Cunha (2006) e a norma regulamentadora nº 6 (NR-6) - Equipamento de proteção individual (EPI), refere-se a um equipamento de uso particular, tendo como função a de minimizar alguns acidentes e a proteger certas doenças que poderiam ser ocasionadas no ambiente de trabalho.

De acordo com a norma regulamentadora nº 6 (NR-6) do ministério do trabalho, o uso do EPI é fundamental e de extrema importância para a prevenção de acidentes, visto que muitas vezes os controles relacionados ao ambiente de trabalho não são suficientes para eliminar todos os riscos.

É obrigação de toda empresa que o EPI seja entregue para o funcionário conforme sua atividade e sem nenhum ônus, em perfeitas condições de uso e com a certificação de aprovação (CA). A substituição dos EPI's pelo empregador geralmente é realizada, após seu desgaste ou inutilização.

O gerenciamento de estoque é imprescindível para que a quantidade de EPI's seja suficiente para atendimento da demanda, nem falte e nem sobre.

Paoleschi (2019), salienta que o equilíbrio do estoque necessário e o estoque insuficiente é resultado da boa gestão do almoxarifado, um estoque sem o gerenciamento adequado traz prejuízos à organização.

Uma ferramenta muito utilizada pelas empresas nessa atividade de gerenciamento é o Just in Time (JIT), um método desenvolvido pela Toyota, indústria japonesa na década de 60, em português significa "na hora certa". Trata-se de uma filosofia de trabalho que agrupa o gerenciamento do estoque, com o objetivo do zero desperdício.

O método consiste em utilizar diversas ferramentas para atingir um nível de organização e agilidade que se reflete em números positivos, como: diminuição de estoque e aumento nos ganhos.

De acordo com Cruz, (1998), a qualidade está relacionada a melhoria das condições de segurança do trabalho, pois é pouco provável que uma empresa alcance a excelência de seus produtos negligenciando a qualidade nas atividades e vida daqueles que o produzem.

3.2 APLICAÇÃO DAS DISCIPLINAS ESTUDADAS NO PROJETO INTEGRADOR

A disciplina Metodologia Científica, auxiliou nas atividades acadêmicas e a formação para a pesquisa, norteando as formas de análise para a construção do projeto, objetivando o encontro da solução do problema, assim como a disciplina Produção de Textos que define o texto como não sendo apenas um aglomerado de segmentos linguísticos dispostos no papel, sendo necessário organização e atender a princípios específicos. Destaca-se também a disciplina Sistemas de Informação, que contribuiu de forma direta, pois a automação via *dashboard* do Excel foi o instrumento utilizado na proposta de gestão de controle dos EPI's, as disciplinas de Administração, Logística e Planejamento e Controle de Produção que auxiliaram na atuação do gerenciamento e controle da demanda e estoque dos equipamentos.

A disciplina de Higiene e Segurança do Trabalho foi uma das bases da pesquisa, pois os EPI's estão diretamente ligados ao tema norteador do trabalho, assim como a disciplina de Gestão da Qualidade que auxiliou na análise dos processos envolvidos na gestão de controle dos EPI's, propondo melhorias e adequando as necessidades do IEE-SP na implantação de indicadores de performance dos equipamentos quanto ao mais utilizado, tempo de vida útil, necessidades, e com isso controlar e definir planos de ação a fim de mitigar as falhas envolvidas.

A base para a proposta de solução do problema, foi elaborado utilizando ferramentas de Modelagem e Simulação e Automação Industrial, sendo possível otimizar as operações de cadastro e controle de EPIs, através da automatização das operações, que resultando num registro mais confiável e num controle mais efetivo e eficaz.

4.0 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O ponto inicial do trabalho foi o levantamento e definição da problemática referente a ciência do funcionário quanto ao uso de equipamentos de segurança, para atender os requisitos da NR-6, e como consequência também atualizar os dados do corpo funcional pertinentes ao tema proposto ao trabalho.

Para isso, foi observado junto aos colaboradores da empresa as necessidades quanto ao uso dos EPI's e atualização do programa de prevenção de riscos ambientais (PPRA), uma forma mais dinâmica de sintetizar a informação ao dar ciência no uso dos equipamentos de segurança, para atender a determinações das normas vigentes. Realizar reuniões com foco nessas deficiências, objetivando buscar alternativas viáveis para a problemática deste relatório e não interferir nas estruturas já existentes da instituição, para não haver resistências e travar possíveis processos já em andamento.

4.1 COLETA DE DADOS

As reuniões com a equipe pesquisada, foram feitas inicialmente com base em objetivos abertos para apenas situar o estado atual, no qual os pesquisados tiveram liberdade para explanar sobre suas dificuldades e, também sobre os pontos positivos e negativos da atual estrutura. Foi proposta a criação de duas frentes, uma buscando a atualização dos dados atuais por meio de uma consulta via formulário, onde o objetivo será de localizar e atualizar os dados dos funcionários. A outra frente foi de acordo com base dos dados coletados formatar uma planilha onde é realizada a gestão de EPI's, criando um meio para que o funcionário tenha ciência da necessidade do equipamento de segurança e consequentemente, atenda aos requisitos da normativas referentes ao tema.

O público-alvo do questionário foi o corpo técnico do IEE. O formulário foi constituído de perguntas com alguns direcionamentos já observados nas informações anteriormente coletadas, mas também puderam opinar de forma livre e espontânea com sugestões e propostas para a solução de algum problema apresentado, e quais os empecilhos para a sua implantação, respeitando a Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD)².

Para abordagem do tema, foi utilizada a metodologia do Design *thinking*, através de reuniões semanais e de forma remota entre os integrantes do grupo para estabelecimento de empatia, definição do problema, compilação das ideias, análise dos dados, e posteriormente para a busca da solução, conforme ilustrado na Figura 3.



Figura 3 - Design thinking
Fonte: "Labcom", 2018.

² Disponível em: <https://www.gov.br/cidadania/pt-br/acesso-a-informacao/lgpd>

4.2 - CRIAÇÃO E PROTOTIPAGEM

O *brainstorming* aliado ao *design thinking* fez-se extremamente necessário durante as etapas do projeto. Com isso, utilizou-se de empatia na definição do tema a ser abordado. A particularidade do tema exigiu que fosse adotada a busca de informações pelos membros do grupo para possíveis melhorias dos problemas apontados, passou pelas etapas de definição e ideação e, após a análise das sugestões e alinhamento das alternativas para a solução do problema, prosseguiu-se para as pesquisas e estudos para exploração da melhor forma de realizar a etapa de prototipação.

Na busca para a elaboração da melhor solução de automação dos controles necessários após as pesquisas acadêmicas e no mercado, extraíram-se do *brainstorming*, as seguintes ideias: Controle em *dashboard* através de planilhas eletrônicas do Excel (editor de planilhas que utilizam o sistema operacional Microsoft); Automação das informações através de *phyton* (linguagem de programação de alto nível), utilizando a técnica *machine learning*; Contratação de software específico de ambiente corporativo (intranet).

4.3 PARÂMETROS DE ANÁLISE

As propostas de melhoria foram apresentadas à instituição pesquisada, a qual informou que as alternativas de automação em *phyton* e em software específico contratado, não seriam adequadas, pois em ambas situações, se faz necessária a liberação de dados da empresa em "nuvem" ou à terceiros (contratadas especializadas), o que não é permitido, pois a instituição pesquisada é pública (voltada às atividades de pesquisa no âmbito da energia e ciências ambientais da Universidade de São Paulo), e não há recursos no planejamento para pagamento de software específico.

Desta forma, em acordo com a instituição, confirmou-se que a alternativa mais adequada para a melhoria esperada, é o tratamento das informações via *dashboard* através de planilhas eletrônicas do Excel.

5.0 – APÊNDICES

Esta seção apresenta de forma mais detalhada os resultados do estudo, sendo composta na solução inicial apresentando os riscos e as propostas de melhorias, e solução final as quais contemplam as práticas em andamento.

5.1. SOLUÇÃO INICIAL

Na análise inicial sobre a problemática do IEE/USP, foi abordado as questões de padronização das etapas de entrada e saída dos EPI's, através do mapeamento do fluxo do processo, o objetivo era que através de etapas padronizadas, conseguir-se-ia melhorias substanciais a todo o processo de entrega dos equipamentos, registro dessas entrega, anuências dos colaboradores, baixa do estoque, controle de vida útil dos EPI's, entre outros, ou seja, qualquer desvio cometido poderia ser facilmente identificado e corrigido, toda essa padronização seria devidamente verificada durante as análises realizada pelo grupo foi observado que havia uma sistemática consolidada quanto as diretrizes definidas em observância as normas que tratam do assunto principalmente a NR-06 (art. 167 CLT – NR-06 Portaria 3214 – MTE), então a solução foi reformulada objetivando a automatização das etapas envolvidas para a melhoria da gestão dos EPI's com a redução de registros em papel, obedecendo as normativas respectivas e controlando de forma on-line a situação de cada equipamento em posse dos colaboradores do IEE/USP.

5.1.1 APLICAÇÃO

O protótipo para o gerenciamento eletrônico proposto tem a finalidade de melhorar a gestão dos EPI's do IEE/USP, através do *dashboard* das planilhas eletrônicas do Excel. Desta forma os dados compilados ficam expostos em um único plano onde é consolidada todas as informações cadastradas, conforme ilustrado nas Figura 4 e 5 abaixo.



Figura 4 – Relatório geral (dashboard)
Fonte: “Os próprios autores”. 2022.



Figura 5 – Controle geral
Fonte: “Os próprios autores”, 2022.

5.1.2 LEVANTAMENTO DE DADOS DOS COLABORADORES

Nessa etapa, é realizado o levantamento e cadastro de dados dos colaboradores do IEE/USP, como: nome completo, registro, e-mail, setor de trabalho, ramal de contato e celular, de modo a se obter todos os meios de comunicação possíveis no diretório do programa.

Conforme a necessidade, é possível inserir novos colaboradores, além de possibilitar a edição de todos os dados já cadastrados e organizar as informações por nome, registros e setor.

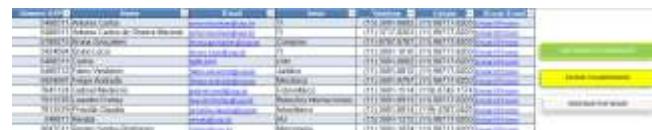


Figura 6 – Banco de dados dos colaboradores
Fonte: “Os próprios autores”, 2022

5.1.3 LEVANTAMENTO DE DADOS DOS EQUIPAMENTOS

O cadastro é realizado através da planilha onde ocorre o gerenciamento virtual de entrada, saída e gestão do estoque de cada EPI cadastrado, e pode ser ordenado por nome do equipamento.



Figura 7 – Banco de dados dos equipamentos de proteção

Fonte: “Os próprios autores”, 2022.

5.1.4 SIMULAÇÃO DO CONTROLE DE ENTREGA DOS EPI'S

Após o cadastro de todas as informações dos colaboradores e equipamentos, inicia a fase da simulação do controle na entrega dos EPI's.

Na planilha principal do programa ocorre a inserção de dados de entrega de EPI's aos colaboradores do IEE/USP, existem os botões de controle para realizar novos cadastros de colaboradores e equipamentos, ajustes de planilhas, ordenações e geração de relatórios gerenciais de controle.



Figura 8 – Botões de controle
Fonte: “Os próprios autores”, 2022.

O gerenciamento de controle de entrega de cada equipamento com a data de entrega e o prazo de validade e status de utilização é indicado na Figura 9.

EPI	ATRIBUÍDO A	DATA DE EMISSÃO	VALIDADE	IDADE DO ITEM	Status
Brinco	Bruna Góes	20/09/2022	05/10/2022	00	VALID
EPI	ATRIBUÍDO A	DATA DE EMISSÃO	VALIDADE	IDADE DO ITEM	Status
Brinco	Bruna Góes	20/09/2022	05/10/2022	00	PROBLEMA

Figura 9 – Gerenciamento de controle de entrega de EPI
Fonte: “Os próprios autores”, 2022.

Nesse exemplo, a colaboradora recebeu um par de luvas para utilização em seu setor, foi entregue para ela no dia 20/09/2022, e no cadastramento do item é inserido a validade do equipamento de proteção (vida útil), nesse caso

corresponde a 90 dias. A partir desta data começa a contagem de vida útil definida e deixa on-line o status do EPI que está “valido”. Se o período de validade vencer, o programa gera um alerta e dispara um e-mail ao usuário para proceder a troca urgente para que o colaborador não utilize um equipamento em não conformidade (vencido).

5.2. SOLUÇÃO FINAL

A partir da implementação da proposta de automatização da gestão de controle dos EPI's observa-se uma melhora em relação ao recebimento do equipamento, a devolução, validade, ou seja, o uso racional desses equipamentos que são utilizados para a proteção do colaborador no seu dia a dia de trabalho. Mais do que o controle de entrada e saída desses EPI's, no controle automatizado é possível analisar de forma on-line se o equipamento que está com um determinado colaborador está dentro de sua validade (vida útil), ou seja, o programa informa de maneira automática como está a integridade do equipamento de proteção. Visualmente é difícil a avaliação de alguns equipamentos quanto a sua integridade, por isso, a questão de controle de vida útil é crucial nesse sentido.

A redução de registros em papéis, organizando de forma automatizada toda a tratativa de anuência dos colaboradores nesta etapa de recebimento dos equipamentos de segurança, nesse aspecto também os registros eletrônicos podem ser arquivados por anos e resgatados de forma rápida quando necessário, desta forma diminuindo a quantidade de estrutura necessária para arquivos, economia financeira, além das questões ambientais.

No aspecto geral todas as informações compiladas nesse programa de gestão dos EPI's trazem consigo um banco de dados que possibilita aos gestores da área analisar quais os gargalos em todo o processo, avaliar o balanceamento de estoque, qual EPI é mais utilizado, qual é a área mais solicitante e até o colaborador, avaliar a qualidade de cada equipamento medindo as quantidades de trocas antes de seus respectivos vencimentos ou pela satisfação do usuário.

Todo esse contexto traz uma ampla visão do gerenciamento de controles do EPI's e a possibilidade de rodar o PDCA para vislumbrar melhorias nesse processo.

6.0 – CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou verificar a problemática levantada no Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE/USP) com o objetivo em propor uma melhoria para a gestão de controle dos EPI's de forma que o fluxo de entrada e saída de equipamentos de segurança não apresente falhas, além do fácil controle,

obedecendo as normativas de segurança, principalmente a NR-6 que trata do assunto.

De acordo com os testes realizados no protótipo, o controle de EPI's via planilha *dashboard* é totalmente viável, pois observa-se que a facilidade na inserção de dados no momento do cadastro, no controle de quantidade em estoque e dos equipamentos em poder dos colaboradores torna a gestão muito mais fácil e ágil. Nesse sentido, o controle on-line é uma solução que além de atender as normas regulamentadoras exigidas para esse tema, há outros ganhos importantes, como o cuidado dos equipamentos que estão sendo utilizados pelos colaboradores, o respeito quanto a validade de cada equipamento, o momento correto da troca, o descarte correto impactando na gestão ambiental, e a própria segurança dos usuários.

Por fim, a automatização utilizada fará parte do dia a dia do IEE/USP e não envolverá custos adicionais como licenças e mão de obra externa para a implementação e execução do programa de gestão de controle de EPI's.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Disponível em: <http://www.abnt.org.br>. Acesso em: 20 set. 2022.

ATTIE, W. Auditoria: conceitos e aplicações. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1998.

Casa do EPI – Disponível em: <https://casadoepi.com.br/2022/02/controle-de-estoque-de-epis/>. Acesso em 26 out. 2022.

CAUCHICK MIGUEL, P.A.C., et al. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

CENTURIAO, Tiago Carrard. Melhorias técnicas aplicadas à segurança do trabalho: Case do Laboratório do IPH/UFRGS. Rio Grande do Sul: 2016.

CREPALDI, S. A. Contabilidade gerencial: teoria e prática. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2004.

CRUZ, S. M. S. Gestão de segurança e saúde ocupacional nas empresas de construção civil. Santa Catarina, 1998. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.

CUNHA, Marco Aurélio Pereira da. Análise do uso de EPI's e EPC's em obras verticais. Tese (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2006.

LAUDON, Kenneth C.; LAUDON, Jane P. Sistemas de informação gerenciais: administrando a empresa digital. 5.ª edição. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

Ministério do Trabalho e Previdência – NR 06 - Equipamento de proteção individual – EPI –

Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-06.pdf>. Acesso em: 03 out. 2022.

O'BRIEN, J. A. Sistemas de informações e as decisões gerenciais na era da Internet. 9.ª edição. São Paulo: Saraiva, 2001.

OLIVEIRA, L. M. de. Curso básico de auditoria. São Paulo: Atlas, 2001.

PAOLESCHI, Bruno. Almoxarifado e gestão de estoque. 3.ed. São Paulo: Erica, 2019

PEREIRA, A. N. Controles internos empresariais e gestão: visões e importância – uma abordagem exploratória. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2004. (Coleção Contabilidade Vista e Ver).

PRESSMAN, Roger S. Engenharia de Software: uma abordagem profissional. 7ª edição. Porto Alegre: AMGH Editora, 2011.

SILVA, André Luís Cabral da et al. A segurança do trabalho como uma ferramenta para a melhoria da qualidade. Rio Grande do Sul: 2011.

THIESEN, Márcio Víctor Souza. A responsabilidade do empregador na ausência de fiscalização de EPI's de diminuição de insalubridade. Santa Catarina: 2022.



XI IEEE ESW-Brasil 2023

A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

[Intertravamento Kirk para manobras manuais seguras em subestações]

[Eng. Vivaldo Mendes de Souza]
[Ciclo Treinamento e Consultoria]
[vivaldoms@gmail.com]

[Eng. Allan de Souza Fernandes da Silva]
[AF Eletrotécnica Pericia e Consultoria Elétrica]
[contato@afeletrotecnica.com.br]

RESUMO

Informar da importância de se ter intertravamento mecânico em subestação para as manobras manuais serem seguras, esclarecendo as diferenças entre “intertravamento mecânico” de “bloqueio mecânico”.

1- INTRODUÇÃO

Na área de eletrotécnica e especificamente em subestações elétricas muitas literaturas e textos técnicos mencionam o termo Intertravamento Mecânico e/ou simplesmente Intertravamento, mas no Brasil a interpretação correta do significado do termo não é bem compreendida pela grande maioria dos profissionais da área, e nesse artigo tem-se como objetivo fazer esclarecimentos básicos sobre **Intertravamentos Mecânicos na área elétrica**, sem com isso esgotar o tema que é extenso.



Exemplo de Bloqueio Mecânico confundido por Intertravamento Mecânico em subestação, pois a chave do bloqueio do Disjuntor não tem relação com a Chave do bloqueio da seccionadora

Muitas subestações elétricas usam módulos de Intertravamentos Mecânicos somente como módulos de Bloqueios Mecânicos e vários profissionais da área acham com isso que se tem Intertravamentos Mecânicos, mas para se ter Intertravamentos Mecânicos tem que se ter interrelacionamento entre fechaduras e suas respectivas Chaves dos módulos de bloqueios de cada circuito ou equipamento.

Como exemplo temos subestações com Chaves Seccionadoras de Alta tensão em série com Disjuntores de Alta tensão, onde somente se poderia abrir a Chave Seccionadora com o Disjunto desligado. Nesse exemplo teríamos que desligar primeiramente o Disjuntor e em seguida trava-lo em aberto (LO) liberando a Chave do cilindro da fechadura do módulo de bloqueio do Disjuntor e depois com essa Chave solta, devemos leva-la para o módulo de bloqueio da Chave Seccionadora para destrava-la em fechado (LC) e em seguida abri-la sem carga, para evitar abertura de arco elétrico, e com essa sequência lógica operativa teremos verdadeiramente um Intertravamento Mecânico.

Quando se desbloqueia em fechado a Chave Seccionadora abrindo-a independentemente de o Disjuntor estar ligado ou desligado, teremos nesse caso um Bloqueio Mecânico e não um Intertravamento Mecânico, e com isso abre-se arco elétrico perigosíssimo pelo fato da Chave Seccionadora ter sido aberta com carga, correndo-se o risco de haver um gravíssimo acidente de operação.

Podemos afirmar com isso que “todo Intertravamento Mecânico tem Bloqueio Mecânico, mas nem todo Bloqueio Mecânico é um Intertravamento Mecânico”.

2- INTERTRAVAMENTO MECÂNICO

Os Intertravamentos Mecânicos utilizam blocos com fechaduras e suas respectivas Chaves (módulos de bloqueio) para o controle sequencial operativo de circuitos e equipamentos/máquinas garantindo com isso operações seguras e sem erros nas manobras manuais, mesmo em subestações e equipamentos automatizados que tem intertravamentos elétricos, onde sempre terão algumas operações manuais que não farão parte da automação.

Os Intertravamentos Mecânicos com seus ferrolhos ou travas e suas respectivas Chaves com segredo são amplamente utilizados para garantir operações e/ou acessos seguros em subestações, plantas ou equipamentos perigosos em ambientes industriais.

Somente uma filosofia de intertravamento é que possibilita uma sequência lógica de operações seguras em manobras manuais que é realizado através de transferências sequenciais de Chaves dos módulos de bloqueio que, ou são retidas ou liberadas em uma ordem operativa pré-determinada e que não podem ser alteradas essas sequências, seja por equívoco, por erro ou por burla proposital.

Outro exemplo de intertravamento de equipamentos e portas de acesso com Chave Seccionadora é utilizada para isolar uma fonte de energia, e com a Chave Seccionadora aberta a Chave do tambor da fechadura do módulo de bloqueio é liberada e pode então ser utilizada para se ter acesso através de uma porta ou portas para uma área de alto risco, inserindo-a no tambor de fechadura do módulo de bloqueio de acesso de porta.

A Chave, então, permanece retida até o portão ou a porta voltar a ser fechada. Uma Chave pessoal ou de segurança pode ser liberada do módulo de bloqueio a partir do bloqueio de acesso, o que garante que o portão ou a porta não pode ser fechada e a Chave inicial liberado até esta Chave pessoal ou de segurança seja retornada ao módulo de bloqueio de porta. Isso proporciona maior segurança do operador.

3- INTERTRAVAMENTO SEGUNDO A NORMA NFPA-85A

Intertravamento é definido pela NFPA-85A como sendo um dispositivo ou grupo de dispositivos empregados para sentir condições limites, ou seqüência imprópria de eventos e para desligar os equipamentos relativos, ou impedir o prosseguimento de uma seqüência inadequada de eventos, de forma a evitar uma condição perigosa.

A finalidade do Intertravamento Mecânico por meio de bloco com fechadura, ferrolho e cilindro é impedir a operação fora de sequência de qualquer Chave Seccionadora, Disjuntor ou

equipamento, ou abertura indevida de porta de sala ou equipamento.

4- INTERTRAVAMENTO SEGUNDO A NORMA NBR 14.039

A norma da ABNT a NBR 14.039 (Instalações elétricas de média tensão de 1,0kV à 36,2kV) no seu item **5.9** (Proteção contra perigos resultantes de faltas por arco) define que “*Os dispositivos e equipamentos que podem gerar arcos durante a sua operação devem ser selecionados e instalados de forma a garantir a segurança das pessoas que trabalham nas instalações*” e continua a definição com a frase “*A seguir são relacionadas algumas medidas para garantir a proteção das pessoas contra os perigos resultantes de faltas por arco*”, e no **sub-item A** (utilização de um ou mais dos seguintes meios) menciona a frase “*Sistemas de intertravamento*”.

No **item 9.5** (Subestação de controle e manobra) tem o **sub-item 9.5.1** (As subestações de controle e manobra são instalações destinadas a controlar qualquer das grandezas da energia elétrica, ligar ou desligar circuitos elétricos ou, ainda, prover meios de proteção para esses circuitos) e tem o **sub-item 9.5.4** (Não é permitido o emprego exclusivo de intertravamento elétrico em aparelhos contíguos, onde possíveis falhas daquele ocasionem danos a pessoas ou coisas. Quando, no caso de aparelhos não contíguos, o Intertravamento Mecânico não for possível, a execução do intertravamento elétrico deve ser complementada com outra medida redundante).

5- HISTÓRIA DO INTERTRAVAMENTO MECÂNICO

Os Intertravamentos Mecânicos com travas e ferrolhos em Módulos de bloqueios com Chave em tambor de Fechadura foram inicialmente usados na década de 1890, no sistema ferroviário francês para controlar as operações de comutação de pista.

Tanto o americano **RL Kirk** como o inglês **James Harry Castell** desenvolveram nesta década sistemas de **Intertravamentos Mecânicos** com módulos de bloqueio com Chaves nos tambores de Fechaduras contendo Chaves e segredos especiais, e atualmente tais sistemas são muitas vezes referidos como “*Sistemas de intertravamentos e bloqueios*”. Tanto o americano como o inglês trabalharam na geração e distribuição das concessionárias de energia elétrica para indústrias no início do século 20, e ambos foram pioneiros no uso de sistemas de Intertravamentos e Bloqueios Mecânicos com Chaves com segredo para o controle de operação e manobras de subestações e usinas geradoras.

Os Intertravamentos e Bloqueios Mecânicos com travas de Chaves com segredos podem ser encontrados em muitos ambientes industriais, incluindo empresas de energia elétrica, empresas de transporte ferroviário, empresas de petróleo e fábricas de produtos químicos como uma resposta à legislação de segurança e saúde ocupacional.

6- ORIGEM DO TERMO KIRK USADO NOS INTERTRAVAMENTOS MECÂNICOS

Muito se tem discutido sobre a origem do termo Kirk usado nos Intertravamentos Mecânicos e através de vasta pesquisa acredito que o termo usado no mercado venha por causa do nome da empresa americana Kirk Key Interlock Company Ltd que foi uma das empresas pioneiras no uso de intertravamentos além de ser a maior empresa do ramo de Intertravamentos Mecânicos no mundo.

O termo "Kirk" passou a definir Intertravamentos Mecânicos e é comumente utilizado o termo Intertravamento Mecânico Kirk, mas como é um fabricante o correto seria usar o termo Intertravamento Mecânico, mas é difícil mudar a linguagem popular, pois todos sabem o quanto é difícil mudar o termo tirar cópia e não tirar Xerox, outros termos como Gillete, Coca Cola, etc, onde o nome de fabricante virou nome de produto.

7- DISPOSITIVOS DE BLOQUEIO NOS INTERTRAVAMENTOS MECÂNICOS

Um dispositivo de bloqueio típico contém módulo com chave com bloqueio tipo trava em aberto denominados de LO (Lock Open), bloqueio tipo trava em fechado denominado de LC (Lock Closed), e bloqueio tipo trava em aberto e trava em fechado denominado de LOC (Lock Open and Lock Closed).

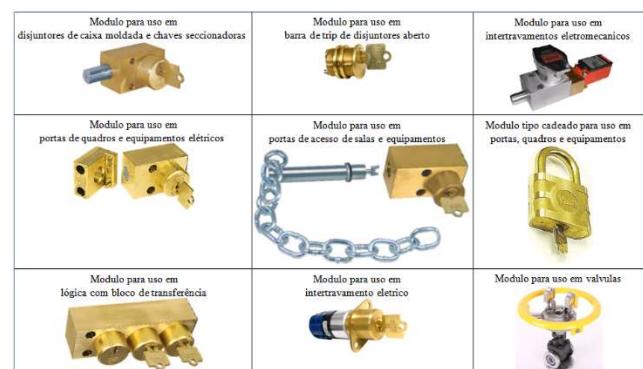
Nos módulos de bloqueio tipo LO e LC as Chaves retidas nos tambores de Fechaduras com os cilindros recolhidos são denominados de tipo E e consiste em um cilindro da fechadura, que opera um ferrolho deslizando através de um came. Também se tem as Chaves retidas nos tambores de Fechaduras com os cilindros estendido denominados tipo W. Os conjuntos de Chaves nos tambores de Fechadura estão contidos numa caixa denominada de Módulo de Bloqueio, que é feito em diferentes formatos para acomodar aplicações as mais diversas.

Algumas sequências complexas usam módulos de transferência de várias Chaves nos tambores de Fechaduras dos módulos de transferência, que permitem sequências complexas de operação.

Um módulo de transferência de Chaves nos tambores de Fechaduras só podem reter e liberar Chaves e não tem ferrolho para bloquear equipamentos e circuitos, podem ser parte sequencial de lógica sequencial operativa de intertravamentos de circuitos ou equipamentos.

O ferrolho deslizante quando estendido, pode impedir mecanicamente o funcionamento ou o fechamento de Chaves Seccionadoras, fechamento de Disjuntores, fechamento de válvula, fechamento de porta, ou outros dispositivos.

Existem muitas variações de módulos de bloqueios, com diferentes tamanhos e formas de ferrolhos e blocos.



Módulos de Bloqueios Mecânicos usados nos Intertravamentos Mecânicos em subestações e equipamentos



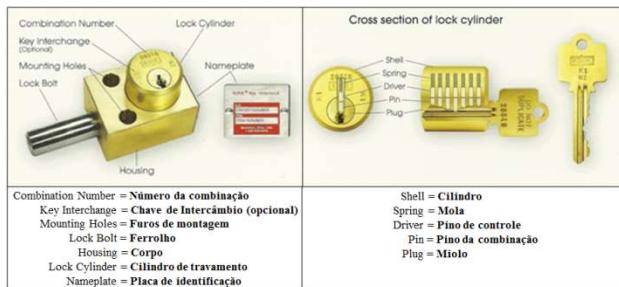
Tipos de Chaves de acionamentos dos Módulos de Bloqueios Mecânicos usados nos Intertravamentos

Dispositivos de bloqueio podem ter solenóides elétricas com Chaves de Fechadura dependentes de que um circuito elétrico seja interrompido; por exemplo, se o fornecimento de energia para um cubículo de alta tensão for desenergizado, haverá a liberação de Chave no tambor de Fechadura para ser usada para permitir o desbloqueio do bloco de acesso ao interior do cubículo.

Alguns bloqueios incluem uma função de atraso de tempo ou um detector de rotação para assegurar que uma máquina teve tempo para acontecer a parada total antes de permitir que o próximo passo de uma sequência de intertravamento para prosseguir.

Os fabricantes de dispositivos de bloqueio com Chaves nos tambores de Fechaduras fornecem guias de aplicações, mostrando soluções básicas de bloqueios típicos e modalidades recomendadas para cada caso.

Uma vez que a confiabilidade e segurança do sistema de Intertravamento Mecânico depende principalmente das Chaves de Fechaduras, as duplicações das Chaves devem ser rigorosamente controladas para evitar qualquer possibilidade de cópias irregulares que afetem as lógicas sequências de operações seguras. Por exemplo, uma Chave perdida ou danificada pode ser substituída oficialmente apenas por uma duplicada feita pelo fabricante original do módulo de intertravamento, realizada estritamente como substituição.



Chave com segredos longitudinais e 7 pinos
dificultando a confecção de cópia
em chaveiros normais

7- A DIFERENÇA ENTRE INTERTRAVAMENTOS MECÂNICOS E BLOQUEIOS MECÂNICOS

Os Intertravamentos Mecânicos são usados nos circuitos e equipamentos para assegurar uma operação com sequencia operativa segura e é muito importância para a área de operação.

Já os Bloqueios Mecânicos são usados nos equipamentos e circuitos para assegurar o estado de desenergização de circuitos e equipamentos segundo a NR-10 (item 10.5.1.b - impedimento de reenergização), baseado na filosofia LOTO (Lock-Out and Tag-Out - bloqueado e identificado) da OSHA e é muito importante para a área de manutenção. Intertravamentos Mecânicos e Bloqueios Mecânicos tem finalidades e filosofias diferentes e uma não elimina a necessidade e a aplicação da outra.

8- INTERTRAVAMENTO DE ACESSO PERIGOSO

Os princípios da tecnologia de Chaves retida aplica-se a todas as indústrias onde é essencial que as fontes de energia sejam isoladas antes de se ter acesso aos circuitos e às máquinas.

A sequência que se segue pode ser utilizada na criação de um sistema de Intertravamento Mecânico correto:

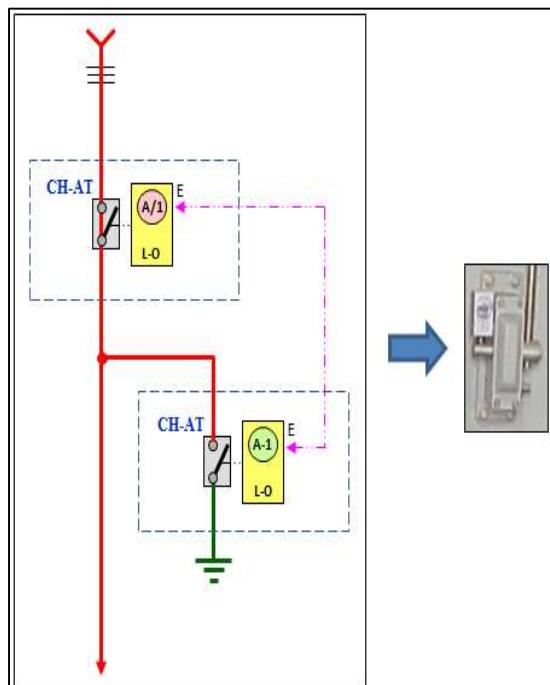
- Identificar as fontes de energia para ser isolados ou qualquer risco que não pode ser imediatamente isolado, tais como; tempo de calor, pressão, radiação ou resumo máquina,
- Identificar o tipo e número de pontos de acesso,
- Identificar o tipo de ponto de acesso; parte do corpo ou portas de acesso de corpo inteiro, com ou sem o uso de Chave de segurança pessoal (para evitar fechamento acidental).

Como exemplo, para impedir o acesso ao interior de um forno elétrico durante o funcionamento, um sistema de Intertravamento Mecânico com micro-switch pode ser usado para fazer Intertravamento Mecânico com a porta do forno e intertravamento elétrico com o comando elétrico do seccionador motorizado. Sempre que o seccionador de alimentação elétrica do forno estiver fechado, a Chave é retida pelo Bloqueio Mecânico, e não pode ser removida do tambor da fechadura do módulo de bloqueio.

A fim de abrir a porta do forno, o seccionador deve primeiramente ser aberto, o que libera a Chave permitindo que seja removida do módulo de bloqueio. Com isso a Chave pode ser usada para abrir a porta do forno. Enquanto a Chave estiver removida do módulo de bloqueio o micro-switch impede que o comando elétrico do seccionador motorizado funcione. A alimentação elétrica não pode ser usada no forno até que a porta do forno seja fechada, liberando a Chave que retornando para o módulo de bloqueio do seccionador desbloqueia a mesma.

9- EXEMPLO DE INTERTRAVAMENTO MECÂNICO DE SECCIONADORA DE LINHA COM SECCIONADORA DE ATERRAMENTO

Para que a Chave Seccionaladora de aterramento possa ser fechada aterrando a linha do ramal de alimentação elétrico, a Chave Seccionaladora de linha tem que ser aberta e travada em aberta (LO) e com isso libera a Chave, que depois de removida do modulo de bloqueio é usada no modulo de bloqueio da Chave Seccionaladora de aterramento, destravando-a da posição de aberta (LO) e permitindo que a mesma seja fechada, aterrando a linha desenergizada, e com isso nunca se aterrará a linha energizada.

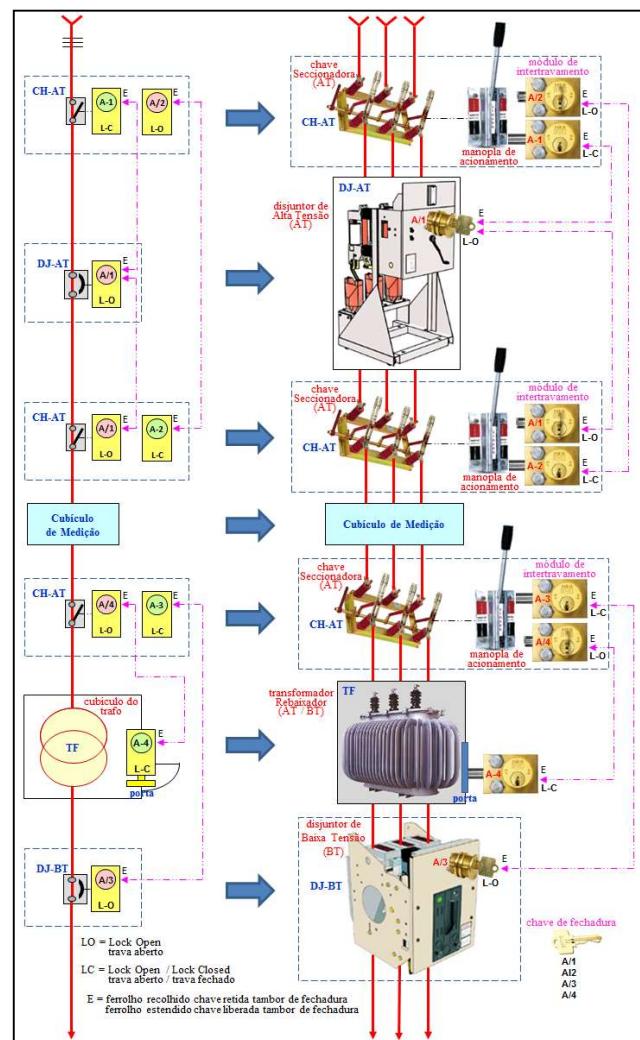


Exemplo de a Chave Seccionaladora de linha e a Chave Seccionaladora de aterramento

10- EXEMPLO DE INTERTRAVAMENTO MECÂNICO EM SUBESTAÇÃO ELÉTRICA

Desenho unifilar com uma subestação típica contendo uma entrada de Alta Tensão (AT) com duas Chaves Seccionaladoras de AT intertravadas com um Disjuntor de AT que alimenta um cubículo de medição. Logo após uma Chave Seccionaladora de AT alimentando um transformador rebaixador com um Disjuntor de baixa tensão (BT) intertravado a Chave Seccionaladora de AT.

Com isso nunca haverá erros na sequencia operativa.



11- LEGISLAÇÕES E NORMAS TÉCNICAS DE SOBRE INTERTRAVAMENTOS E SEGURANÇA DA MÁQUINA

Várias normas técnicas e legislações mencionam intertravamentos sem detalhar como funcionam os Intertravamentos Mecânicos e as únicas normas que se aprofundam sobre Intertravamentos Mecânicos são as normas da Petrobras.

Abaixo algumas normas que mencionam em seus textos Intertravamentos Mecânicos.

- Normas Petrobras:

- N-324 - Intertravamento Eletro-Mecânico do Tipo "Kirk" para Unidade Desligadora Primária.
- N-325 - Intertravamento Eletro-Mecânico para Chave Desligadora Primária com Dispositivo para Aterramento do Cabo Alimentador.
- N-331 - Intertravamento Mecânico Tipo "Kirk" para Subestação com Primário Seletivo.
- N-334 - Intertravamento Mecânico Tipo "Kirk" para Unidade Desligadora Primária.

- Normas Regulamentadoras do Ministério do Trabalho e Emprego - MTE:

- NR-10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade
- NR-12 - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos

- Normas Técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT:

- NBR 13.929 - Segurança de máquinas - Dispositivos de intertravamento associados a proteções - Princípios para projeto e seleção.
- NBR 14.039 - Instalações elétricas de média tensão de 1,0kV à 36,2kV

12- Conclusão e FINALIZAÇÃO

Nos meus 55 anos atuando na área elétrica observo uma carência de informações sobre Intertravamentos Mecânicos e esperando que novos textos sobre esse tema sejam escritos e divulgados no país, pois literaturas sobre Intertravamentos Mecânicos em subestações e equipamentos não são muito difundidas e divulgadas pelas empresas da área, não contribuindo com o aculturamento do pessoal da área elétrica e também da área de segurança do trabalho.

Nas minhas consultorias para nas empresas em que atuo nos levantamentos de unifilares que faço para os Prontuários de Instalações Elétricas (PIE) e também nos treinamentos e cursos que ministro como nos

cursos de NR-10 Básico e NR-10 Complementar, observo nos clientes e treinados, o equívoco e a confusão entre Intertravamentos Mecânicos e Bloqueios Mecânicos nas subestações. Até uma próxima divulgação de texto.

Viajei vários anos dando consultoria de intertravamento Kirk na américa latina e observei que em países onde se tem muita influencia americana como Peru, Chile e Colombia, o conhecimento de intertravamento Kirk e bloqueio mecânico LOTO é muito mais aprofundado, e espero que no Brasil se tenha uma nova visão sobre esse tema.

13- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Manual de esquemas da Kirk Key Interlock Company "Kirk Key Scheme Book". <https://www.kirkkey.com/>



2023 IEEE ESW BRAZIL

ELECTRICAL SAFETY WORKSHOP BRAZIL (ESW BRAZIL)

17 A 19 DE OUTUBRO DE 2023 – São Paulo - SP – BRASIL



XII ESW
BRASIL 2025