

Avaliação da Energia Incidente de Arcos Elétricos para Diferentes Configurações de Eletrodos

1st Pedro de Oliveira Bacin
Instituto de Redes Inteligentes
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
pedro.bacin@acad.ufsm.br

2nd Vitor Cristiano Bender
Instituto de Redes Inteligentes
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
vitor.bender@ufsm.br

3rd Tiago Bandeira Marchesan
Instituto de Redes Inteligentes
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
tiago@ufsm.br

4th Rafael Concatto Beltrame
Instituto de Redes Inteligentes
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
beltrame@gepoc.ufsm.br

5th Daniel Pinnheiro Bernardon
Instituto de Redes Inteligentes
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
dpbernardon@ufsm.br

6th Gilnei José Gama dos Santos
Instituto de Redes Inteligentes
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
gilnei.santos@cpfl.com.br

Resumo — Este trabalho investiga os efeitos da composição dos eletrodos na energia incidente (EI) em eventos de arcos elétricos. Embora o guia IEEE *Std* 1584-2018 considere o impacto da composição eletrodos na EI insignificantes, no que se refere ao cobre e ao alumínio, ensaios experimentais com esses materiais sugerem diferenças significativas entre a EI medida e a calculada, especialmente em níveis de energia elevados. Os resultados indicam que a composição dos eletrodos pode ter um efeito mais significativo na EI do que previamente suposto. Enquanto os resultados com eletrodos de cobre mostram consistência com as previsões do guia IEEE *Std* 1584-2018, os de alumínio apresentam desvios notáveis. Dessa forma, este estudo destaca a importância de esclarecer as razões para considerar os materiais dos eletrodos irrelevantes nas normas de segurança elétrica e ressalta a necessidade de mais estudos experimentais para validar e melhorar os modelos preditivos.

Keywords — arco elétrico, composição de eletrodos, energia incidente, IEEE *Std* 1584-2018, perigos térmicos.

I. INTRODUÇÃO

Devido à grande quantidade de energia liberada em um curto espaço de tempo, os arcos elétricos configuram um dos principais riscos no setor elétrico, principalmente pelo seu risco térmico associado, denominado energia incidente (EI) [1]. A EI é definida como a quantidade de energia térmica impressa em uma superfície a uma dada distância da fonte, normalmente expressa em cal/cm² [2]. Este parâmetro desempenha um papel importante no dimensionamento adequado dos equipamentos de proteção individual (EPIs) destinados aos trabalhadores que possam ser expostos a essa classe de risco [3].

A principal abordagem existente para a estimação da EI dos arcos elétricos é o guia IEEE *Std* 1584-2018, onde através de uma metodologia elaborada empiricamente, é possível estimar a EI de arcos elétricos cuja a origem seja curtos-circuitos trifásicos, para tensões entre 208 V e 15 kV, dentre outras especificidades [4]. Para a aplicação da metodologia do guia IEEE *Std* 1584-2018, é necessária a delimitação de diversos parâmetros de entrada, como: tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto-circuito trifásico franco (I_{bf}), tempo de duração de arco elétrico (t_{arco}), configuração e espaçamento entre eletrodos (gap), e distância de trabalho [5].

Nesse contexto, apesar da determinação da EI proveniente dos arcos elétricos ser considerado um tema complexo,

diversos estudos com caráter experimental já foram realizados para corroborar, contribuir ou discutir a influência de alguns dos parâmetros de entrada considerados no guia IEEE *Std* 1584. Por exemplo, em [6] são explorados os métodos disponíveis para avaliar a gravidade de arcos elétricos no lado primário dos sistemas de distribuição e com V_{oc} mais elevada, tanto em equipamentos quanto em ambiente aberto, sugerindo a necessidade de usar espaçamentos entre eletrodos maiores dos que os limites considerados no guia IEEE *Std* 1584 para estimação da EI. Já em [7], são discutidos os efeitos da disposição, orientação e do enclausuramento dos eletrodos em que o arco elétrico é originado e sua respectiva EI e a distância segura de aproximação (AFB). O trabalho conclui que a metodologia de cálculo do guia IEEE *Std* 1584-2018 pode não ser adequadamente conservadora para as diferentes condições de geometria de eletrodos verticais.

Apesar disso, o guia tende a negligenciar certas considerações, como a influência dos diferentes materiais de composição dos eletrodos nos quais os arcos elétricos se originam, presumindo que tenham pouco ou nenhum efeito na corrente do arco e na EI [4], o que resulta em pouca exploração experimental sobre o assunto. Softwares comerciais como ArcProTM 4 e o ETAP[®] possibilitam a inclusão de diferentes materiais de eletrodos, como cobre ou alumínio, em seus modelos de cálculo de arco elétrico. No entanto, as discrepâncias nos resultados obtidos entre esses softwares são mínimas e não há transparência sobre como eles incorporam essas variações [8], [9].

Embora o guia IEEE *Std* 1584 considere eletrodos de barras maciças de cobre com diâmetro de 19 mm, uma escolha comum em aplicações enclausuradas, como cubículos, tais eletrodos são pouco representativos nas redes aéreas, onde se utilizam majoritariamente cabos de cobre e de alumínio para transmissão e distribuição de eletricidade [4], [10]. Especialmente quanto ao alumínio, pesquisas sobre o comportamento dos arcos elétricos e sua respectiva EI provenientes de curtos-circuitos neste material são importantes, especialmente considerando o cenário do setor elétrico brasileiro, devido sua ampla e crescente utilização nas redes aéreas de transmissão e distribuição, tanto em forma de condutores nus quanto protegidos [11].

Além das considerações previamente discutidas, é válido destacar as diferenças nas propriedades de resistência elétrica, ponto de fusão e ponto de ebulição entre os dois materiais. Para o cobre, esses valores são aproximadamente 0,0167 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, 1356,15 K e 2868,15 K, respectivamente, enquanto para o alumínio, eles são aproximadamente 0,0265 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, 933,15 K e 2723,15 K, respectivamente [12]. Essas características distintas podem influenciar a dinâmica dos arcos elétricos, incluindo aspectos como corrente de arco, sustentação, projeção de rejeitos, entre outras questões, e potencialmente pode refletir na EI resultante [13].

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo realizar comparações e avaliações dos resultados obtidos experimentalmente em laboratório por meio de ensaios de arcos elétricos e medições da EI utilizando diferentes tipos de eletrodos, como barras de cobre e cabos de cobre e de alumínio. Com esse propósito, a Seção II detalha a metodologia empregada nos ensaios laboratoriais e os cenários avaliados. Já a Seção III apresenta e discute os resultados obtidos, acompanhados de considerações sobre suas implicações. Na seção IV, são apresentadas as conclusões do estudo, bem como possíveis direções para futuras investigações.

II. METODOLOGIA

A presente seção descreve a metodologia utilizada para conduzir os ensaios de arcos elétricos e medir a EI considerando diferentes tipos de eletrodos. Inicialmente, apresenta-se a estrutura laboratorial empregada, detalhando os equipamentos e procedimentos utilizados durante os experimentos. Em seguida, são explicados o arranjo experimental e os elementos considerados durante os testes, incluindo o detalhamento da composição dos diferentes tipos de eletrodos. Por fim, são discutidos os casos considerados para avaliação dos arcos elétricos, abordando aspectos relacionados aos parâmetros de entrada dos ensaios e materiais dos eletrodos, para posterior discussão dos resultados.

A. Estrutura laboratorial

A infraestrutura laboratorial foi projetada para realizar diversos ensaios conforme especificado no guia IEEE *Std* 1584-2018, abrangendo a geração de curtos-circuitos trifásicos com correntes de arco variando entre 1 e 20 kA, operando a uma tensão de circuito aberto de 1,1 kV. A configuração do laboratório, ilustrada na Fig. 1, compreende três seções distintas: o ramal de entrada de energia, a sala de máquinas (operando como uma subestação de energia elétrica) e a câmara de ensaios. As zonas de média tensão (MT) e baixa tensão (BT) são identificadas nos lados primário e secundário do transformador, respectivamente [14].

A estrutura laboratorial, conforme detalhada na Fig. 1, envolve uma série de equipamentos essenciais para a ignição segura de curtos-circuitos de alta corrente capazes de originar

arcos elétricos na câmara de ensaios. Entre esses equipamentos, destacam-se três reatores monofásicos e um transformador trifásico de 5 MVA. Os reatores monofásicos permitem o controle preciso das correntes de curto-circuito por meio de 12 *taps* de interligação, enquanto o transformador trifásico realiza o rebaixamento da tensão de 13,8 kV para 1,1 kV, possibilitando a obtenção de altos valores de corrente de curto-circuito. Adicionalmente, os disjuntores, em conjunto com os relés de proteção, são responsáveis pela extinção do arco elétrico e pela proteção de retaguarda. O acionamento, aquisição de dados e gravação do ensaio são realizados remotamente em uma sala de controle externa.

A medição da EI segue as diretrizes estabelecidas pelo guia IEEE *Std* 1584-2018. Para isso, são empregados calorímetros padronizados conforme a norma ASTM F1959/1959M, a qual também estabelece o modelo matemático para estimar a EI com base na variação da temperatura registrada nos calorímetros [15]. Esses dispositivos são compostos principalmente por um disco de cobre, responsável pela condução térmica, envolto por um isolante térmico, como o Marinite[®]. A medição da EI é realizada ao registrar a temperatura inicial e final nos discos de cobre, antes e após a ocorrência do arco elétrico, respectivamente.

A IEEE *Std* 1584-2018 recomenda o uso de sete calorímetros para a medição da EI, com três posicionados perpendicularmente à ponta dos eletrodos, três abaixo e um acima, emulando as regiões do corpo humano. Quanto à distribuição espacial desses calorímetros, os espaçamentos verticais entre eles são de 152,4 mm em relação aos calorímetros centrais, representando a cabeça, o peito e o tórax, conforme ilustrado na Fig. 2 (a) [4]. Não há recomendações específicas para os espaçamentos horizontais internos entre os calorímetros, mas o espaçamento horizontal de 152,4 mm entre cada calorímetro é uma escolha comum, considerando a estrutura do torso humano. A determinação da EI é baseada na medição do calorímetro que apresenta a maior elevação de temperatura.

No que diz respeito ao sensoramento da elevação de temperatura dos calorímetros, nos principais guias e normas utilizam-se termopares tipo K junto aos calorímetros. Entretanto, na presente aplicação, optou-se pela utilização de uma câmera termográfica FLIR modelo A6753sc MWIR. A escolha da termografia, integrada à medição da EI, foi feita com o intuito de contribuir com a literatura e aprimorar os métodos convencionais de medição de temperatura nos calorímetros. Essa integração visa reduzir os efeitos da interferência eletromagnética, assim como o ruído de leitura dos termopares [16]. A Fig. 2 (b) demonstra a estrutura de

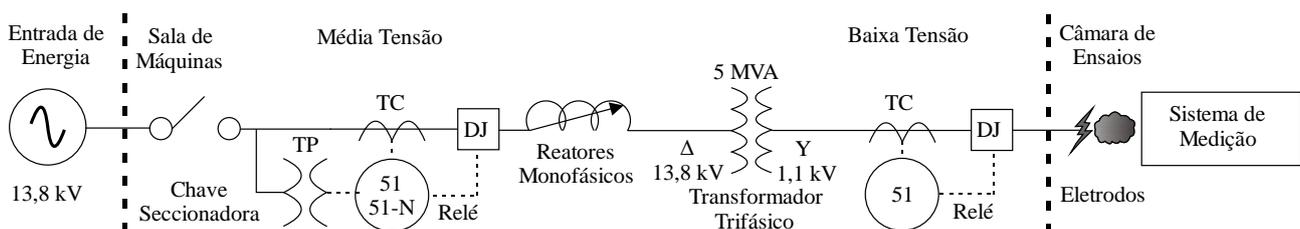


Fig. 1 Diagrama unifilar do laboratório de arcos elétricos.

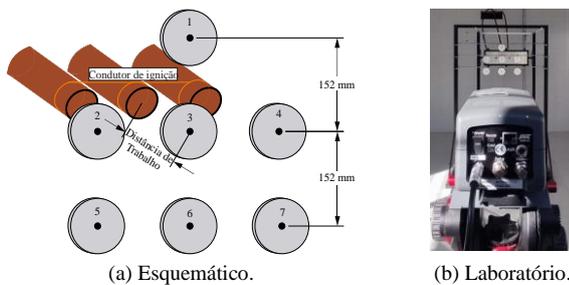


Fig. 2. Arranjo de medição da EI implementado.

medição empregada considerando o posicionamento dos calorímetros e a câmera termográfica de alta velocidade.

B. Arranjo experimental

Os ensaios experimentais com diferentes tipos de eletrodos realizados neste trabalho ocorreram na configuração de três eletrodos horizontais em ambiente aberto (HOA), com um espaçamento de 100 mm entre eles e uma V_{oc} de 1,1 kV. O tempo de arco variou entre 450 e 500 ms, devido à margem de precisão do *pick-up* do relé para o seccionamento do circuito junto ao disjuntor, que também tem um tempo de abertura associado.

No que diz respeito aos eletrodos utilizados para ignição do arco elétrico, embora a IEEE Std 1584-2018 tenha utilizado uma bitola de 3/4" para os ensaios de arcos elétricos, a maioria dos ensaios realizados no laboratório até o momento utilizou barras maciças de cobre com 3/8" (aproximadamente 10 mm de diâmetro). Portanto, optou-se por manter essa bitola para garantir uma comparação justa dos resultados obtidos com esse material. Consequentemente, os eletrodos fabricados com cabos de alumínio e cobre também foram mantidos com a mesma bitola de 3/8". Essas configurações são apresentadas na Fig. 3, onde na Fig. 3 (b) é possível observar também a disposição dos calorímetros utilizados na medição da EI.

Após geração do arco elétrico através do curto-circuito iniciado pelo condutor de ignição representado na Fig. 3 (de cobre para todos os cenários, conforme recomendado pelo guia IEEE Std 1584-2018), são realizados vários registros essenciais, incluindo a medição da temperatura nos calorímetros através da câmera termográfica, o registro da corrente de arco por meio da medição de corrente pelo relé e a gravação do arco elétrico por uma câmera de monitoramento presente no compartimento de ensaios.

C. Casos considerados

Os casos considerados para este estudo são apresentados na Tabela I, onde estão detalhados os parâmetros de entrada que variam durante os ensaios. Destaca-se que, conforme previamente mencionado, a configuração e o espaçamento entre os eletrodos, além da V_{oc} , são iguais em todos os ensaios.

É relevante observar que os valores apresentados na Tabela I para a corrente e o tempo de arco já se referem às medições realizadas em laboratório. A principal variação entre os casos ensaiados, conforme demonstrado na Tabela I, reside na redução da distância de trabalho (ou distância de medição) e no aumento da corrente de arco elétrico, considerando os diferentes materiais utilizados, para obter diferenças significativas nos valores da EI e possibilitar análises relacionadas à variação da mesma em resposta à mudança do material do eletrodo.



(a) Barra de cobre.



(b) Cabos de alumínio.



(c) Cabos de cobre.

Fig. 3. Diferentes tipos de eletrodos testados.

TABELA I. CASOS CONSIDERADOS NOS ENSAIOS.

Caso	Material	I_{arco} (kA)	t_{arco} (ms)	d (mm)
1	Barra de cobre	2,54	483	800
	Barra de cobre	2,54	474	800
	Cabo de alumínio	2,57	473	800
	Cabo de alumínio	2,54	482	800
	Cabo de cobre	2,55	478	800
	Cabo de cobre	2,52	484	800
2	Barra de cobre	3,54	459	500
	Barra de cobre	3,55	463	500
	Cabo de alumínio	3,51	447	500
	Cabo de alumínio	3,57	440	500
	Cabo de cobre	3,55	449	500
	Cabo de cobre	3,55	454	500

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a avaliação dos resultados obtidos, inicialmente é realizada uma análise qualitativa (visual) do comportamento dos arcos elétricos gerados através dos diferentes tipos de eletrodos. Em seguida, é feita uma avaliação quantitativa da EI medida para os casos descritos na Tabela I.

A. Análise qualitativa dos ensaios com diferentes eletrodos

Durante os experimentos, notou-se que o comportamento visual e projeção do arco elétrico foi similar no que se refere à variação dos níveis de corrente para os casos estabelecidos na Tabela I. Assim, a Fig. 4 ilustra o arco elétrico gerado nas condições específicas do caso 2, englobando os ensaios realizados com diferentes tipos de eletrodos. Este caso foi escolhido para representar os resultados, uma vez que a projeção dos arcos para o caso 1 foi semelhante.



(a) Barra de cobre.

(b) Cabo de alumínio



(c) Cabos de cobre.

Fig. 4. Gravação dos ensaios de arcos elétricos com diferentes materiais.

A análise da Fig. 4 revela uma certa diferença no comportamento e na projeção do arco elétrico, assim como na concentração dos gases expelidos, especialmente nos ensaios com cabos de alumínio, em comparação com aqueles realizados utilizando barras ou cabos de cobre, que apresentaram comportamentos semelhantes entre si. No caso dos arcos gerados através de eletrodos de alumínio, é observada uma maior concentração de plasma e gases nas proximidades do epicentro do arco elétrico em comparação com os gerados através de eletrodos de cobre.

Essa diferença de projeção pode ter relação com algumas propriedades físicas e químicas que divergem entre os materiais, como suas temperaturas de fusão, pontos de ebulição e resistividade elétrica, potencialmente influenciando, mesmo que de forma sutil, no comportamento e nas diferenças do arco elétrico gerado a partir desses materiais. A aparente maior concentração de energia no arco elétrico gerado pelos eletrodos de alumínio pode representar um risco adicional em ambientes suscetíveis a esse fenômeno, especialmente devido à possíveis diferenças da EI nas proximidades, como é analisado a seguir.

Quanto à degradação do material, observou-se que nos cabos de alumínio ela foi mais acentuada em comparação com as barras e os cabos de cobre, o que pode ser atribuído à diferença significativa na temperatura de fusão entre esses materiais. Ainda, é possível inferir que a menor resistência térmica do alumínio pode tornar os eletrodos mais suscetíveis a danos durante os ensaios de arco elétrico, levando a uma degradação mais rápida em comparação com os eletrodos de cobre e fazendo com que sejam expelidos mais rejeitos fundidos. Também foi observado um maior lançamento de rejeitos fundidos dos eletrodos nos ensaios realizados em cabos quando comparados aos ensaios realizados através de barras maciças.

B. Avaliação da energia incidente

Para suceder uma análise comparativa da EI medida nos ensaios com diferentes materiais de eletrodos, adotou-se o modelo matemático recomendado pelo guia IEEE Std 1584-2018 para calcular a EI de cada ensaio dos casos contemplados na Tabela I. Apesar do guia considerar não

significativa a influência de materiais semelhantes ao cobre, como o alumínio, optou-se por aplicar o método padrão de medição para garantir a consistência nos resultados [4].

Assim, a estimativa da EI conforme as diretrizes do guia IEEE Std 1584-2018 foi realizada utilizando a planilha fornecida pela IEEE DataPort™ [17]. Os parâmetros de entrada para os ensaios bem como os valores medidos para a corrente e tempo de arco foram inseridos na planilha para estimar a EI, que foi posteriormente comparada com a EI medida através do sistema composto pela câmera termográfica e calorímetros.

Dessa forma, a Tabela II apresenta os resultados obtidos para a EI considerando os ensaios realizados com diferentes tipos de eletrodos. Os valores são organizados de forma a fornecer uma comparação direta entre os resultados obtidos para cada configuração de eletrodo. Já a Fig. 5 foi elaborada para proporcionar uma representação visual desses dados, permitindo uma análise mais intuitiva e uma compreensão aprimorada das variações na EI em relação aos diferentes materiais de eletrodo testados.

TABELA II. VALORES ENCONTRADOS PARA A EI NOS CASOS CONSIDERADOS.

Caso	Material	EI Calculada (cal/cm ²)	EI Medida (cal/cm ²)	Diferença (%)
1	Barra de cobre	2,53	2,75	8,70
	Barra de cobre	2,47	2,7	9,31
	Cabo de alumínio	2,5	2,51	0,40
	Cabo de alumínio	2,52	2,56	1,59
	Cabo de cobre	2,51	2,42	-3,59
	Cabo de cobre	2,51	2,38	-5,18
2	Barra de cobre	7,98	7,93	-0,63
	Barra de cobre	8	8,05	0,63
	Cabo de alumínio	7,64	10,13	32,59
	Cabo de alumínio	7,65	9,79	27,97
	Cabo de cobre	7,77	6,49	-16,47
	Cabo de cobre	7,85	6,57	-16,31

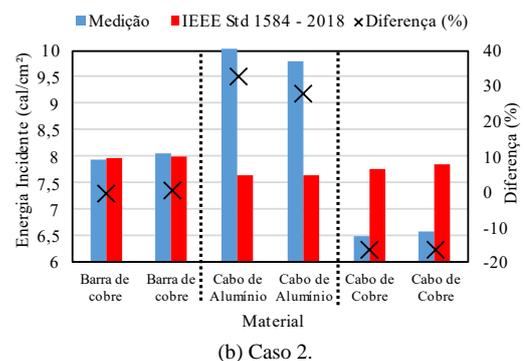
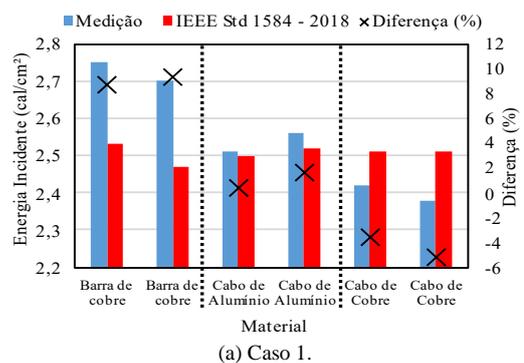


Fig. 5. Resultados obtidos para os diferentes tipos de eletrodos ensaiados.

Através dos resultados demonstrados na Fig. 5 (a) é possível constatar que, para valores menores de EI, as discrepâncias entre a EI medida com diferentes materiais e a calculada são pouco significativas, não chegando a variar 10% para os materiais em qualquer um dos cenários. Desta forma, os resultados indicam consistência entre os valores calculados e medidos para ensaios que tem como característica uma EI de ordem mais baixa.

Entretanto, para ensaios que produziram EI maiores, o cenário muda significativamente, principalmente com relação aos cabos de alumínio. Os ensaios realizados através dos eletrodos de cabos de alumínio forneceram resultados de EI entre 20 e 30% acima dos esperados através dos calculados pelo guia IEEE *Std* 1584-2018. Por outro lado, os ensaios com cabos de cobre exibiram uma tendência oposta, fornecendo resultados de EI de aproximadamente 20% menores do que o esperado no cenário mais extremo. Além disso, é importante destacar que para ensaios realizados com os eletrodos elaborados através de barras de cobre, parecidos com os utilizados pelo guia, os valores medidos da EI foram bastante próximos dos estimados através do modelo matemático.

Dessa forma, constatou-se uma tendência de aumento na EI conforme o material utilizado para iniciar o arco elétrico, notando-se um aumento da EI mais expressivo nos ensaios com cabo de alumínio em comparação com os eletrodos de cobre, evidenciado de forma mais contundente no caso 2 demonstrado na Fig. 5. Essa discrepância sugere que as propriedades distintas do alumínio em relação ao cobre, dentre eles os pontos de fusão e ebulição dos materiais, conforme discutido anteriormente, podem influenciar a natureza do arco elétrico e sua concentração de energia, como também observado na Fig. 4, que ilustra o comportamento diferenciado do arco elétrico gerado pelo alumínio em relação ao cobre. É importante destacar que muitos sistemas de distribuição brasileiros e subestações utilizam o alumínio como condutor principal, o que destaca a importância de mais estudos considerando arcos elétricos gerados através desse material.

IV. CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos neste trabalho, é possível sugerir que o material do eletrodo pode exercer uma influência mais significativa na magnitude da EI, especialmente em condições de alta energia. Essa discrepância entre a EI medida e a calculada pelo guia IEEE *Std* 1584-2018 é mais evidente em cenários de maior EI, levantando questões sobre a precisão das previsões deste guia, particularmente no uso de cabos de alumínio. Por outro lado, em relação aos cabos de cobre, não foram observadas diferenças significativas em comparação com os eletrodos de cobre e os valores calculados pelo guia IEEE *Std* 1584-2018, dentro das condições de ensaio estabelecidas. No entanto, ressalta-se que a validade dessas conclusões pode depender das condições específicas de cada ensaio.

Os resultados apresentados neste trabalho também geram discussões sobre o comportamento dos diferentes materiais utilizados como eletrodos, principalmente o alumínio, diante de arcos elétricos e riscos térmicos, sugerindo que a composição do eletrodo pode ter uma influência mais significativa do que a previamente sugerida pelo guia IEEE *Std* 1584-2018.

Destaca-se que, até o presente momento, um número relativamente baixo de ensaios considerando diferentes materiais de eletrodos foi realizado, o que limita a margem de conclusões. É importante que mais ensaios sejam conduzidos a fim de determinar de forma mais conclusiva se o material dos eletrodos de fato exerce uma influência significativa na EI produzida pelos arcos elétricos. Além disso, existe o planejamento de ser implementado o sistema de medição proposto pelo guia IEEE *Std* 1584-2018, utilizando termopares junto aos calorímetros, para realizar medições com diferentes tipos de eletrodos, empregando exatamente o mesmo sistema utilizado nos ensaios tratados no guia. Tal abordagem tem o potencial de contribuir significativamente para a consistência dos resultados obtidos, fornecendo uma base mais robusta para futuras análises.

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 gostariam de agradecer à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSM (PPGEE-UFSM), ao Instituto de Redes Inteligentes (INRI), ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída de Energia Elétrica (INCT-GD) e aos órgãos financiadores CNPq (processo no. 405054/2022-0), CAPES (processo no. 23038.000776/2017-54) e FAPERGS (processo no. 17/2551-0000517-1) pelo apoio técnico e financeiro na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Prasad, M. Perumalsamy, S. Kapse, and C. K. Barikar, "Extremely Fast Tripping for an Arc-Flash Event : Extremely Fast Tripping for an Arc-Flash Event:," in *46th Annual Western Protective Relay Conference*, 2019, p. 12.
- [2] NFPA, *Standard for Electrical Safety in the Workplace (NFPA 70E) 2024*, 2024th ed. Quincy, United States: National Fire Protection Association, 2024.
- [3] D. Mohla, W. J. Lee, J. Phillips, and A. Marroquin, "Introduction to IEEE Standard 1584: Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations, 2018 Edition," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 26, no. 5, pp. 64–76, 2020, doi: 10.1109/MIAS.2020.2982574.
- [4] IEEE STD 1584, *IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations*. Nova Iorque, EUA: IEEE Press, 2018. Accessed: Jul. 03, 2021. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/standard/1584-2018.html>
- [5] J. C. Das, *Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation*, 2nd ed. Piscataway, NJ, Estados Unidos da América: IEEE Press, 2021. doi: 10.1002/9781118402498.
- [6] T. A. Short, "Arc-flash analysis approaches for medium-voltage distribution," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 4, pp. 1902–1909, 2011, doi: 10.1109/TIA.2011.2153810.
- [7] Z. Zhang, P. Wang, S. H. Rau, and W. J. Lee, "Effect of electrode geometry on arc flash protection boundary," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 1, pp. 57–64, 2020, doi: 10.1109/TIA.2019.2947858.
- [8] Kinectrics, "ArcPro™ 4 Brochure." Toronto, Canadá, p. 5, 2021. Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: https://www.kinectrics.com/files/brochures/ArcPro4Brochure_A_P062921.pdf
- [9] ETAP, "Low & Medium Voltage Arc Flash Analysis." ETAP, Irvine, Canada, p. 2, 2019. Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: https://etap.com/docs/default-source/brochures/factsheets/ieee-1584-2018-arc-flash.pdf?sfvrsn=5fd86b7c_42

- [10] W. Boone and C. Sonderen, "Copper in Comparison With Aluminium as Common Material in Conductors of LV and MV Cables," in *23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED)*, 2015, no. June, p. 5.
- [11] N. Kagan, C. C. B. Oliveira, and E. J. Robba, *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*, 2ª. São Paulo, Brasil: Blucher, 2010.
- [12] J. R. Davis, *Concise Metals Engineering Data Book*. Detroit, Estados Unidos da América: Asm Intl, 1997.
- [13] J. W. Brown, S. P. Nowlen, and F. J. Wyant, "High Energy Arcing Fault Fires in Switchgear Equipment , A Literature Review," U.S. Department of Energy, Albuquerque, 2009.
- [14] P. O. Bacin *et al.*, "Medição Termográfica da Energia Incidente dos arcos Elétricos com Validação através do Guia IEEE Std 1584-2018 e do ArcProTM 4," in *XI IEEE ESW Brasil 2023*, 2023, pp. 1–10.
- [15] ASTM, *ASTM 1959/F1959M: Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing*, vol. i. West Conshohocken, United States, 2014. doi: 10.1520/F1959.
- [16] P. O. Bacin *et al.*, "Contribuição ao Desenvolvimento de um Laboratório de Arco Elétrico Controlado para Medição da Energia Incidente," in *IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 2022, p. 8. doi: <https://doi.org/10.20906/sbse.v2i1.2983>.
- [17] IEEE Standards Association, "Arc Flash and Iarc Calculators" *IEEE Dataport*, 2019. <https://iee-dataport.org/open-access/arc-flash-ie-and-iarc-calculators>