

Definição de Estratégias de Proteção Individual Contra Arcos Elétricos em Redes de Distribuição Aéreas: Um Estudo de Caso

Marina Camponogara*, Pedro O. Bacin*, Daniel P. Bernardon*, Tiago B. Marchesan*, Fernando C. Pepe**, Gilnei J. G. dos Santos** e Lucas M. de Chiara**

*Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, BRASIL (e-mail: marina.camponogara@acad.ufsm.br; pedrooliveirabacin@gmail.com; dpbernardon@ufsm.br; tiago@ufsm.br).

**CPFL Energia, Campinas – SP, BRASIL (e-mail: fernandopepe@cpfl.com.br; gilnei.santos@cpfl.com.br; lucaschiara@cpfl.com.br)

Abstract: The electrical arc is an electrical hazard with the likelihood of occurrence, to a greater or lesser degree, in energized systems, thus becoming an electrical hazard. This phenomenon causes the release of a large amount of energy, and its thermal effects are quite expressive. From the quantification of this energy, individual protection strategies applicable to the worker who will intervene in this type of scenario are chosen. This paper exposes the definition of these strategies for a hypothetical situation of intervention in an overhead distribution grid with the occurrence of an electrical arc caused by a three-phase fault. This choice is made from the incident energy estimation, using the IEEE Std 1584-2018 method and, the use of NFPA 70E-2021 standard to direct the applicable individual protection strategies.

Resumo: O arco elétrico é um perigo elétrico com possibilidade de ocorrência, em maior ou menor grau, em sistemas energizados, convertendo-se assim em um risco elétrico. Esse fenômeno causa a liberação de uma grande quantidade de energia, sendo seus efeitos térmicos bastante expressivos. A partir da quantificação dessa energia, são escolhidas as estratégias de proteção individual aplicáveis ao trabalhador que irá intervir nesse tipo de cenário. O presente trabalho expõe a definição dessas estratégias para uma situação hipotética de intervenção em uma rede de distribuição aérea com a ocorrência de arco elétrico originado por uma falta trifásica. Essa escolha é feita a partir da estimativa de energia incidente, utilizando o método da IEEE Std 1584-2018, e do uso da norma NFPA 70E-2021 para direcionar as estratégias de proteção individual aplicáveis.

Keywords: AR garments; electrical arc; incident energy; IEEE Std 1584-2018; NFPA 70E-2021; PPE;

Palavras-chaves: Arco elétrico; energia incidente; EPI; IEEE Std 1584-2018; NFPA 70E-2021; vestimentas AR;

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a NFPA (2020), o perigo elétrico se caracteriza como uma fonte de possível lesão ou danos à saúde, enquanto o risco elétrico é a combinação entre a possibilidade de ocorrência e a severidade das lesões resultantes desse perigo. Sobre os perigos associados à eletricidade, Laverty (2001) observa que o choque elétrico é mais comum e óbvio, enquanto o arco elétrico está associado à liberação de uma grande quantidade de energia, da qual grande parte é radiante e, portanto, invisível ao olho humano, podendo levar a consequências severas e até mesmo fatais por causar queimaduras de segundo e terceiro graus na pele humana.

Em uma rede energizada, sempre haverá a possibilidade de ocorrência do arco elétrico (Özen et al., 2018), de forma que as atividades diárias de um funcionário do setor de distribuição de energia elétrica podem envolver a exposição ao risco de arco elétrico, em maior ou em menor grau, a depender a atividade desenvolvida (Doughty et al., 2002).

Felizmente, a preocupação relativa à segurança do trabalhador quando da ocorrência de um arco elétrico não é um fenômeno novo, visto que métodos de avaliação, regulamentações e melhorias em benefício da segurança têm sido aprimorados nos últimos 45 anos, conforme apontado por McCann, Johnson e Bobbit (2018).

Nesse sentido, a avaliação de risco elétrico é empregada com o objetivo de determinar estratégias que permitam ao trabalhador realizar suas tarefas de intervenção no caso de arco elétrico com a devida segurança. Um dos principais focos dessa avaliação é determinar, a partir da energia liberada pelo arco elétrico, os equipamentos de proteção individual (EPIs) necessários para proteger o trabalhador contra os efeitos desse tipo de evento (McCann, Johnson e Bobbit, 2018).

No presente trabalho, os autores apresentam a definição dessas estratégias de proteção na ocasião de uma intervenção em uma rede de distribuição aérea com a ocorrência de um arco elétrico originado por uma falta trifásica. Essa definição é feita a partir da estimativa da quantidade de energia

liberada pelo arco elétrico, empregando o método proposto pela IEEE Std 1584-2018 e do uso da norma NFPA 70E-2021 para direcionar a escolha das estratégias de proteção individual aplicáveis.

2. ANÁLISE DE RISCO DE ARCO ELÉTRICO

A NFPA (2020) conceitua que a análise de risco de arco elétrico consiste em um processo no qual são identificados o perigo de arco elétrico associado, estimadas a possibilidade de ocorrência e a severidade de lesões ou outros danos à saúde decorrentes desse perigo e se determina a necessidade de aplicação de medidas de proteção.

Nessa análise, a severidade pode ser avaliada a partir da estimativa dos níveis de energia térmica liberada pelo arco elétrico. Essa energia, quando incidida sobre uma superfície, é denominada energia incidente e sua estimativa é a base da definição das estratégias de proteção individuais aplicáveis ao trabalhador que realiza intervenções em sistemas elétricos em que há a possibilidade de ocorrência de arcos elétricos.

2.1 Estimativa dos níveis de energia incidente

A estimativa de energia incidente pode ser feita com base em diversos métodos apresentados na literatura, sendo os mais notórios as metodologias propostas por Lee (1982), por Doughty, Neal e Floyd (1998) e por IEEE (2018). Dada a maior aplicabilidade deste último, o presente trabalho faz uso do método da IEEE Std 1584-2018 para estimar o nível de energia incidente no ponto de interesse.

A modelagem matemática do método escolhido está detalhada em IEEE (2018) e, portanto, não será apresentada nesse artigo. No entanto, para fins de compreensão sobre a estrutura do método empregado, um fluxograma é apresentado na Figura 1.

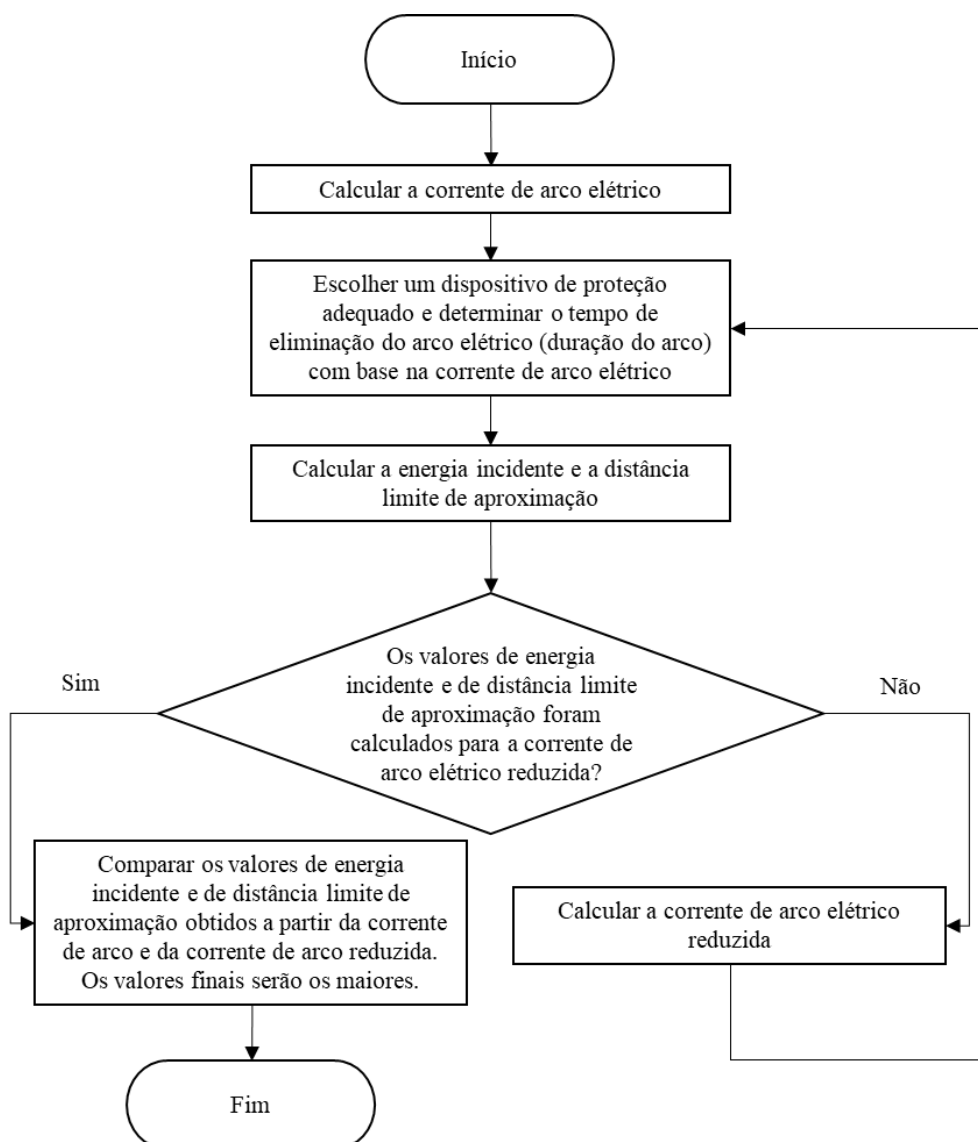


Fig. 1. Método de estimativa de energia incidente da IEEE Std 1584-2018. Fonte: Autores.

A estimação de energia incidente inicia com o cálculo da corrente de arco elétrico e, com base nesse resultado, determina-se o tempo de eliminação do arco elétrico a partir da escolha de um dispositivo de proteção. Com os valores de corrente e duração do arco elétrico, é possível estimar a energia incidente e a distância limite de aproximação. Há ainda a recomendação de se calcular a corrente de arco reduzida, que objetiva mostrar os impactos do tempo de eliminação do arco na energia incidente. Com a corrente de arco reduzida, determina-se uma duração do arco elétrico com base nessa nova corrente e se estima, mais uma vez, a energia incidente e a distância limite de aproximação. Após essas etapas, deve-se comparar os valores de energia incidente e de distância limite de aproximação obtidos com base na corrente de arco elétrico e na corrente de arco elétrico reduzida. Os maiores valores de energia incidente e de distância limite de aproximação são os resultados da aplicação do método e podem ser usados em conjunto com outros guias e normas na definição de estratégias de proteção contra arcos elétricos.

2.2 Seleção de vestimentas de proteção térmica e EPIs

A seleção de EPIs é direcionada tradicionalmente pela NFPA 70E, uma norma norte-americana que promove práticas de trabalho seguras a partir da redução da exposição do trabalhador a riscos elétricos (arco elétrico, choque elétrico e eletrocussão). Sua versão mais recente, a NFPA 70E-2021, prevê dois métodos para seleção de vestimentas e EPIs contra arcos elétricos, o método de análise de energia incidente e o método de categorização de EPI. Ambos podem ser empregados na seleção das vestimentas e dos EPIs a serem utilizados, mas não se pode empregá-los simultaneamente, para que os resultados apresentados ao trabalhador não sejam dúbios.

O presente trabalho considera o método de análise de energia incidente para orientar a seleção de vestimentas e EPIs contra arcos elétricos. Esse método determina os equipamentos a serem utilizados pelo trabalhador com base no nível de energia incidente estimado relativo à atividade a ser realizada, sendo propostas uma seleção de vestimentas e de EPIs para exposições iguais ou maiores a 1,2 cal/cm² e menores ou iguais a 12 cal/cm² e outra para exposições maiores que 12 cal/cm², conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Método de análise de energia incidente para seleção de vestimentas e EPIs contra arcos elétricos.
Fonte: Adaptado de NFPA (2020).

Exposição à energia incidente igual ou maior que 1,2 cal/cm ² e menor ou igual a 12 cal/cm ²	
Vestimentas	Camisa de manga comprida e calças, macacão ou traje com AR igual ou superior à energia incidente estimada. Escudo facial e balaclava ou capuz carrasco com AR igual ou superior à energia incidente estimada.

	Roupa exterior com AR igual ou superior à energia incidente estimada, caso necessário.
EPI	Capacete; Óculos de segurança ou óculos de proteção; Protetor auricular; Luvas de couro para serviços pesados, luvas com AR igual ou superior à energia incidente estimada ou luvas isolantes de borracha com protetores de couro; Calçado de couro.
Exposição à energia incidente superior a 12 cal/cm ²	
Vestimentas	Camisa de manga comprida e calças, macacão ou traje com AR igual ou superior à energia incidente estimada. Capuz carrasco com AR igual ou superior à energia incidente estimada. Roupa exterior com AR igual ou superior à energia incidente estimada, caso necessário.
EPI	Capacete; Óculos de segurança ou óculos de proteção; Protetor auricular; Luvas com AR igual ou superior à energia incidente estimada ou luvas isolantes de borracha com protetores de couro; Calçado de couro.

Quanto às vestimentas apresentadas na Tabela 1, é importante destacar que todas as vestimentas para intervenção em situações de arco elétrico devem possuir uma classificação de arco (do inglês *arc rating*), representada pela sigla AR. Essa classificação é atribuída aos materiais utilizados em vestimentas e reflete seu desempenho quando exposto a um arco elétrico, sendo expressa em cal/cm².

3. METODOLOGIA

A metodologia empregada para definir as estratégias de proteção individual contra arcos elétricos é apresentada na Fig. 2 e inclui quatro etapas: seleção do ponto de intervenção, simulação de uma falta trifásica franca como origem do arco elétrico, estimação do nível de energia incidente decorrente do arco elétrico e seleção dos EPIs adequados para intervir no ponto de ocorrência do arco elétrico.

Na primeira etapa, seleciona-se o ponto do sistema onde serão realizadas as intervenções, ou seja, o ponto a ser analisado. No presente trabalho, o ponto escolhido para análise é o nó 634 do sistema IEEE 13-Node, apresentado na Fig. 3, sendo esse ponto o lado de baixa tensão do transformador de linha existente na rede.

Escolhido o ponto de análise, são coletadas informações necessárias à aplicação do modelo de estimativa de energia incidente, tais como nível de tensão, distância entre condutores, distância de trabalho considerada e disposição espacial dos condutores.

Outro dado necessário à aplicação do modelo de estimativa de energia incidente é a corrente de curto-circuito trifásico franco, informação que é obtida na segunda etapa, empregando o *software* ATPDraw para simular esse evento que poderia ocasionar o arco elétrico.

A terceira etapa consiste em aplicar o modelo de estimativa de energia incidente (previsto na IEEE Std 1584-2018) a partir dos dados coletados nas duas etapas anteriores, utilizando o Microsoft Excel.

Com o resultado obtido, é possível avançar para a quarta etapa, na qual o valor de energia incidente estimado é avaliado. Caso o valor estimado seja menor ou igual a 8 cal/cm², então é possível prosseguir para a definição das vestimentas e dos EPIs adequados de acordo com o previsto na NFPA 70E-2021. Caso contrário, se o valor estimado for superior a 8 cal/cm², deve-se selecionar uma técnica de mitigação, normalmente utilizar um dispositivo de proteção mais rápido ou adotar uma distância de trabalho maior, e refazer a estimativa de energia incidente com base na técnica selecionada.

A opção de se utilizar exposições de no máximo 8 cal/cm² para prosseguir para a seleção de vestimentas e EPIs baseia-se nas vestimentas categorizadas previstas NFPA 70E e também na ABNT NBR 16384:2020, as quais são mais facilmente encontradas no Brasil do que as vestimentas com AR customizável conforme o nível de exposição estimado.

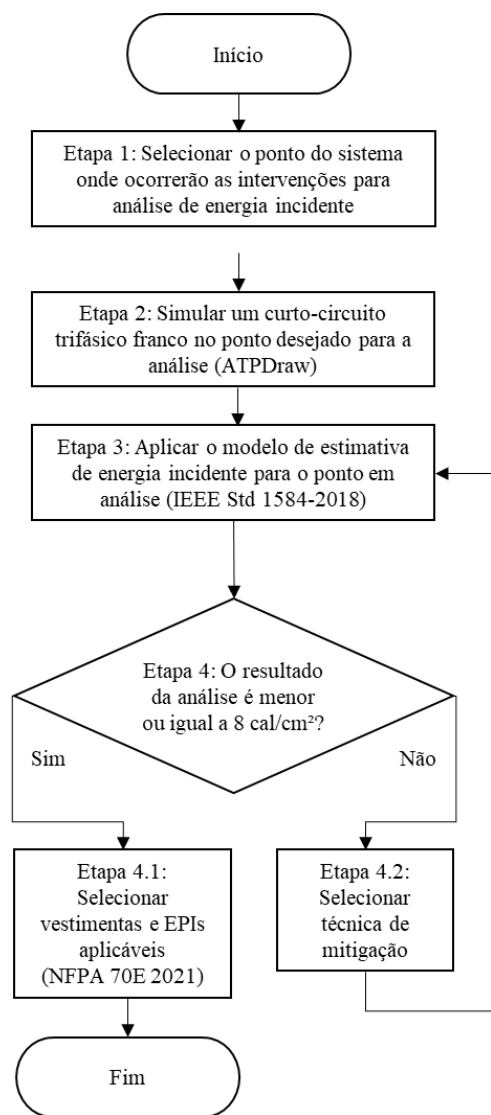


Fig. 2. Metodologia. Fonte: Autores.

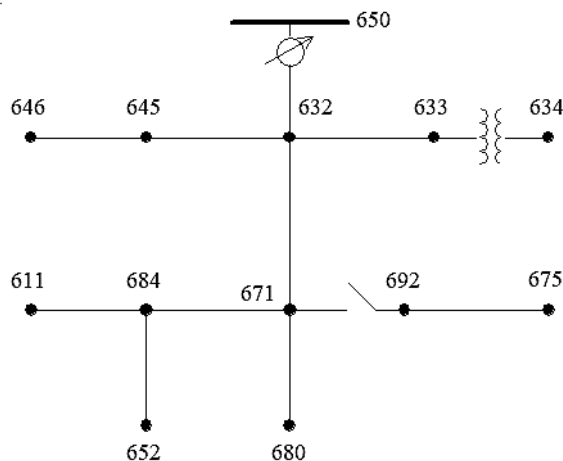


Fig. 3. Sistema IEEE 13-Node. Fonte: Adaptado de IEEE (2020).

4. RESULTADOS

De acordo com a metodologia proposta, o local a ser analisado foi o nó 634 do sistema IEEE 13-Node. Com base na escolha do ponto, os dados apresentados na Tabela 2 foram coletados para serem empregados na estimativa do nível de energia incidente no caso de ocorrência de um arco elétrico nesse ponto.

Das informações apresentadas, a tensão de circuito aberto, o espaçamento entre os eletrodos e a configuração deles são características da rede, enquanto a distância de trabalho é uma escolha de acordo com a filosofia de manutenção adotada por cada empresa. Além disso, ressalta-se que, por se tratar de um transformador de distribuição, considerou-se que este está instalado ao ar livre (rede aérea) e, dado o lado em análise ser o lado de baixa tensão, estabeleceu-se que os eletrodos estão dispostos horizontalmente.

Tabela 2. Dados do estudo de caso para estimativa de energia incidente.

Parâmetro	Valor
Tensão de circuito aberto (kV)	0,480
Espaçamento entre eletrodos (mm)	76,2
Distância de trabalho (mm)	1430
Configuração dos eletrodos	Horizontalmente dispostos em ambiente aberto (ar livre)

Além das informações apresentadas na Tabela 2, a estimativa de energia incidente também exige o conhecimento da corrente de curto-circuito trifásico franco no local de análise. Esse valor foi obtido de 16,05 kA, a partir da simulação desse tipo de evento no *software* ATPDraw.

Conhecidos os dados de tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, espaçamento entre os eletrodos e tipo de configuração deles foi possível calcular a primeira variável do modelo de estimativa de energia incidente, a corrente de

arco elétrico, empregando o Microsoft Excel. A partir desse valor, é possível selecionar um dispositivo de proteção e determinar o tempo de eliminação do arco elétrico.

Uma vez que é comum se utilizar dispositivos de proteção contra sobrecorrente no primário do transformador para proteção de faltas no secundário, os autores optaram por utilizar um fusível de média tensão para fazer a extinção do arco elétrico. Considerando-se a corrente de arco elétrico calculada já refletida para o primário, a tensão no lado de média tensão e a potência do transformador, a fabricante Montema indica 4 modelos diferentes de fusíveis: 100 A, 125 A, 160 A e 200 A.

Foram simulados 6 cenários distintos, considerando-se mudanças na distância de trabalho e/ou no modelo de fusível, a saber:

- Cenário 1: vara telescópica recolhida (distância de trabalho de 1,43 metros) e fusível de 200 A;
- Cenário 2: vara telescópica estendida (distância de trabalho de 2,48 metros) e fusível de 200 A;
- Cenário 3: vara telescópica recolhida (distância de trabalho de 1,43 metros) e fusível de 160 A;
- Cenário 4: vara telescópica estendida (distância de trabalho de 2,48 metros) e fusível de 160 A;
- Cenário 5: vara telescópica recolhida (distância de trabalho de 1,43 metros) e fusível de 125 A;
- Cenário 6: vara telescópica estendida (distância de trabalho de 2,48 metros) e fusível de 125 A;

A Tabela 3 relaciona cada um dos cenários com os respectivos tempos de extinção do arco elétrico e os níveis de energia incidente estimados.

Tabela 3. Dados do estudo de caso para estimativa de energia incidente.

Cenário	Tempo de extinção do arco (s)	Energia incidente (cal/cm ²)
1	9	30,38
2	9	10,16
3	3	10,13
4	3	3,39
5	1,5	5,06
6	1,5	1,69

Dentre os cenários simulados, três cenários (1, 2 e 3) apresentaram níveis de energia incidente acima do valor admitido para seleção de vestimentas e EPIs (8 cal/cm²), enquanto os outros três cenários (4, 5 e 6) atenderam ao valor máximo de energia incidente para prosseguir com a devida seleção.

O estudo de caso original (cenário 1) foi feito considerando-se o dispositivo de proteção mais lento dentre as opções propostas pelo fabricante e a pior condição de intervenção

(menor distância de trabalho). Dado o valor de energia incidente estimado (30,36 cal/cm²) ser superior a 8 cal/cm², optou-se por dobrar a distância de trabalho como estratégia de mitigação de energia incidente, a partir da utilização da vara estendida. Nesse novo cenário (cenário 2), a energia incidente foi reduzida para 10,16 cal/cm², valor ainda superior ao limite estabelecido (8 cal/cm²).

Dado o fato de já se ter utilizado o aumento da distância de trabalho como forma de reduzir os níveis de energia incidente, optou-se pela troca do dispositivo de proteção existente (200 A) por um dispositivo mais rápido (160 A), considerando-se que a coordenação e a seletividade do sistema não seriam impactadas por essa troca. No cenário 3, utilizando o fusível de 160 A, o tempo de extinção do arco é três vezes menor do que com o fusível de 200 A, mas o nível de energia incidente (10,13 cal/cm²) mantém-se acima de 8 cal/cm², motivado em parte pela utilização da vara recolhida.

Com a modificação do cenário 3 em termos de distância de trabalho (utilização da vara estendida), o cenário 4 tem a energia incidente estimada de 3,39 cal/cm², cerca de 33% do valor obtido no cenário 3. Nessa situação, é possível prosseguir à definição das vestimentas e EPIs aplicáveis.

Os cenários 5 e 6 demonstram os efeitos, em termos de energia incidente, para a utilização de um fusível de 125 A no sistema e intervenções com a vara recolhida e com a vara estendida, respectivamente. Em ambas as situações, os níveis de energia incidente obtidos (5,06 cal/cm² para o cenário 5 e 1,69 cal/cm² para o cenário 6) permitem a seleção de vestimentas e EPIs conforme a metodologia proposta, visto que são inferiores a 8 cal/cm².

Ao se comparar os cenários 4, 5 e 6 para selecionar as vestimentas e EPIs, optou-se por considerar o cenário 5, visto que este tem a pior condição de intervenção (menor distância de trabalho). Com base no nível de energia incidente do cenário 5 (5,06 cal/cm²) e no método de análise de energia incidente para seleção de estratégias de proteção individual, as vestimentas e os EPIs aplicáveis para a intervenção no nó 634 do sistema IEEE 13-Node serão aqueles aplicáveis à exposições iguais ou maiores que 1,2 cal/cm² e menores que 12 cal/cm². A Tabela 4 apresenta um resumo das vestimentas e EPIs selecionados.

É importante destacar que, ainda que as vestimentas selecionadas devam ter um AR mínimo de 5,06 cal/cm², conforme o método de análise de energia incidente, seria possível empregar nessa situação uma vestimentas com AR 8 cal/cm², mais comumente encontrada no Brasil sob a denominação de AE-2 ou categoria 2, desde que respeitada a seleção de vestimentas e EPIs indicada na Tabela 4.

Tabela 4. Vestimentas e EPIs resultantes.

Vestimentas	Camisa de manga comprida e calças, macacão ou traje com AR igual ou superior à 5,06 cal/cm ² ; escudo facial e balaclava ou capuz carrasco com AR igual ou superior à 5,06 cal/cm ² ; roupa exterior com AR igual ou superior à 5,06 cal/cm ² , caso necessário.
-------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

EPI	Capacete; óculos de segurança ou óculos de proteção; protetor auricular; luvas de couro para serviços pesados, luvas com AR igual ou superior à 5,06 cal/cm ² ou luvas isolantes de borracha com protetores de couro; calçado de couro.
-----	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou o processo de definição de estratégias de proteção individual contra arcos elétricos a partir da estimação de energia incidente em um cenário de ocorrência de arco elétrico no lado de baixa tensão de um transformador de distribuição.

A partir dos resultados de energia incidente obtidos para o estudo de caso original, foram propostas técnicas de diminuição dos níveis de energia incidente a fim de atender aos níveis estabelecidos como desejados e, com isso, foi possível selecionar as vestimentas e os EPIs adequados para uso por parte dos trabalhadores que viriam a intervir em uma situação de arco elétrico como a que foi considerada.

Ressalta-se a importância de se conhecer o modelo de estimativa de energia incidente empregado para definir técnicas de mitigação de energia incidente, como a redução da distância de trabalho e do tempo de atuação da proteção.

Por fim, destaca-se que a seleção das vestimentas e EPIs, feita a partir da estimativa de energia incidente e consequente emprego do método de análise de energia incidente, segue as instruções da normativa estabelecida (NFPA 70E), permitindo uma escolha mais assertiva dessa estratégia de proteção individual. Essa assertividade garante ao trabalhador realizar as intervenções de forma segura e tão confortável quanto possível conforme a atividade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro da CPFL Energia no projeto “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.

Este estudo também foi financiado parcialmente pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

NFPA (2020). *Electrical Safety in the Workplace*. NFPA 70E-2021 (Revision of NFPA 70E-2018).

Laverty, G. (2001). Measuring the Performance of Fabric Systems to Protect Against the Thermal Effects of Electric Arcs. *Power Engineering Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 17-22.

Özen, K., Tör, O. B., Çetintaş, M., Akgün, A., Bara, A. and Oprea, S. (2018). Arc-Flash Risk Level Calculations based on Computer Simulations and Measures to Avoid Hazards. *20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*, Bourgas, Bulgaria.

Doughty, R. L., Neal, T. E., Laverty, G. and Hoagland, H. (2002). Minimizing Burn Injury: Electric-Arc Hazard Assessment and Personnel Protection. *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 8, no. 3, pp. 18-25.

McCann, J., Johnson, J. and Bobbitt, D. (2018). Impact of the Proposed IEEE 1584 Empirical Model in Comparison to Existing Arc-Flash Hazard Assessment Calculation Methods. *2018 IEEE Rural Electrical Power Conference (REPC 2018)*, Memphis – TN, USA.

Lee, R. H. (1982). The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-18(3), pp. 246-251.

Doughty, R. L., Neal, T. E. and Floyd, H. L. (1998). Predicting Incident Energy to Better Manage the Electric Arc Hazard on 600 V Power Distribution Systems. *IEEE Industry Application Society 45th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, Indianapolis – IN, USA.

IEEE (2018). IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. IEEE Std 1584-2018 (Revision of IEEE Std 1584-2002).

ABNT (2020). Segurança em Eletricidade – Recomendações e Orientações para Trabalho Seguro em Serviços com Eletricidade. ABNT NBR 16384-2020.

IEEE (2020). “Resources”. Available at: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/> (accessed 27 January 2021).

Montema [s.d.]. “Fusíveis limitadores de corrente HH”. Available at: http://www.montema.com.br/novo/uploads/10101_Fus%C3%ADveis_HH_Guia_de_aplica%C3%A7%C3%A3o_Id.pdf (accessed 11 February 2022).