

Estimação dos Níveis de Energia Incidente em Transformador de Distribuição para Definição de Estratégias de Proteção Térmica ao Trabalhador

Marina Camponogara*, 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, 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 electric arc can reach temperatures above 20,000 °C and, therefore, the thermal risk is considered the most representative risk of this type of event. The energy released by the electric arc, called incident energy, measures arc's severity and it is used to define the thermal protection strategies applicable to the worker who performs activities in this type of scenario. The present work presents the process to define personal protection strategies against electric arc's thermal effects from the estimation of the incident energy levels in a distribution transformer. The incident energy estimation is based on the mathematical model proposed by the IEEE Std 1584-2018 and the definition of garments and PPE is based on the guidelines provided by NFPA 70E-2021.

Resumo: O arco elétrico pode alcançar temperaturas acima de 20.000 °C e, por isso, o risco térmico é considerado o mais representativo desse tipo de evento. A energia liberada pelo arco elétrico, denominada energia incidente, mede a severidade do arco elétrico e é empregada para definir as estratégias de proteção térmica aplicáveis ao trabalhador que executa atividades nesse tipo de cenário. O presente trabalho apresenta o processo de definição de estratégias de proteção pessoal contra os efeitos térmicos do arco elétrico a partir da estimativa dos níveis de energia incidente em um transformador de distribuição. A estimativa de energia incidente é baseada no modelo matemático proposto pela IEEE Std 1584-2018 e a definição de vestimentas e EPIs é feita a partir das orientações previstas na NFPA 70E-2021.

Keywords: Electric arc; Garments; IEEE Std 1584; Incident energy; PPE; NFPA 70E.

Palavras-chaves: Arco elétrico; Energia incidente; EPI; IEEE Std 1584; NFPA 70E; Vestimentas;

1. INTRODUÇÃO

Um arco elétrico involuntário é, por definição, um acidente e é, portanto, não-intencional e inesperado (Lavery, 2001). Uma vez que o arco elétrico alcança temperaturas em torno ou acima de 20.000 °C, o trabalhador pode sofrer queimaduras de segundo e terceiro grau sem que haja contato elétrico entre ele e o equipamento no qual está intervindo (Doughty *et al.*, 2002).

A preocupação em torno da segurança do trabalhador em caso de eventos de arco elétrico não é um fenômeno novo, visto que métodos de avaliação, regulamentações e melhorias em prol da segurança têm sido aprimorados nos últimos 45 anos (McCann *et al.*, 2018). A severidade desse tipo de evento é descrita em termos da energia incidente liberada pela fonte de arco elétrico (Kanokbannakorn *et al.*, 2016), a partir da qual são escolhidas as estratégias de proteção térmica aplicáveis ao trabalhador.

No presente trabalho, os autores apresentam o processo de estimação dos níveis de energia incidente nos lados de baixa e de média tensão de um transformador de distribuição em

um cenário de arco elétrico originado por uma falta trifásica, com o objetivo final de definir uma estratégia de proteção térmica única aplicável aos trabalhadores que realizarão intervenções nesse transformador. São utilizados o *software* ATPDraw para simulação de curto-circuito, o método da IEEE Std 1584-2018 para estimar os níveis de energia incidente e a norma NFPA 70E-2021 para direcionar as estratégias de proteção.

2. ESTIMATIVA DE ENERGIA INCIDENTE

A definição das estratégias de proteção térmica aplicáveis ao trabalho em eletricidade é guiada a partir da estimativa do nível de energia incidente que pode ocorrer no local onde ocorrerá a intervenção.

A energia incidente é a quantidade de energia térmica liberada que atinge uma dada superfície quando ocorre um arco elétrico. Essa incidência de energia pode causar queimaduras, denominadas queimaduras de natureza elétrica causadas por arco elétrico.

A estimativa de energia incidente é feita com base em modelos matemáticos, dentre os quais os mais conhecidos

são os modelos de Lee (1982), de Doughty *et al.* (1998) e do IEEE (2002).

2.1 IEEE Std 1584-2018

A IEEE Std 1584 é um guia proposto pelo IEEE que fornece modelos matemáticos aplicáveis à determinação dos níveis de energia incidente decorrentes de um arco elétrico e da distância limite de aproximação desse arco. Sua primeira versão foi publicada em 2002, sofrendo alterações em 2004 e em 2011, até que foi republicado em 2018.

Desde a publicação original e após a publicação da segunda versão, a IEEE Std 1584 é amplamente utilizada para estimar os níveis de energia incidente e, com isso, determinar estratégias de proteção térmica ao trabalhador.

A IEEE Std 1584-2018 provê dois modelos matemáticos para estimar a energia incidente e a distância limite de aproximação de um arco elétrico. Esses modelos são aplicáveis a sistemas trifásicos com os seguintes parâmetros (IEEE, 2018):

- Tensões entre 208 V e 15 kV, com frequência de 50 Hz ou 60 Hz;
- Correntes de falta franca entre 200 A e 65 kA;
- Condutores espaçados 6,35 mm a 254 mm;
- Distância de trabalho igual ou maior que 305 mm;
- Eletrodos configurados vertical ou horizontalmente, confinados ou não.

O detalhamento dos modelos matemáticos desse guia está apresentado em IEEE (2018) e, no presente trabalho, ambos os modelos são empregados, visto que um modelo se aplica a sistemas com tensão entre 208 V e 600 V e o outro modelo a sistemas com tensão entre 601 V e 15 kV.

3. SELEÇÃO DE VESTIMENTAS E EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO INDIVIDUAL (EPIs)

A NFPA 70E é uma norma norte-americana que tem como objetivo promover práticas de trabalho seguras a partir da redução da exposição do trabalhador a maiores riscos elétricos. Os direcionamentos fornecidos por esta norma são largamente utilizados em aplicações práticas e considerados em publicações científicas.

Essa norma é republicada a cada três anos, sendo sua versão mais recente a NFPA 70E-2021, que foi publicada no final de 2020. Esta versão 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. Qualquer um dos métodos podem ser utilizados para determinar a vestimenta e os EPIs a serem utilizados em um mesmo ponto, mas não se pode empregar ambos os métodos simultaneamente, a fim de garantir que os resultados apresentados ao trabalhador não causem ambiguidade.

O método de análise de energia incidente considera que o nível de energia incidente ao qual o trabalhador pode ser exposto deve ser baseado na distância entre o seu rosto e o seu torso e o ponto de origem do arco elétrico. Assim, a vestimenta e os outros EPIs a serem utilizados pelo trabalhador devem ser baseados no nível de energia incidente associado à tarefa a ser executada. Ainda, deve-se atentar ao fato de que a energia incidente aumenta conforme a distância diminui e, portanto, garantir que qualquer parte do corpo que esteja a uma distância menor do arco que a distância de trabalho utilize EPIs adicionais (NFPA, 2020).

As vestimentas e EPIs selecionados conforme o método de análise de energia incidente são selecionadas conforme o nível de energia incidente calculado, sendo uma seleção de roupas e EPIs para exposições entre 1,2 cal/cm² e 12 cal/cm² e outra para exposições maiores que 12 cal/cm², conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Seleção de vestimentas e EPIs segundo o método de análise de energia incidente.

Exposição à energia incidente entre 1,2 cal/cm ² e 12 cal/cm ²	
Vestimentas	Camisa de manga comprida e calças ou macacão ou traje (todos com AR igual ou superior à energia incidente estimada); Escudo facial e balaclava ou capuz de proteção (todos com AR igual ou superior à energia incidente estimada); Roupa exterior com AR igual ou superior à energia incidente estimada (quando necessário); Luvas de couro para serviços pesados ou luvas com AR igual ou superior à energia incidente estimada ou luvas isolantes de borracha com protetores de couro.
EPI	Capacete; Óculos de segurança ou óculos de proteção; Protetor auricular; Calçado de couro.
Exposição à energia incidente superior a 12 cal/cm ²	
Vestimentas	Camisa de manga comprida e calças ou macacão ou traje (todos com AR igual ou superior à energia incidente estimada); Capuz de proteção com AR igual ou superior à energia incidente estimada; Roupa exterior com AR igual ou superior à energia incidente estimada (quando necessário); Luvas com AR igual ou superior à energia incidente estimada ou luvas isolantes de borracha com protetores de couro.
EPI	Capacete; Óculos de segurança ou óculos de proteção; Protetor auricular; Calçado de couro.

Fonte: Adaptado de NFPA (2020).

Já o método de categorização de EPI deve ser utilizado para selecionar vestimentas e EPIs em quatro categorias distintas,

conforme o tipo de situação e o nível de energia incidente estimado para ela. Essas categorias, apresentadas na Tabela 2, são mais comumente empregadas na prática, podendo ser selecionadas conforme cenários específicos previstos na NFPA (2020).

Tabela 2. Seleção de vestimentas e EPIs segundo o método de categorização de EPI.

Categoria 1 – Proteção até 4 cal/cm ²	
Vestimentas	Camiseta de manga longa e calças ou macacão (todos com AR de 4 cal/cm ²); Escudo facial ou capuz (todos com AR de 4 cal/cm ²); Jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete, todos com AR de 4 cal/cm ² (opcional);
EPIs	Capacete; Óculos de segurança ou óculos de proteção; Protetor auricular de inserção; Luvas de couro para trabalho pesado, luvas AR ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro; Calçado de couro (opcional);
Categoria 2 – Proteção até 8 cal/cm ²	
Vestimentas	Camiseta de manga longa e calças ou macacão (todos com AR de 8 cal/cm ²); Capuz ou escudo facial e balaclava (todos com AR de 8 cal/cm ²); Jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete, todos com AR de 8 cal/cm ² (opcional);
EPIs	Capacete; Óculos de segurança ou óculos de proteção; Protetor auricular de inserção; Luvas de couro para trabalho pesado, luvas AR ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro; Calçado de couro.
Categoria 3 – Proteção até 25 cal/cm ²	
Vestimentas	Camiseta de manga longa, calças, macacão, jaqueta e calças do traje, todos com AR de 25 cal/cm ² e empregados conforme requerido; Capuz do traje com AR de 25 cal/cm ² ; Luvas AR ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro; Jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete, todos com AR de 25 cal/cm ² (opcional);
EPIs	Capacete; Óculos de segurança ou óculos de proteção; Protetor auricular de inserção; Calçado de couro.
Categoria 4 – Proteção até 40 cal/cm ²	
Vestimentas	Camiseta de manga longa, calças, macacão, jaqueta e calças do traje, todos com AR de 40 cal/cm ² e empregados conforme requerido; Capuz do traje com AR de 40 cal/cm ² ;

	Luvas AR ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro; Jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete, todos com AR de 40 cal/cm ² (opcional);
EPIs	Capacete; Óculos de segurança ou óculos de proteção; Protetor auricular de inserção; Calçado de couro.

Fonte: Adaptado de NFPA (2020).

4. METODOLOGIA

A definição de estratégias de proteção para o trabalhador em serviços que envolvem a possibilidade de ocorrência de arco elétrico inclui quatro etapas, que são apresentadas no fluxograma da Fig. 1. Na metodologia proposta, conforme mostrado no fluxograma, está inclusa uma quinta etapa.

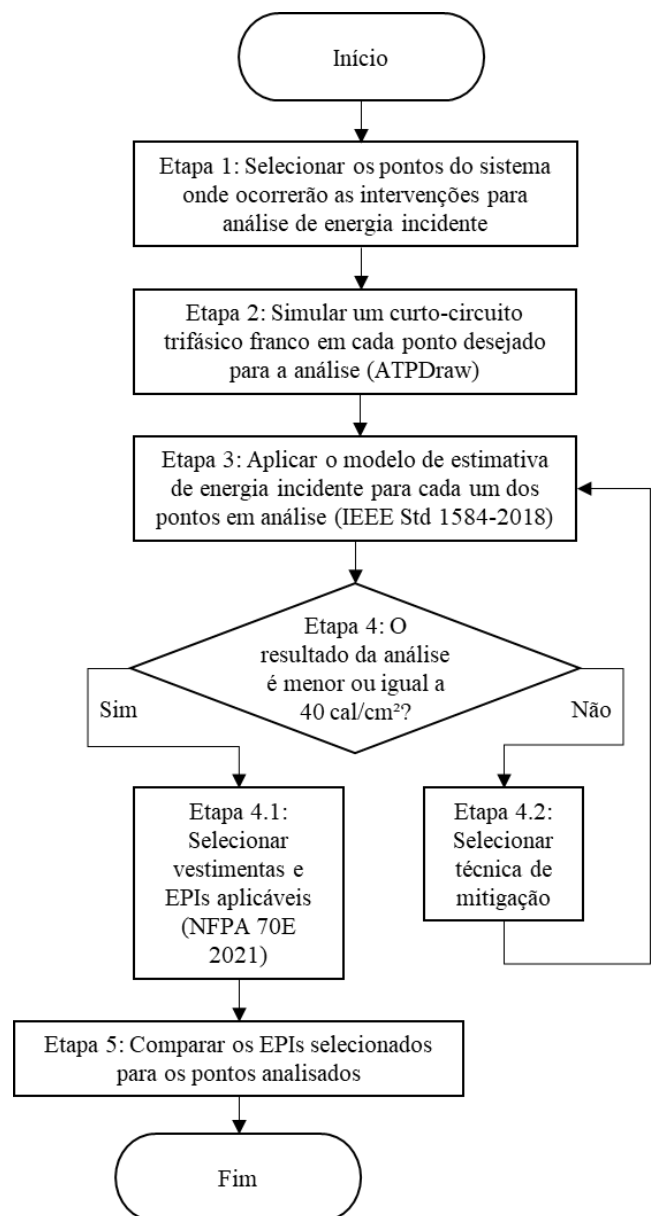


Fig. 1 – Fluxograma da metodologia empregada. Fonte: Autoria própria.

Em um primeiro momento, são selecionados os pontos do sistema onde serão realizadas as intervenções. Nesse momento, são coletadas informações como nível de tensão, distância entre condutores e a forma como estão dispostos, além da distância de trabalho (espaço entre o ponto de falta e o trabalhador) considerada. Além desses dados, é necessário também conhecer o valor da corrente do curto-circuito trifásico franco que pode ocasionar o arco elétrico nos pontos considerados. Essa informação é obtida a partir da simulação de curto-circuito, que é realizada empregando o *software* ATPDraw.

Coletadas todas as informações requeridas, aplica-se o modelo da estimativa de energia incidente previsto na IEEE Std 1584-2018 para cada um dos pontos analisados. A partir dos níveis de energia incidente obtidos, existem duas possibilidades: (i) se o valor de energia incidente calculado for igual ou inferior a 40 cal/cm^2 , então se prossegue para selecionar as estratégias de proteção ao trabalhador, isto é, determinar as vestimentas de proteção térmica e demais EPIs aplicáveis e, posteriormente, comparar as estratégias selecionadas para cada um dos pontos em análise e finaliza-se a análise proposta; (ii) caso contrário, se o nível de energia incidente calculado for maior que 40 cal/cm^2 , então é necessário determinar uma estratégia para diminuição desse nível, até que se atinja um valor igual ou menor que 40 cal/cm^2 e possa se prosseguir a análise proposta.

4.1 Sistema IEEE 13-Node

O sistema utilizado para a análise proposta no presente trabalho é o IEEE 13-Node, apresentado na Fig. 2. Esse sistema é um circuito muito pequeno comumente empregado para testar recursos comuns de *softwares* de distribuição de energia elétrica (Camponogara, 2021).

Os pontos selecionados para avaliação são os nós 633 e 634 do sistema, que representam os lados de média e de baixa tensão do transformador de linha existente nesse sistema e estão marcados em vermelho e azul, respectivamente.

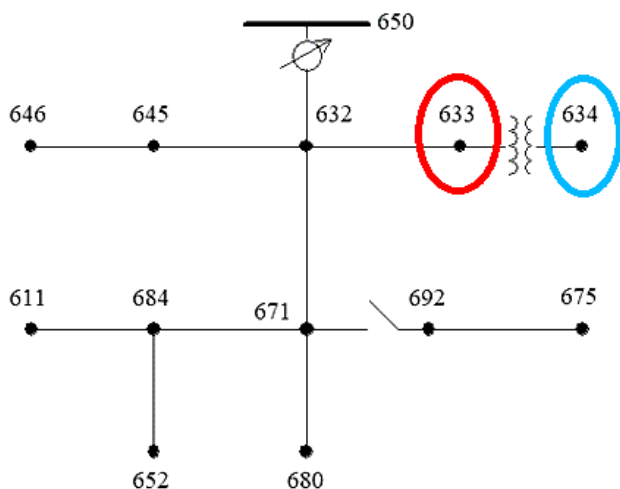


Fig. 2 – Sistema IEEE 13-Node. Fonte: Adaptado de IEEE (2020).

4.2 ATPDraw

Nesse trabalho, o ATPDraw é empregado para simular faltas do tipo trifásica franca nos pontos considerados do sistema apresentado na Fig. 2. As faltas são aplicadas separadamente, ou seja, em simulações distintas, de forma a demonstrar o nível de curto-circuito quando ocorre uma falta em somente um dos pontos analisados.

É importante destacar que o tipo de curto-circuito simulado é função exclusiva do modelo de estimativa de energia incidente considerado e que a opção pelo ATPDraw frente a outros *softwares* com a mesma funcionalidade é motivada por este ser um *software* livre.

4.3 Estudos de caso

A análise proposta no presente trabalho utiliza a estimação dos níveis de energia incidente nos lados de baixa e de média tensão de um transformador de distribuição para determinar as estratégias de proteção térmica aplicáveis ao trabalhador que fará a intervenção nesses pontos no caso de ocorrência de um arco elétrico. Uma vez que serão avaliados dois pontos distintos do transformador, dois estudos de caso serão avaliados, um para o lado de baixa tensão e o outro para o lado de média tensão.

O estudo de caso 1 representa um cenário de arco elétrico a partir da ocorrência de um curto-circuito trifásico franco no lado de baixa tensão do transformador de linha do sistema IEEE 13-Node. Por se tratar de um transformador de distribuição, considerou-se que este está instalado ao ar livre e, dado o lado em análise ser de baixa tensão, estabeleceu-se que os eletrodos estão dispostos horizontalmente. Ademais, o nó que representa o lado de baixa tensão está conectado em estrela e tem tensão igual a 480 V.

Já o estudo de caso 2 representa um cenário de arco elétrico a partir da ocorrência de um curto-circuito trifásico franco no lado de média tensão do transformador de linha do sistema IEEE 13-Node. Da mesma forma que no estudo de caso 1, considerou-se que este está instalado ao ar livre e, dado o lado em análise ser de média tensão, estabeleceu-se que os eletrodos estão dispostos verticalmente. A conexão é a mesma do lado de baixa tensão (ligação estrela), mas com tensão de 4,16 kV.

Em cada estudo de caso, os autores utilizam as informações de cada estudo de caso e os resultados das respectivas simulações de curto-circuito para estimar os níveis de energia incidente que poderá ocorrer naquele ponto no caso de ocorrência de um arco elétrico e, a partir do valor estimado, selecionar as vestimentas e os EPIs adequados conforme a NFPA 70E-2021.

5. RESULTADOS

5.1 Estudo de caso 1

A Tabela 3 apresenta os dados utilizados para estimar a energia incidente no lado de baixa tensão do transformador

em análise utilizando o método proposto pela IEEE Std 1584-2018. Sobre esses dados, cabe elucidar que:

- A tensão de circuito aberto é característica do sistema em análise.
- A corrente de curto-circuito trifásico franco também é característica do sistema, sendo obtida a partir de uma simulação de curto-circuito feita no *software* ATPDraw.
- O espaçamento entre os eletrodos é uma característica construtiva da rede. Para o sistema em análise, uma vez que se desconhece esse dado por se tratar de um sistema hipotético, o espaçamento considerado é o espaçamento máximo que o modelo da IEEE Std 1584-2018 considera para o nível de tensão do sistema (480 V).
- A distância de trabalho escolhida é o dobro da distância mínima considerada pelo modelo da IEEE Std 1584-2018 e equivale ao comprimento aproximado do braço esticado de um adulto.

Tabela 3. Dados do estudo de caso 1 para estimativa de energia incidente.

Parâmetro	Valor
Tensão de circuito aberto – V_{oc} (kV)	0,480
Corrente de curto-circuito trifásico franco – I_{bf} (kA)	16,05
Espaçamento entre eletrodos – G (mm)	76,2
Distância de trabalho – D (mm)	610
Configuração dos eletrodos	HOA

A Tabela 4 expõe os resultados da aplicação do modelo da IEEE Std 1584-2018 para o estudo de caso 1.

Tabela 4. Resultados da aplicação do método da IEEE Std 1584-2018 para o estudo de caso 1.

Parâmetro	Valor
Energia incidente (cal/cm ²)	27,59
Distância limite de aproximação (mm)	2947,98

Uma vez que o valor de energia incidente obtido (27,59 cal/cm²) é inferior a 40 cal/cm², é possível prosseguir para a seleção das vestimentas e dos EPIs adequados para uso por parte do trabalhador, conforme a metodologia proposta.

Empregando o método de análise de energia incidente proposto na NFPA 70E-2021 para fazer essa seleção, as vestimentas e os EPIs serão aqueles aplicáveis a situações em que a exposição é superior a 12 cal/cm². A Tabela 5 apresenta a relação de vestimentas e de EPIs selecionados para o estudo de caso 1.

Tabela 5. Vestimentas e EPIs para o estudo de caso 1 (método de análise de energia incidente).

Vestimentas	Camisa de manga comprida e calças ou
-------------	--------------------------------------

	macacão ou traje (todos com AR igual ou superior à 27,59 cal/cm ²); Capuz de proteção com AR igual ou superior à 27,59 cal/cm ² ; Roupa exterior com AR igual ou superior à 27,59 cal/cm ² (quando necessário); Luvas com AR igual ou superior à 27,59 cal/cm ² ou luvas isolantes de borracha com protetores de couro.
EPI	Capacete; Óculos de segurança ou óculos de proteção; Protetor auricular; Calçado de couro.

Se for empregado o método de categorização de EPI, deve-se optar pela categoria 4, na qual as vestimentas têm suportabilidade de até 40 cal/cm². As vestimentas e os respectivos EPIs associados estão listados na Tabela 6.

Tabela 6. Vestimentas e EPIs para o estudo de caso 1 (método de categorização de EPI).

Vestimentas	Camiseta de manga longa, calças, macacão, jaqueta e calças do traje, todos com AR de 40 cal/cm ² e empregados conforme requerido; Capuz do traje com AR de 40 cal/cm ² ; Luvas com AR de 40 cal/cm ² ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro; Jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete, todos com AR de 40 cal/cm ² (opcional);
EPIs	Capacete; Óculos de segurança ou óculos de proteção; Protetor auricular de inserção; Calçado de couro.

5.2 Estudo de caso 2

A Tabela 7 apresenta os dados utilizados para estimar a energia incidente no lado de média tensão do transformador em análise utilizando o método proposto pela IEEE Std 1584-2018. Quanto a esses dados, cabe explicar que:

- A tensão de circuito aberto é característica do sistema em análise.
- A corrente de curto-circuito trifásico franco também é característica do sistema e foi obtida a partir de uma simulação de curto-circuito feita no *software* ATPDraw.
- O espaçamento entre os eletrodos utilizado é o mesmo empregado no estudo de caso 1, sendo essa escolha justificada por esse valor estar dentro do intervalo de espaçamentos considerados pelo modelo da IEEE Std 1584-2018 para o nível de tensão do sistema (4,16 kV).
- A distância de trabalho considerada é a mesma empregada no estudo de caso 1, visto que é uma aproximação do comprimento do braço humano.

Tabela 7. Dados do estudo de caso 2 para estimativa de energia incidente.

Parâmetro	Valor
Tensão de circuito aberto – V_{oc} (kV)	4,16
Corrente de curto-circuito trifásico franco – I_{bf} (kA)	4,54
Espaçamento entre eletrodos – G (mm)	254
Distância de trabalho – D (mm)	610
Configuração dos eletrodos	VOA

A Tabela 8 expõe os resultados da aplicação do modelo da IEEE Std 1584-2018 para o estudo de caso 2.

Tabela 8. Resultados da aplicação do método da IEEE Std 1584-2018 para o estudo de caso 2.

Parâmetro	Valor
Energia incidente (cal/cm ²)	0,11
Distância limite de aproximação (mm)	127,38

Neste caso, o nível de energia incidente estimado é inferior a 1,2 cal/cm², ou seja, a exposição do trabalhador à 0,11 cal/cm² não implicará em uma queimadura de 2º grau, não havendo, portanto, a exigência de utilizar vestimentas com AR e outros EPIs com tratamento contra arcos elétricos com base nos métodos de seleção de vestimentas e EPIs estabelecidos.

Nessa situação, recomenda-se que o trabalhador faça uso das vestimentas de proteção de utilização diária (uma camiseta de manga longa e uma calça ou um macacão, todos com AR de 8 cal/cm²), bem como de EPIs que sejam necessários conforme a situação, tais como capacete, óculos de proteção, protetor auricular, calçado de couro, luvas, entre outros.

5.3 Comparação entre as estratégias de proteção selecionadas para os estudos de caso 1 e 2

Quanto a estratégia de proteção adequada ao estudo de caso 1, pode-se adotar o conjunto de vestimentas e de EPIs decorrentes do método de análise de energia incidente ou o conjunto de vestimentas e de EPIs resultantes da aplicação do método de categorização de EPI.

Enquanto os EPIs são os mesmos para ambos os métodos, as vestimentas se diferem apenas em termos de sua classificação de arco: enquanto as vestimentas selecionadas a partir do método de análise de energia incidente têm sua AR personalizável, podendo adotar qualquer valor igual ou superior à 27,59 cal/cm², as vestimentas selecionadas pelo método de categorização de EPI têm AR fixo igual a 40 cal/cm².

Tanto uma vestimenta com AR igual a 27,59 cal/cm² quanto outra com AR igual a 40 cal/cm² terão o mesmo desempenho em uma situação de arco elétrico onde o nível de energia incidente for igual a 27,59 cal/cm², de forma que é preferível, nessa situação, escolher a vestimenta e os demais EPIs selecionados de acordo com o método de categorização de EPI, visto que, ao escolher a vestimenta com AR de pelo menos 27,59 cal/cm², pois esta possui gramatura inferior à

vestimenta de categoria 4, sendo portanto mais confortável para o uso por parte do trabalhador.

Quanto à estratégia de proteção associada à intervenção no lado de média tensão, em termos de estimativa de energia incidente não se faz obrigatório o uso de vestimentas com AR, visto que o nível de energia incidente estimado é inferior a 1,2 cal/cm². No entanto, é recomendado o uso da vestimenta de utilização diária, que possui AR 8 cal/cm², bem como de EPIs necessários conforme a situação.

Por fim, comparando-se as vestimentas e os EPIs selecionados para os estudos de caso 1 e 2, nota-se que o conjunto de vestimentas e de EPIs destinados ao estudo de caso 1 (intervenção em caso de arco elétrico no lado de baixa tensão do transformador) é capaz de proteger o trabalhador tanto nesse cenário quanto no cenário do estudo de caso 2 (intervenção no lado de média tensão do transformador), de forma que esse conjunto é escolhido como solução definitiva para a intervenção no transformador em caso de ocorrência de arco elétrico no mesmo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou o processo de definição de estratégias de proteção pessoal contra arcos elétricos a partir da estimação de energia incidente em um cenário de intervenção em um transformador de distribuição, tanto no lado de baixa quanto no lado de média tensão desse equipamento.

Ao se considerar que havia proteção próxima do ponto de arco elétrico, foram encontrados valores de energia incidente bastante distintos: enquanto no lado de baixa tensão a ocorrência de um arco elétrico submeteria o trabalhador à uma exposição de 27,59 cal/cm², no lado de média tensão a energia incidente seria reduzida à apenas 0,11 cal/cm². Essa diferença é atribuída, em grande parte, ao tempo de atuação da proteção: a proteção de baixa tensão demoraria cerca de 1500 ms para extinguir o arco elétrico, enquanto a proteção de média tensão foi 75 vezes mais rápida, eliminando o arco elétrico em apenas 20 ms.

Uma vez que os valores de energia incidente estimados foram muito distintos, a definição das vestimentas AR e dos EPIs a serem empregados em cada uma das intervenções também resultou em cenários bastante diferentes: enquanto na baixa tensão indica-se utilizar vestimentas com AR de pelo menos 27,59 cal/cm² (pelo método de análise de energia incidente) ou de categoria 4 (pelo método de categorização de EPI), a intervenção no lado de média tensão não exige a utilização de vestimentas e EPIs específicos para proteção contra arcos elétricos, apenas a vestimenta e os EPIs de utilização diários.

Ao se comparar as vestimentas e os EPIs adequados em cada uma das situações para fins de definir um conjunto de vestimentas e de EPIs para uso em intervenções em ambos os lados do transformador, deve-se optar pela solução do lado que tem maior nível de energia incidente, ou seja, pelas vestimentas e pelos EPIs adequados ao trabalho no lado de baixa tensão, que podem ser selecionadas tanto pelo método

de análise de energia incidente quanto pelo método de categorização de EPI.

A vestimenta selecionada conforme o método de análise de energia incidente (AR mínimo de 27,59 cal/cm²) e a vestimenta selecionada pelo método de categorização de EPI (AR 40 cal/cm²) proporcionam a mesma proteção ao trabalhador, visto que ambas irão protegê-lo contra uma exposição de 27,59 cal/cm². Garantida a proteção térmica, deve-se considerar o conforto do trabalhador ao utilizar essas vestimentas, sendo que o que garante o AR de cada uma delas é sua gramatura, ou seja, a quantidade de massa por unidade de superfície. Um tecido com maior AR possui maior gramatura, ou seja, é mais pesado e, portanto, mais desconfortável de se utilizar. Por isso, optou-se pela vestimenta com AR mínimo 27,59 cal/cm² e seus respectivos EPIs, com a qual é possível aliar proteção térmica e conforto.

A opção de seleção de vestimentas e EPIs pelo método de análise de energia incidente, proposta primeiramente na versão de 2018 da NFPA 70E, fornece uma solução de engenharia que permite não só escolher vestimentas com AR customizável, como também não impede intervenções em ambientes com energia incidente superior a 40 cal/cm² por falta de vestimenta e EPI aplicável, pois prevê a possibilidade de se fabricar vestimentas para intervenção em cenários desse tipo. Vestimentas e EPIs com AR superior a 40 cal/cm² já são encontrados nos Estados Unidos e no Canadá, conforme regramento previsto na própria NFPA 70E e na CSA Z462.

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

Camponogara, M. (2021), “Análise de Energia Incidente em Redes de Distribuição: Estimativa, Estratégias de Mitigação e Medidas de Proteção”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, Brasil. 113 p.

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 Applications Society 45th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, Indianapolis, IN.

Doughty, R.L., Neal, T.E., Laverty, G.M. 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.

IEEE (2002), *IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations (IEEE Std 1584-2002)*, IEEE, New York, NY.

IEEE (2018), *IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations (IEEE Std 1584-2018)* (Revision of IEEE Std 1584-2002), IEEE, New York, NY.

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

Kanokbannakorn, W., Hongesombut, K., Teerakawanich, N. and Srisonphan, S. (2016), “Arc Flash Hazard in Distribution System with Distributed Generation”. *2016 International Electrical Engineering Congress (iEECON 2016)*, Chiang Mai, Thailand.

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.

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

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.

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