

# Estudo de Energia Incidente em uma Subestação de 500 kVA

Herick Talles Queiroz Lemos  
Centro de Engenharias  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Mossoró, RN  
hericktalles@gmail.com

Humberto Dionísio de Andrade  
Centro de Engenharias  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Mossoró, RN  
humbertodionisio@ufersa.edu.br

**Resumo** – Um dos principais riscos associados às atividades envolvendo equipamentos energizados são os efeitos térmicos produzidos pela energia incidente resultante de uma explosão elétrica. Neste contexto, uma importante medida para proteção contra os efeitos térmicos dos arcos elétricos é a utilização de equipamentos de proteção individual (EPIs) com grau ATPV (*Arc thermal performance value*) adequado e a definição de uma distância segura de aproximação do local de trabalho. No Brasil, a utilização de EPIs com proteção térmica é exigida na Norma Regulamentado N° 10 (NR 10), no entanto, essa norma fornece orientações sobre metodologias de estudo de energia incidente, as quais servem de base para especificação desses equipamentos. Desse modo, este trabalho se propõe a demonstrar, por meio de um estudo de caso, a aplicação da metodologia proposta na IEEE1584/2018 (*Guide for performing arc-flash hazard calculations*) e as orientações da NFPA 70E/2018 (*Standard for electrical safety requirement for employee workplace*) para o estudo da energia incidente e determinação do grau de proteção ATPV dos EPIs de trabalhadores de uma subestação de 500 kVA em 13,8/0,38 kV da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, localizada no município de Mossoró, RN. No estudo, pode-se constatar que os serviços na subestação requerem a utilização de EPIs com categoria ATPV grau 2 e a delimitação de uma distância segura de aproximação mínima de 1,1771 m. Por meio desse trabalho, pode-se demonstrar, de forma clara e objetiva, os principais métodos e padrões internacionais de referência utilizados no estudo de energia incidente e proteção térmica. **Palavras-chave** – energia incidente, proteção térmica, arco-elétrico.

## I. INTRODUÇÃO

Embora seja preconizado a intervenção em instalações elétricas desenergizadas sempre como primeira opção para os trabalhadores, nem sempre é possível atender essa premissa para todo o leque de atividades existentes, especialmente quando a continuidade do fornecimento é um fator crítico para instalação elétrica. Um dos principais riscos associados às atividades envolvendo equipamentos energizados é o surgimento de arcos elétricos, os quais liberam grandes quantidades de energia na forma de calor, som, expansão de ar e luz, dando origem a uma explosão elétrica (DAS, 2012). Quando exposto a uma explosão elétrica, o trabalhador pode ter como consequências queimaduras, traumatismos, surdez e até o óbito (GAMMON, 2015).

Tendo em vista as consequências danosas dos arcos elétricos, entende-se que o estudo de energia incidente constitui a ferramenta necessária para a correta

especificação do grau de proteção contra os efeitos térmicos do arco elétrico, bem como para determinação da distância segura de aproximação e delimitação de estratégias de ajuste dos equipamentos de proteção que minimizem os danos produzidos por uma explosão elétrica.

Na NR 10, é previsto a exigência de vestimentas adequadas para proteção dos trabalhadores (BRASIL, 2016), no entanto, não é detalhado nenhuma metodologia que oriente o engenheiro eletricista na especificação das características de proteção dos EPIs. Neste caso, faz-se necessário, portanto, para condução do estudo de energia incidente, o uso de normas internacionais, como a IEEE1584/2018 e a NFPA 70E/2018, muitas vezes desconhecidas pelos projetistas.

Neste trabalho, buscou-se demonstrar, por meio de um estudo de caso, a aplicação do estudo de energia incidente para correta determinação do categoria ATPV das vestimentas de trabalhadores e a distância segura de aproximação para serviços em um quadro elétrico de uma instalação de média tensão, utilizando como base a metodologia proposta na IEEE1584/2018 e as orientações da NFPA 70E/2018.

## II. O FENÔMENO DO ARCO ELÉTRICO

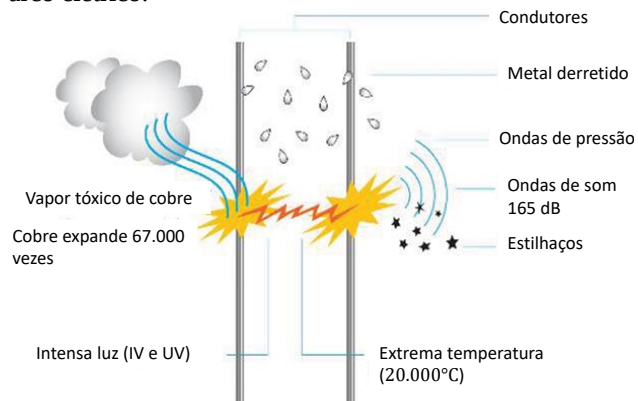
Um arco elétrico consiste na passagem de corrente elétrica através do ar ionizado e material condutor vaporizado entre condutores ou condutores e a terra. Esse fenômeno pode ter origem em (DAS, 2012):

- Defeitos no isolamento e terminações de cabos devido à deterioração ou contaminação;
- Sobreensões de origem atmosférica ou internas ao equipamento geradas por transitórios de chaveamento;
- Contatos acidentais entre condutores ou condutores e a terra;
- Operação inadequada de dispositivos de seccionamento na ausência de intertravamento;
- Subdimensionamento de equipamentos para a máxima corrente de curto-circuito possível;
- Falha humana, como a derrubada de partes ou ferramentas sobre equipamentos energizados.

Na ocorrência de um arco elétrico, grandes quantidades de energia na forma de calor, som, expansão de ar e luz são liberadas. O efeito combinado dessas

energias é denominado explosão elétrica. A Figura 1 ilustra as principais consequências do arco elétrico.

Figura 1 – Efeitos de uma explosão elétrica provocada por arco elétrico.



Fonte: Adaptado de (RANDELA, 2016).

Quando exposto a uma explosão elétrica, os efeitos térmicos da energia incidente correspondem a causa dos maiores danos ao trabalhador. Essa energia, medida em  $\text{cal}/\text{cm}^2$ , é liberada em sua maioria por irradiação e pode alcançar níveis superiores  $100 \text{ cal}/\text{cm}^2$ , valor capaz de, em meio segundo, elevar a temperatura da pele humana a  $500^\circ\text{C}$  e expandir a água contida nela em até 500 vezes, produzindo um efeito similar a uma explosão (GAMMON, 2015). A Figura 2 ilustra a ocorrência de uma explosão elétrica.

Figura 2 – Demonstração de explosão elétrica em ensaio laboratorial.

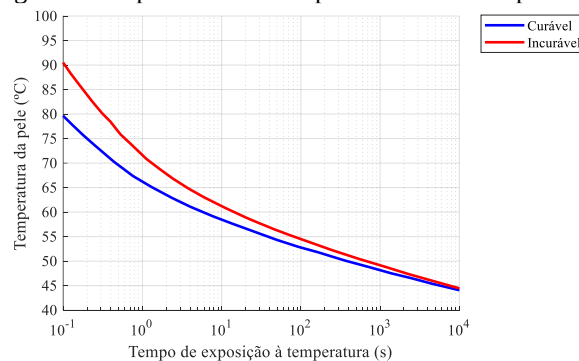


Fonte: Adaptado de (AMPSAFE, 2019).

Dentre os possíveis efeitos causados por um acidente por arco elétrico, as queimaduras se destacam, principalmente, pela elevada taxa de mortalidade associada, além da severidade das sequelas funcionais e estéticas que acometem às vítimas. A Figura 3 ilustra a relação entre temperatura da pele e tempo de exposição para produção de queimaduras curáveis e incuráveis, isto é, quando há morte das células.

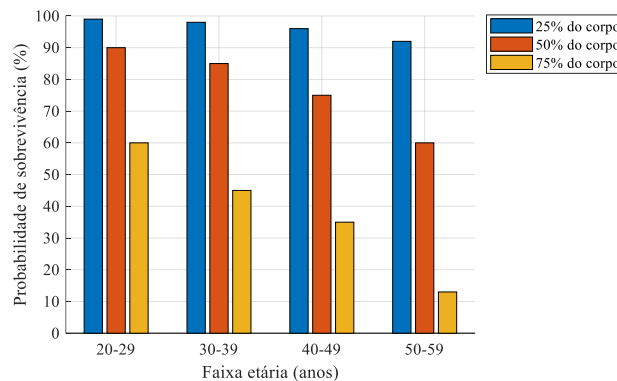
Em um estudo da American Burn Association, constatou-se que a probabilidade de sobrevivência de vítimas de uma explosão elétrica varia de acordo com a idade da vítima e porcentagem do corpo afetada, conforme ilustra a Figura 4.

Figura 3 – Suportabilidade da pele humana à temperatura.



Fonte: Adaptado de (QUEIROZ, 2012).

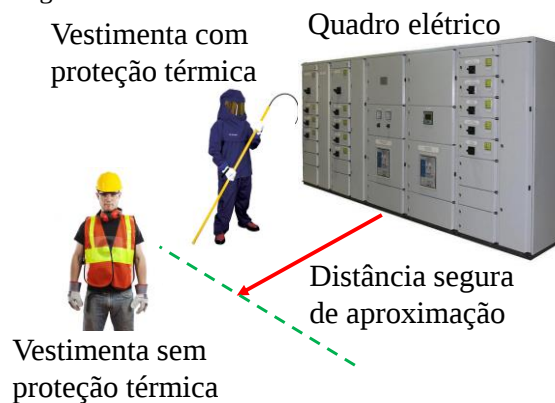
Figura 4 – Probabilidade de sobrevivência em um acidente arco elétrico.



Fonte: Adaptado de (SAFFLE, 1995).

Outro problema associado à energia incidente é a possibilidade de ignição das vestimentas do trabalhador, aumentando consideravelmente os efeitos de possíveis queimaduras. Uma importante medida para proteção contra os efeitos térmicos dos arcos elétricos é a utilização de vestimentas com grau ATPV adequado e a definição de uma distância segura de aproximação, a qual é definida como sendo a distância da fonte de arco no qual um trabalhador sem proteção é exposto a uma energia de  $1,2 \text{ cal}/\text{cm}^2$ , causando-lhe queimaduras de segundo grau. A Figura 5 ilustra o conceito de distância segura de aproximação.

Figura 5 – Distância segura de aproximação em sistemas energizados.



Fonte: Os autores, 2019.

A seguir será apresentado a metodologia para o cálculo da energia incidente e da distância segura de aproximação presente na norma IEEE 1584/2018 e os critérios de determinação do grau ATPV dos EPIs com base na NFPA 70E/2018.

### III. CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE E GRAU ATPV

Esta seção apresenta, inicialmente, o método proposto na norma IEEE 1584/2018 para o cálculo da corrente de arco, da energia incidente e da distância segura de aproximação. Na sequência, são apresentados os critérios de seleção da categoria ATPV dos EPIs conforme as recomendações da NFPA 70E/2018.

#### A. Método do IEEE 1584

A norma IEEE 1584 fornece um guia com técnicas para determinação da distância segura de aproximação e da energia incidente durante a realização de atividades junto a equipamentos elétricos ou proximidades de sistemas energizados (IEEE, 2018). Devido a sua abrangência, as técnicas presentes na IEEE 1584 tornaram-se as metodologias de cálculo mais difundidas no mundo.

A metodologia descrita na IEEE 1584 é fundamentada em modelos estatísticos e no ajuste de curvas com base em uma série de ensaios realizados pelo grupo de trabalho dessa norma (DAS, 2012). Essa metodologia pode ser aplicada a sistemas trifásicos, em configuração fechada ou aberta, em baixa ou média tensão. Todavia, riscos relativos à projeção de estilhaços ou material derretido, ondas de pressão e fumaça tóxica ainda não são considerados nessa norma (IEEE, 2018). Além disso, a aplicabilidade é restrita aos limites apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Limites de aplicação da IEEE 1584.

| Parâmetro                    | Faixa de aplicação |
|------------------------------|--------------------|
| Tipo de defeito              | Trifásico          |
| Nível de tensão              | 0,208 a 15 kV      |
| Frequência                   | 50 a 60 Hz         |
| Corrente de curto-circuito   | 0,7 a 106 kA       |
| Espaçamento entre condutores | 13 a 152 mm        |

Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018).

De acordo com norma IEEE 1584 (2018), a corrente de arco depende, principalmente, da corrente de curto-circuito, da distância entre os condutores e do tipo de ambiente. Em sistemas de média tensão (MT), no entanto, a impedância proporcionada pelo afastamento dos condutores e o tipo de ambiente possuem pouca influência na corrente de arco, de modo que a norma propõe duas equações para o cálculo da corrente de arco: uma para sistemas de baixa tensão (BT), isto é, até 1 kV; e outra para sistemas de média tensão entre 1 e 15 kV. Para sistemas de baixa tensão, aplica-se a Equação 1.

$$I_a = 10^{[K + (0,662 + 0,559V - 0,003G) \log_{10}(I_{3\phi}) + 0,097V + 0,00053G]} \quad (1)$$

Em que:

$I_a$  é a corrente de arco em kA;

$K$  é  $-0,153$  para arcos em ambientes abertos e  $-0,097$  para ambientes fechados;

$I_{3\phi}$  é a corrente de curto-circuito trifásica em kA;

$V$  é a tensão do sistema em kV;

$G$  é a distância entre os condutores em mm.

A distância entre os condutores,  $G$ , pode ser estimada com base nas distâncias típicas previstas na norma, conforme apresentado na Tabela 2.

Para sistemas de média tensão, a corrente de arco pode ser estimada por meio da Equação 2.

$$I_a = 10^{[0,00402 + 0,983 \log_{10}(I_{3\phi})]} \quad (2)$$

De posse do valor da corrente de arco, calcula-se o valor da energia incidente normalizada utilizando-se a Equação (3). Essa energia é padronizada em ensaios laboratoriais considerando arcos com tempo de extinção de 200 ms e trabalhos a uma distância do ponto de origem do arco de 610 mm.

$$E_{inc}^* = 10^{[K_1 + K_2 + 1,081 \log_{10}(I_a) + 0,0011G]} \quad (3)$$

Em que:

$E_{inc}^*$  é a energia incidente normalizada em J/cm<sup>2</sup>;

$K_1$  é  $-0,792$  para ambientes abertos e  $-0,555$  para ambientes fechados;

$K_2$  é 0 para sistemas isolados ou aterrados por alta resistência e  $-0,113$  para sistemas solidamente aterrados.

Tabela 2 – Distâncias típicas entre condutores e fatores de distância propostos na IEEE 1584.

| Tensão do sistema (kV) | Tipo de instalação     | Distância típica (mm) | Fator de distância (x) |
|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| 0,208 ≤ V ≤ 1,0        | Ambiente aberto        | 10 – 40               | 2,000                  |
|                        | Painel de distribuição | 32                    | 1,473                  |
|                        | CCM e painel           | 25                    | 1,641                  |
|                        | Cabos                  | 13                    | 2,000                  |
| 1,0 < V ≤ 5,0          | Ambiente aberto        | 102                   | 2,000                  |
|                        | Painel de distribuição | 13 – 102              | 0,973                  |
|                        | Cabos                  | 13                    | 2,000                  |
|                        | Ambiente aberto        | 13 – 153              | 2,000                  |
| 5,0 < V ≤ 15           | Painel de distribuição | 153                   | 0,973                  |
|                        | Cabos                  | 13                    | 2,000                  |

Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018).

A energia incidente determinada na Equação 3 deve ser posteriormente corrigida para as condições reais do equipamento analisado. Essa correção requer o conhecimento das características de atuação dos dispositivos de proteção e da distância real de trabalho no equipamento analisado.

A partir das características dos dispositivos de proteção, deve-se determinar o tempo total de interrupção do defeito trifásico que dá origem ao arco elétrico, incluindo, quando for o caso, o tempo de abertura do disjuntor. Esse tempo pode ser obtido por meio das curvas tempo-corrente fornecidas na folha de dados do dispositivo de proteção.

Conforme a norma IEEE 1584 (2018), o cálculo da energia incidente é realizado a fim de obter o nível de exposição da face do trabalhador à energia emitida pelo arco elétrico. Assim, deve-se considerar como distância de trabalho o afastamento entre o ponto de formação do arco no equipamento e a face do trabalhador durante a execução dos serviços. A Tabela 3 apresenta estimativas da IEEE 1584 para as distâncias de trabalho típicas de alguns equipamentos.

Tabela 3 – Distâncias típicas de trabalho recomendadas pela IEEE 1584.

| Tipo de equipamento | Distância de trabalho típica (mm) |
|---------------------|-----------------------------------|
| Painel de 5 kV      | 910                               |
| Painel de 15 kV     | 910                               |
| Painel de BT        | 610                               |
| CCMs e QGBTs        | 455                               |
| Cabos               | 455                               |
| Outros              | Determinada em campo              |

Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018).

Conhecendo-se o tempo de extinção do arco e a distância de trabalho, pode-se determinar a energia incidente corrigida por meio da Equação 4.

$$E_{inc} = 4,184CE_{inc}^* \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610}{D} \right)^x \quad (4)$$

Em que:

$E_{inc}$  é a energia incidente corrigida em J/cm<sup>2</sup>;

$C$  é um fator de cálculo igual a 1 para MT e 1,5 para

BT;

$t$  é o tempo de extinção do arco em segundos;

$D$  é a distância de trabalho em mm;

$x$  é o fator de distância obtido na Tabela 1.

A fim de considerar possíveis variações na corrente de arco ou no tempo de abertura do dispositivo de proteção contra sobrecorrentes, é recomendado que seja determinada a energia incidente para o tempo de duração do arco para uma segunda corrente de arco igual a  $0,85I_a$ .

Por fim, sabendo-se que a distância segura de aproximação,  $D_s$ , corresponde à distância do ponto de formação do arco no qual a energia incidente é igual a 1,2 cal/cm<sup>2</sup> ou 5 J/cm<sup>2</sup>, pode-se obter, partindo-se da Equação 4, que  $D_s$  será dado pela Equação 5.

$$D_s = \left[ CE_{inc}^* \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610}{5,0} \right)^x \right]^{\frac{1}{x}} \quad (5)$$

A partir dos resultados obtidos com a análise de energia incidente, pode-se determinar a categoria de risco ou grau ATPV dos EPIs dos trabalhadores. A seguir serão discutidos os critérios de seleção da NFPA 70E/2018.

## B. Especificação do grau ATPV

A NFPA 70E é uma norma americana que estabelece práticas de segurança para trabalhadores de serviços com eletricidade. No tocante aos arcos elétricos, essa norma propõe métodos para determinação da energia incidente e distância segura de aproximação e seleção do grau de proteção ou categoria ATPV dos EPIs dos trabalhadores (NFPA, 2018).

A seleção dos EPIs é facilitada pela NFPA 70E por meio da utilização de tabelas que relacionam a categoria ATPV com a energia incidente na distância de trabalho. A categoria ATPV dos EPIs é definida pela norma ASTM F1959-06 e representa a energia incidente que resulta em uma probabilidade 50% de que o calor transferido através do material que compõe o EPI provoque lesões na pele com queimaduras de segundo grau, com base modelo empírico *Stoll Response* (DAS, 2012).

O grau de proteção ATPV é dividida em quatro categorias, conforme apresentado na Tabela 4. A classificação dos EPIs nessas categorias é feita por meio de testes padronizados sob diferentes condições de corrente de arco e tempo de exposição.

Quando, para um determinado equipamento, a energia incidente na distância de trabalho supera 40cal/cm<sup>2</sup>, somente é permitido serviços com a instalação desenergizada, uma vez que não existem EPIs capazes de fornecer proteção adequada para esse nível de energia incidente. Por outro lado, quando a energia incidente é inferior a 1,2 cal/cm<sup>2</sup>, é suficiente para os trabalhos vestimentas fabricadas em fibra natural não tratada com gramatura mínima de 152 g/cm<sup>2</sup>, além de óculos de proteção, protetor auricular e luvas (RÔMULO, 2012).

Tabela 4 – Suportabilidade térmica nominal das categorias ATPV previstas na NFPA 70E.

| Categoria ATPV | Suportabilidade térmica nominal (cal/cm <sup>2</sup> ) | Energia incidente (cal/cm <sup>2</sup> ) |
|----------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1              | 4                                                      | $1,2 \leq E_{inc} \leq 4$                |
| 2              | 8                                                      | $4 < E_{inc} \leq 8$                     |
| 3              | 25                                                     | $8 < E_{inc} \leq 25$                    |
| 4              | 40                                                     | $25 < E_{inc} \leq 40$                   |

Fonte: Adaptado de (DAS, 2012).

Na seção a seguir será demonstrado, por meio de um estudo de caso, a aplicação das metodologias descritas para uma instalação de média tensão.

Fonte: Os autores, 2019.

A Figura 7 também apresenta os ajustes dos disparadores térmico (ST Pickup) e magnético (Inst. Pickup), além de indicadores da corrente de falta (DJ QGF – 3P), da corrente de carga total do circuito (CARGA-FLA) e da capacidade de condução do cabo do secundário (C. SEC. Ampacity) e a curva de capacidade térmica do cabo do secundário (C. SEC. - P).

Para o defeito trifásico, considerando um ambiente fechado, obtém-se pela Equação 1 uma corrente de arco,  $I_a$ , de 6,0118 kA. Utilizando-se 85% de  $I_a$ , isto é 5,11 kA, verifica-se um tempo de arco ou de interrupção total falta de 0,31 s, conforme ilustrado na Figura 7.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para a energia incidente e distância segura de aproximação.

### C. Estudo da energia incidente e especificação da categoria ATPV

Para a corrente de arco de 5,11 kA, considerando-se um ambiente aberto, verifica-se por meio da Equação 3 uma energia incidente normalizada de 1,3583 J/cm<sup>2</sup>. A correção desse valor para as condições reais da instalação por meio da Equação 4 resulta em uma energia incidente no plano de trabalho de 4,834 cal/cm<sup>2</sup>, considerando-se: o fator de distância de 1,473, conforme a Tabela 2; a distância de trabalho de 455 mm, conforme a Tabela 3; e o tempo de arco de 0,31 s.

A partir da Equação 5, verificou-se que a distância segura de aproximação é de aproximadamente 1,1771 m, isto é, a partir dessa distância do ponto de formação do arco, a energia incidente é inferior a 1,2 cal/cm<sup>2</sup>, dispensando o uso de EPIs especiais com proteção antichama.

Utilizando-se as recomendações da NFPA 70E discutidas na Seção 3.2, verificou-se, a partir da Tabela 4, que são requeridos EPIs com categoria ATPV 2, isto é, com suportabilidade térmica nominal de 8 cal/cm<sup>2</sup>.

## V CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um dos principais riscos associados às atividades envolvendo equipamentos energizados é a energia incidente resultante de uma explosão elétrica, que pode gerar, entre outros danos, graves queimaduras na pele. Nestas circunstâncias, o uso de EPIs com categoria de proteção ATPV adequado e delimitação de uma distância segura de aproximação, conforme previsto na NR 10, são fundamentais para minimizar os danos produzidos pela explosão.

Por outro lado, a legislação nacional não detalha metodologias que orientem o engenheiro eletricista nos estudos de energia incidente, os quais servem de base para determinação das medidas de proteção contra os efeitos térmicos de uma explosão elétrica. Sendo assim, faz-se necessário, portanto, para condução do estudo de energia incidente, o uso de normas internacionais, como a IEEE1584/2018 e a NFPA 70E/2018, muitas vezes desconhecidas pelos projetistas.

Neste trabalho, demonstrou-se, por meio de um estudo de caso, a aplicação da metodologia proposta na IEEE1584/2018 e as orientações da NFPA 70E/2018 para

o estudo da energia incidente e determinação do grau de proteção ATPV dos EPIs de trabalhadores de uma instalação de média tensão. O estudo de caso foi realizado no QGF de uma subestação de 500 kVA em 13,8/0,38 kV da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, localizada no município de Mossoró, RN.

No estudo, verificou-se que, na ocorrência de um defeito trifásico no QGF da instalação, será produzida uma corrente de falta de 11,44 kA, e um arco elétrico de cerca de 5,11 kA. Para essa corrente de arco, verificou-se que o tempo de extinção do defeito pela proteção é de 0,31 s e que a energia incidente na distância de trabalho é de 4,834 cal/cm<sup>2</sup>, exigindo, de acordo com a NFPA 70E, vestimentas com categoria de risco ATPV grau 2. Constatou-se, ainda, que a distância segura de aproximação, ou seja, a distância da fonte do arco na qual a energia incidente é 1,2 cal/cm<sup>2</sup>, é de cerca de 1,1771 m.

Com o estudo de energia incidente, pode-se demonstrar, de forma clara e objetiva, a aplicação das normas IEEE1584/2018 e NFPA 70E/2018 para correta especificação das vestimentas antichama para a proteção dos efeitos térmicos dos arcos elétricos. Por meio desse trabalho, espera-se que estudantes de engenharia elétrica ou profissionais já inseridos no mercado de trabalho possam tomar conhecimento e compreender os principais métodos e padrões de referência utilizados no estudo de energia incidente.

## REFERÊNCIAS

RANDELA, Robert. **Arc flash data collection and system modelling**. EE Publishers. Technology & Business for Development. 12 de abril de 2016. Disponível em: <https://www.ee.co.za/article/arc-flash-data-collection-system-modelling.html>. Acesso em 5 de julho de 2019.

AMPSAFE. Arc Flah. 2019. Página inicial. Disponível em: <http://www.ampsafe.com/services/arc-flash>. Acesso em 5 de julho de 2019.

SAFFLE, Jeffrey R. et al. **Recent outcomes in the treatment of burn injury in the United States**: a report from the American Burn Association Patient Registry. The Journal of burn care & rehabilitation, v. 16, n. 3, p. 219-232, 1995.

QUEIROZ, Alan Rômulo Silva; SENGGER, Eduardo Cesar. **A natureza e os riscos do arco elétrico**. Revista: O setor elétrico. Edição 72, 2012.

RÔMULO, Alan; SENGGER, Eduardo. **A NFPA 70E e os requisitos de segurança para arco elétrico Seleção de EPIs**. Revista: O setor elétrico. Edição 74, 2012.

IEEE STD. IEEE 1584-2018: **IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations**. 2018.

GAMMON, Tammy et al. “Arc flash” hazards, incident energy, PPE ratings and thermal burn injury-A deeper look. In: 2015 IEEE IAS Electrical Safety Workshop. IEEE, 2015. p. 1-9.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 10:  
Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade.  
2016.