

# Avaliação de Energia Incidente Utilizando o Software ATPDraw e a IEEE Std 1584-2018

Marina Camponogara\*, Ana P. G. Marchesan\*, 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: camponogaramarina@gmail.com, anagmarchesan@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 thermal risk is accepted as the most significant risk of an electric arc once most hospitalizations for electrical accidents refer to burns caused by electric arc. Thereby, incident energy estimation is one of the most relevant elements in arc flash risk assessment, because it represents the amount of impressed energy in a surface during the occurrence of an arc flash event. Among the methods of incident energy estimation, IEEE Std 1584 is the most widespread, because of the extent of this applicability. Using IEEE Std 1584-2018 and ATPDraw software, an analysis of incident energy was performed for an IEEE 34 Bus's transformer. As results, the authors bring estimated value of incident energy and, arc-flash boundary and present guidelines to select personal protective equipment (PPE).

**Resumo:** O risco térmico é aceito como o risco mais significante de um arco elétrico, uma vez que a maioria das internações por acidentes elétricos são referentes a queimaduras causadas por arco elétrico. Diante disso, a estimação da energia incidente é um dos elementos mais relevantes na análise de risco de arco elétrico, pois representa a quantidade de energia impressa em uma superfície durante a ocorrência de um evento de arco elétrico. Entre os métodos de estimação de energia incidente, a IEEE Std 1584 é o mais difundido, em função da extensão de sua aplicabilidade. Utilizando a IEEE Std 1584-2018 e o *software* ATPDraw, uma avaliação da energia incidente foi realizada para um transformador da rede IEEE 34 Barras. Como resultados, os autores trazem o valor estimado de energia incidente e o limite de arco e apresentam orientações para a seleção de equipamento de proteção individual (EPI).

**Keywords:** Electric arc; incident energy; IEEE Std 1584; ATPDraw; arc-flash boundary.

**Palavras-chaves:** Arco elétrico; energia incidente; IEEE Std 1584; ATPDraw; limite de arco.

## 1. INTRODUÇÃO

Um arco elétrico envolve uma transferência intensa de energia térmica do sistema para o ambiente em torno da falta (Floyd *et al.*, 2005). O risco térmico é geralmente aceito como o risco mais significante de um arco elétrico, uma vez que a maioria das internações hospitalares devido a acidentes elétricos são referentes a queimaduras causadas por arco elétrico (Mohla *et al.*, 2010). Para proteger o trabalhador desse risco, o equipamento de proteção individual é requerido (Doan e Sweigart, 2003).

Outros riscos inerentes a este evento incluem grandes volumes de fumaça tóxica, partículas de material condutor derretido, estilhaços, luz extremamente intensa e uma onda de pressão proveniente da rápida expansão dos gases (Lang, Neal e Wilkins, 2007).

Para definir medidas de proteção ao trabalhador, a estimação da energia incidente apresenta-se como um dos elementos mais importantes e essenciais da análise de riscos de um arco elétrico (Ammerman, Sen e Nelson, 2007). Neste trabalho, a

energia incidente no secundário de um transformador é estimada com base no modelo da IEEE Std 1584-2018, utilizando o *software* ATPDraw para a obtenção dos valores de curto-circuito. Com base no valor estimado de energia incidente, é possível traçar medidas de proteção ao trabalhador, como o limite do arco e o grau de proteção do EPI a ser utilizado.

## 2. ENERGIA INCIDENTE

A energia incidente é a quantidade de energia térmica impressa em uma superfície, a uma certa distância da fonte (distância de trabalho), durante um evento de arco elétrico e é dada em joules por centímetro quadrado ( $J/cm^2$ ) ou calorias por centímetro quadrado ( $cal/cm^2$ ) (IEEE, 2018). A quantificação da energia incidente é feita através de estudos e é fundamental para a determinação da proteção adequada para se trabalhar em sistemas elétricos energizados.

Modelos dedicados à estimação de energia incidente requerem conhecimento prévio da tensão de circuito aberto do sistema em estudo, bem como da corrente de falta franca no ponto de

ocorrência do arco, tempo de extinção do arco, configuração dos eletrodos, ambiente circundante e a distância entre o trabalhador e o ponto de ocorrência do arco (Ammerman, Sen e Nelson, 2007). Entre os modelos encontrados na literatura, os mais difundidos são os métodos de Lee (Lee, 1982), de Doughty-Neal (Doughty, Neal e Floyd, 2000) e a IEEE Std 1584 (IEEE, 2018), todos aplicáveis a sistemas trifásicos.

Lee (1982) é considerado um trabalho pioneiro em termos de estimação de energia incidente, sendo o primeiro trabalho a propor um método para estimar energia incidente e a distância limite de trabalho. Também chamado de modelo teórico, ele é considerado conservativo pela literatura para aplicações acima de 600 V e se torna mais conservativo a medida que a tensão aumenta, sendo aplicado, porém, a sistemas não atendidos pelos limites de aplicação de IEEE (2018).

Uma vez que o modelo proposto por Lee (1982) é aplicável a sistemas ao ar livre, o método apresentado por Doughty, Neal e Floyd (2000) propõe equações para estimar a energia incidente em sistemas confinados com tensão igual ou inferior a 600 V. Além da limitação de tensão, este modelo também só é aplicável a sistemas com corrente de curto-circuito entre 16 e 50 kA.

Em 2002, foi publicada a primeira versão do guia IEEE Std 1584, um guia cujas equações foram desenvolvidas empiricamente a partir de testes de arco elétrico realizados em laboratórios norte-americanos entre o fim da década de 1990 e os anos 2000 (Lang, Neal e Wilkins, 2007). Sua versão mais recente, publicada em 2018, traz um modelo analítico para calcular a energia incidente para ambientes confinados e não-confinados, cobrindo sistemas trifásicos de 208 V a 15 kV, correntes de falta franca de 200 A a 106 kA, distanciamento entre eletrodos de 6,35 mm a 254 mm e distâncias de trabalho iguais ou superiores a 305 mm (IEEE, 2018). A formulação do modelo (baseada em testes) e seu *range* de aplicação tornam essa norma a mais aplicada entre os métodos de estimação de energia incidente.

### 3. METODOLOGIA

Para realizar o estudo de energia incidente no presente trabalho, optou-se por utilizar a rede IEEE 34 Barras, que representa um modelo de rede de distribuição radial (IEEE, 2020). O ponto de falta escolhido é o secundário do transformador existente, onde o nível de tensão está dentro dos limites de aplicação do modelo escolhido para estimação de energia incidente.

Já a corrente de curto-circuito nesse ponto é calculada utilizando o *software* ATPDraw (ATPDraw, 2020) e, com isso, são aplicadas as equações da IEEE Std 1584-2018. A metodologia aplicada está exemplificada no fluxograma da Fig. 1.

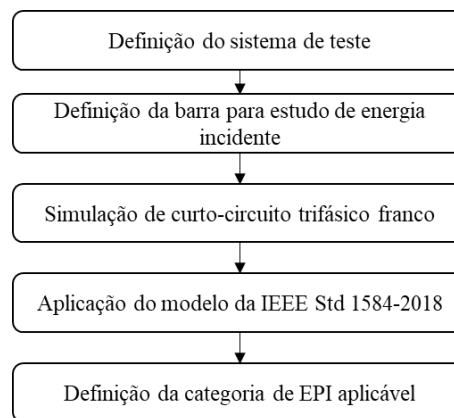


Fig. 1 Etapas da análise de energia incidente.

#### 3.1 Rede IEEE 34 Barras

A rede IEEE 34 Barras é um sistema real, localizado no estado do Arizona, Estados Unidos e é apresentado na Fig. 2. Este sistema é caracterizado por ser longo e levemente carregado, com tensão nominal de 24,9 kV e apresenta um transformador que alimenta uma seção de 4,16 kV (IEEE, 2020).

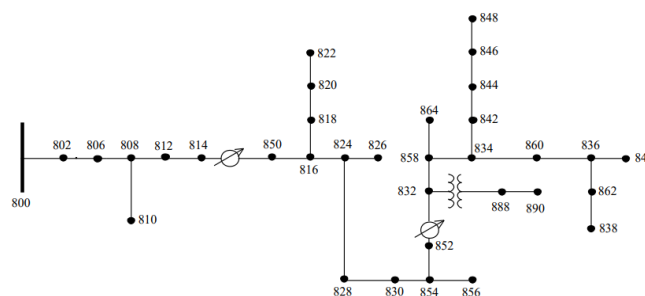


Fig. 2 Sistema IEEE 34 Barras (IEEE, 2020).

Embora se trate de uma rede de distribuição, somente os nós 888 e 890 tem tensões cobertas pela IEEE Std 1584, sendo, portanto, opção dos autores calcular a energia incidente para o transformador que rebaixa a tensão de 24,9 kV para 4,16 kV.

#### 3.2 ATPDraw

O ATPDraw é um pré-processador gráfico acionado por mouse para a versão ATP do Programa de Transitórios Eletromagnéticos (*Electromagnetic Transients Program*, EMTP) no sistema operacional Windows (ATPDraw, 2020). Ele une as funcionalidades do ATP, como estudos de transitórios eletromagnéticos, análise no domínio do tempo e estudos de chaveamento, com a possibilidade de montar o sistema em estudo utilizando componentes existentes nos menus do programa.

Uma das possibilidades de maior destaque neste *software* é a capacidade de calcular curtos-circuitos em redes com diversos níveis de complexidade. O ATPDraw não utiliza nenhuma norma de curto-circuito para os cálculos, sendo assim os resultados obtidos são oriundos da solução numérica de equações diferenciais formuladas através de conceitos de análise de circuitos elétricos.

No presente trabalho, utiliza-se o ATPDraw para modelar o sistema IEEE 34 Barras e simular um curto-circuito franco no lado de 4,16 kV do transformador localizado entre os nós 832 e 888, já que este nível de tensão é contemplado pelo modelo da IEEE Std 1584.

### 3.3 IEEE Std 1584-2018

O modelo para estimação de energia incidente apresentado na IEEE Std 1584-2018 é dividido em duas partes, de acordo com a tensão de circuito aberto do sistema ( $V_{oc}$ ): um modelo para  $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15000 \text{ V}$  e um modelo para  $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$ . Uma vez que a tensão do equipamento em análise é de 4,16 kV, será apresentado apenas o modelo para  $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15000 \text{ V}$ .

A aplicação do modelo tem quatro etapas:

1. Determinar a corrente de arco elétrico;
2. Determinar o tempo de extinção da falta ou duração do arco;
3. Determinar a energia incidente;
4. Determinar o limite do arco;

A corrente de arco, ou corrente de falta por arco, é a corrente elétrica que flui através do plasma gerado pelo evento de arco elétrico. Já a duração do arco, também chamado tempo de extinção da falta, é o tempo total entre o início de uma sobrecorrente específica (ajuste) e a interrupção final do circuito na tensão padrão. O limite de arco, também denominado distância de aproximação segura, é a distância de uma fonte de arco elétrico a partir da qual a energia incidente calculada é  $1,2 \text{ cal/cm}^2$ , ou seja, causa uma queimadura de segundo grau (curável) (IEEE, 2018).

Para determinação desses valores, o modelo utiliza um processo em duas etapas, onde primeiramente são determinados valores intermediários e depois o valor final. Além disso, fica estabelecido no guia que todos os passos sejam refeitos considerando um valor de corrente de arco reduzida. Ao se comparar os resultados obtidos de energia incidente e limite de arco para corrente de arco e corrente de arco reduzida, o resultado da análise serão os maiores valores obtidos.

Primeiramente, a configuração dos condutores ou eletrodos (fases) aplicável ao equipamento em análise deve ser definida. Os eletrodos podem estar confinados e dispostos verticalmente (VCB), verticalmente dispostos terminados em barreira isolante (VCBB), horizontalmente dispostos (HCB), ou ao ar livre, arranjados verticalmente (VOA) ou horizontalmente (HOA). Dados de tensão de circuito aberto, corrente de falta franca, espaçamento de eletrodos e distância de trabalho também devem ser definidos.

Aplica-se (1) para definir os valores intermediários de corrente de arco para 600 V, 2700 V e 14300 V, onde  $I_{arc600}$ ,  $I_{arc2700}$ ,  $I_{arc14300}$  são as correntes de arco intermediárias para 600 V,

2700 V e 14300 V, respectivamente, em kA.  $I_{bf}$  é a corrente de falta franca trifásica em kA.  $G$  é o espaçamento entre condutores, em mm e  $k_1$  a  $k_{10}$  são coeficientes da Tabela 1 de (IEEE, 2018).

$$I_{arcVoc} = 10^{(k_1 + k_2 \log I_{bf} + k_3 \log G)} (k_4 I_{bf}^6 + k_5 I_{bf}^5 + k_6 I_{bf}^4 + k_7 I_{bf}^3 + k_8 I_{bf}^2 + k_9 I_{bf} + k_{10}) \quad (1)$$

Com (2), (3) e (4) são obtidos os valores de interpolação para corrente de arco, onde  $I_{arc1}$  é o primeiro termo da interpolação,  $I_{arc2}$  o segundo termo e  $I_{arc3}$  o terceiro termo.  $V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto do sistema.

$$I_{arc1} = \frac{(I_{arc2700} - I_{arc600})}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + I_{arc2700} \quad (2)$$

$$I_{arc2} = \frac{(I_{arc14300} - I_{arc2700})}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + I_{arc14300} \quad (3)$$

$$I_{arc3} = \frac{I_{arc1} (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{I_{arc2} (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (4)$$

Se a tensão de circuito aberto do sistema é maior que 600 V e menor ou igual a 2700 V, o valor final da corrente de arco  $I_{arc}$  é dado por (5). Se a tensão de circuito aberto for superior a 2700 V, a corrente de arco é obtida empregando (6).

$$I_{arc} = I_{arc3} \quad (5)$$

$$I_{arc} = I_{arc2} \quad (6)$$

Para determinar a duração de arco, empregar a corrente de arco previamente calculada nas curvas tempo-corrente dos dispositivos de proteção existentes no sistema em análise.

Em caso de sistemas confinados, é necessário que se determine o fator de correção do tamanho do ambiente confinado, em casos de configuração VCB, VCBB e HCB. Uma vez que a configuração apresentada nesse artigo é aberta, o fator de correção é igual a 1.

Empregar (7), (8) e (9) para obter os valores intermediários de energia incidente,  $E_{600}$ ,  $E_{2700}$  e  $E_{14300}$ , para 600V, 2700V e 14300 V, respectivamente, em  $\text{J/cm}^2$ .  $T$  é o tempo de extinção da falta (ms),  $D$  a distância de trabalho (mm),  $CF$  o fator de correção do ambiente confinado e  $k_1$  a  $k_{13}$  os coeficientes das Tabelas 3, 4 e 5 da (IEEE, 2018) aplicáveis a (7), (8) e (9), nessa ordem.

$$E_{600} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left( k_1 + k_2 \log G + \frac{k_3 I_{arc600}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} + k_{11} \log I_{bf} + k_{12} \log D + k_{13} \log I_{arc600} + \log\left(\frac{1}{CF}\right) \right)} \quad (7)$$

$$E_{2700} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left( k_1 + k_2 \log G + \frac{k_3 I_{arc2700}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} + k_{11} \log I_{bf} + k_{12} \log D + k_{13} \log I_{arc2700} + \log\left(\frac{1}{CF}\right) \right)} \quad (8)$$

$$E_{14300} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left( k_1 + k_2 \log G + \frac{k_3 I_{arc14300}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} + k_{11} \log I_{bf} + k_{12} \log D + k_{13} \log I_{arc14300} + \log\left(\frac{1}{CF}\right) \right)} \quad (9)$$

Utilizar (10), (11) e (12) para obter o primeiro ( $E_1$ ), o segundo ( $E_2$ ) e terceiro ( $E_3$ ) termos da interpolação de energia incidente, todos em J/cm<sup>2</sup>.

Se a tensão de circuito aberto do sistema é maior que 600 V e menor ou igual a 2700 V, o valor final de energia incidente  $E$  é dado por (13). Se a tensão de circuito aberto for superior a 2700 V, emprega-se (14).

$$E_1 = \frac{(E_{2700} - E_{600})}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + E_{2700} \quad (10) \quad E = E_3 \quad (13)$$

$$E_2 = \frac{(E_{14300} - E_{2700})}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + E_{14300} \quad (11) \quad E = E_2 \quad (14)$$

$$E_3 = \frac{E_1 (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{E_2 (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (12)$$

Empregar (15), (16) e (17) para obter os valores intermediários de limite de arco,  $AFB_{600}$ ,  $AFB_{2700}$  e  $AFB_{14300}$ , em mm, para 600 V, 2700 V e 14300 V, respectivamente. Os coeficientes  $k_1$  a  $k_{13}$  são fornecidos pelas Tabelas 3, 4 e 5 da (IEEE, 2018) aplicáveis a (15), (16) e (17), nessa ordem.

$$AFB_{600} = 10^{\left( \frac{k_1 + k_2 \log G + \frac{k_3 I_{arc600}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} + k_{11} \log I_{bf} + k_{13} \log I_{arc600} + \log\left(\frac{1}{CF}\right) - \log\left(\frac{20}{T}\right)}{-k_{12}} \right)} \quad (15)$$

$$AFB_{2700} = 10^{\left( \frac{k_1 + k_2 \log G + \frac{k_3 I_{arc2700}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} + k_{11} \log I_{bf} + k_{13} \log I_{arc2700} + \log\left(\frac{1}{CF}\right) - \log\left(\frac{20}{T}\right)}{-k_{12}} \right)} \quad (16)$$

$$AFB_{14300} = 10^{\left( \frac{k_1 + k_2 \log G + \frac{k_3 I_{arc14300}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} + k_{11} \log I_{bf} + k_{13} \log I_{arc14300} + \log\left(\frac{1}{CF}\right) - \log\left(\frac{20}{T}\right)}{-k_{12}} \right)} \quad (17)$$

Aplicar (18), (19) e (20) para obter os termos da interpolação do limite de arco.  $AFB_1$  é o primeiro termo da interpolação,  $AFB_2$  o segundo e  $AFB_3$ , o terceiro. Se a tensão de circuito aberto do sistema é maior que 600 V e menor ou igual a 2700 V, o valor final do limite de arco é dado por (21). Se a tensão de circuito aberto for superior a 2700 V, utilizar (22).

$$AFB = AFB_3 \quad (21)$$

$$AFB = AFB_2 \quad (22)$$

$$AFB_1 = \frac{(AFB_{2700} - AFB_{600})}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + AFB_{2700} \quad (18)$$

$$AFB_2 = \frac{(AFB_{14300} - AFB_{2700})}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + AFB_{14300} \quad (19)$$

$$AFB_3 = \frac{AFB_1 (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{AFB_2 (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (20)$$

Para obter o valor de corrente de arco reduzida  $I_{arcmin}$ , empregar (23). O fator de correção de variação é aplicado as correntes de arco intermediárias quando a tensão do sistema é superior a 600 V. Os coeficientes  $k_1$  a  $k_7$  são fornecidos pela Tabela 2 de (IEEE, 2018).

$$I_{arcmin} = I_{arc} \times \left[ 1 - 0,5 \times (k_1 V_{oc}^6 + k_2 V_{oc}^5 + k_3 V_{oc}^4 + k_4 V_{oc}^3 + k_5 V_{oc}^2 + k_6 V_{oc} + k_7) \right] \quad (23)$$

#### 4. RESULTADOS

Para obter o valor da corrente de curto-circuito trifásico franco, uma simulação de curto-circuito é feita para o secundário de um transformador 24,9/4,16 kV, 500 kVA, utilizando o *software* ATPDraw. Os resultados para as fases A, B e C, indicados pelas curvas vermelha, verde e azul, respectivamente, são apresentados na Fig. 3. Os valores de IRMSA, IRMSB e IRMSC são 704,17 A, 715,08 A e 692,4 A.

A diferença dos valores de corrente por fase é devido a se tratar de uma rede de distribuição, com natureza desbalanceada. Para os cálculos o valor de corrente assumido será o maior valor encontrado, 715,08 A.

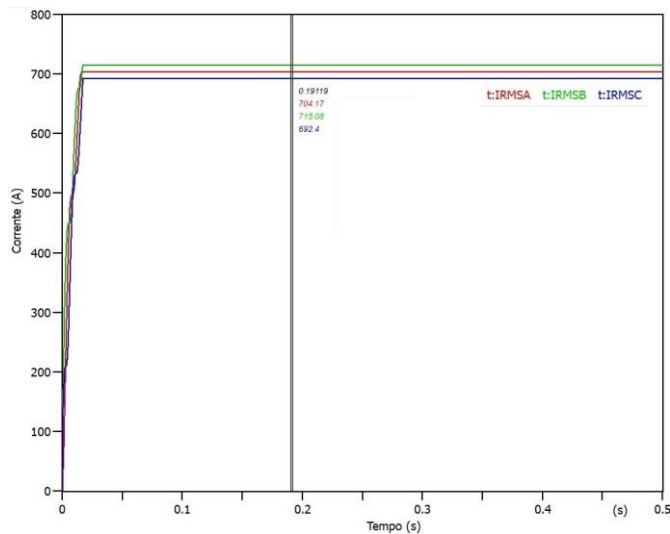


Fig. 3 Curto-circuito no *software* ATPDraw.

Uma vez que se está analisando o secundário de um transformador da rede de distribuição e que, considerando-se sua potência, este deve estar instalado em solo, a orientação dos eletrodos é considerada como horizontal ao ar livre (HOA). Os parâmetros para aplicação do modelo são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1. Parâmetros.**

Parâmetro	Valor
V <sub>oc</sub> (kV)	4,16
I <sub>br</sub> (kA)	0,71508
G (mm)	104
D (mm)	914,4
CF	1

Conhecidos os parâmetros de corrente de falta franca e de tensão de circuito aberto do sistema, é possível calcular a

corrente de arco considerando-se os coeficientes apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2. Coeficientes k<sub>1</sub> a k<sub>7</sub> para configuração HOA conforme a Tabela 1 da (IEEE, 2018).**

Tensão de circuito aberto	600 V	2700 V	14300 V
<b>Coefficiente</b>			
<b>k<sub>1</sub></b>	0,111147	0,000435	0,000904
<b>k<sub>2</sub></b>	1,008	1,006	0,999
<b>k<sub>3</sub></b>	-0,24	-0,038	-0,02
<b>k<sub>4</sub></b>	0	0	0
<b>k<sub>5</sub></b>	0	0	0
<b>k<sub>6</sub></b>	-3,895E-9	7,859E-10	7,859E-10
<b>k<sub>7</sub></b>	1,641E-6	-1,914E-7	-1,914E-7
<b>k<sub>8</sub></b>	-0,000197	-9,128E-6	-9,128E-6
<b>k<sub>9</sub></b>	0,002615	-0,0007	-0,0007
<b>k<sub>10</sub></b>	1,1	0,9981	0,9981

O valor de corrente de arco será:

$$I_{\text{arc}} = 604,2 \text{ A}$$

A partir do valor da corrente de arco previamente calculado, o tempo de extinção do arco é definido. O tempo estabelecido foi de 0,32 segundos. Com este e os demais parâmetros apresentados na Tabela 1, é possível determinar a energia incidente e o limite de arco, com o auxílio da Tabela 3.

**Tabela 3. Coeficientes k<sub>1</sub> a k<sub>13</sub> para configuração HOA conforme as Tabelas 3, 4 e 5 da (IEEE, 2018).**

Tensão de circuito aberto	600 V	2700 V	14300 V
<b>Coefficientes</b>			
<b>k<sub>1</sub></b>	3,470417	3,616266	2,04049
<b>k<sub>2</sub></b>	0,465	0,149	0,177
<b>k<sub>3</sub></b>	-0,261863	-0,761561	1,005092
<b>k<sub>4</sub></b>	0	0	0
<b>k<sub>5</sub></b>	0	0	0
<b>k<sub>6</sub></b>	-3,895E-9	7,859E-10	7,859E-10
<b>k<sub>7</sub></b>	0,000001641	-1,914E-7	-1,914E-7
<b>k<sub>8</sub></b>	-0,000197	-9,128E-6	-9,128E-6
<b>k<sub>9</sub></b>	0,002615	-0,0007	-0,0007
<b>k<sub>10</sub></b>	1,1	0,9981	0,9981
<b>k<sub>11</sub></b>	0	0	-0,05
<b>k<sub>12</sub></b>	-1,99	-1,639	-1,633
<b>k<sub>13</sub></b>	1,04	1,078	1,151

Os valores de energia incidente e do limite de arco serão:

$$E = 1,2638 \text{ J/cm}^2$$

AFB=393,7249 mm

Os cálculos anteriormente realizados são refeitos a partir da corrente de arco reduzida, calculada utilizando os coeficientes apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4. Coeficientes  $k_1$  a  $k_7$  para configuração HOA conforme as Tabelas 3, 4 e 5 da (IEEE, 2018).**

Coeficiente	Valor
$k_1$	0
$k_2$	-3,1555E-6
$k_3$	0,0001682
$k_4$	-0,0034607
$k_5$	0,03412
$k_6$	-0,1599
$k_7$	0,34629

$I_{arc} = 583,35$  A

$E = 1,2573$  J/cm<sup>2</sup>

AFB=392,6891 mm

Os valores finais de energia incidente e limite de arco são os maiores valores obtidos entre os calculados para corrente de arco e corrente de arco reduzida. Portanto, a energia incidente estimada para o terminal secundário do transformador em análise é de 1,2638 J/cm<sup>2</sup> (0,3021 cal/cm<sup>2</sup>) e o limite de arco é estabelecido em 393,7249 mm.

Para o nível de energia incidente calculado, o trabalhador deve utilizar vestimenta resistente ao arco para exposições entre 1,2 cal/cm<sup>2</sup> e 12 cal/cm<sup>2</sup>, conforme (NFPA, 2018), que contempla as seguintes peças:

- Calça e camisa de manga comprida resistentes ao arco ou macacão resistente ao arco;
- Protetor facial resistente ao arco ou balaclava especificada para arco;
- Luva isolante de borracha com protetores de couro para proteção contra arco e choque;
- Calçado de couro;
- Protetor auricular;
- Capacete;
- Óculos de segurança.

As roupas de baixo do usuário também devem ser feitas de material que não funda, conforme (ASTM, 2020).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou uma análise de risco de arco elétrico para o nó 888 da rede IEEE 34 Barras, empregando o *software* ATPDraw para simulação do curto-circuito e as equações da IEEE Std 1584-2018 para estimar os valores de energia incidente e de limite de arco.

O guia IEEE Std 1584-2018 provém o modelo de estimação de energia mais difundido atualmente, tanto na academia quanto na indústria. Elaborado com base em testes experimentais, ele

tem maior alcance em relação a outros métodos já estabelecidos, tais como os métodos de Lee e de Doughty-Neal. O trabalho proposto exemplifica a utilização do guia e apresenta resultados satisfatórios e coerentes. No entanto, para que o modelo seja melhor utilizado, encoraja-se a utilização e o desenvolvimento de ferramentas computacionais, como uso de *softwares* matemáticos para implementação do modelo ou até mesmo específicos para cálculo de energia incidente para casos em que se deseja realizar o estudo de curto-circuito e seletividade junto com o estudo de energia incidente. Dessa maneira, automatiza-se os procedimentos de simulação e cálculo, expandindo a quantidade de análises, além de evitar o erro humano em decorrência da complexidade das equações propostas.

O cenário avaliado neste trabalho pode ser considerado gerenciável, uma vez que o nível de energia incidente calculado é reduzido, por estar próximo ao limiar para queimaduras curáveis e o ambiente de ocorrência do arco elétrico não é confinado.

A possibilidade de adoção de vestimenta que cobre níveis de energia incidente de 1,2 cal/cm<sup>2</sup> a 12 cal/cm<sup>2</sup> provém um maior nível de proteção do que se fosse a escolha de vestimenta com base nas quatro categorias estabelecidas em (NFPA, 2018), já que neste caso, a energia incidente calculada seria enquadrada na categoria 1, que protege exposições até 4 cal/cm<sup>2</sup>.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro da CPFL Energia pelo projeto “Metodologia e Ferramenta Computacional para Avaliação e Modelagem das Condições de Arco Elétrico em Sistemas Elétricos de Potência no Contexto Brasileiro” (desenvolvido no âmbito do programa de P&D/ANEEL PD-00063-3069/2020). Este estudo foi realizado também com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- Ammerman, R. F., Sen, P. K. and Nelson, J. P. (2007) ‘Arc Flash Hazard Incident Energy Calculations a Historical Perspective and Comparative Study of the Standards: IEEE 1584 and NFPA 70E’, in *2007 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference*. Calgary, Canada.
- ASTM International. *Standard Performance Specification For Flame Resistant And Electric Arc Rated Protective Clothing Worn By Workers Exposed To Flames And Electric Arcs*, ASTM F1506-20.
- ATPDraw (2020) *ATPDraw*. Available at: <https://www.atpdraw.net/> (Accessed: 4 June 2020).
- Doan, D. R. and Sweigart, R. A. (2003) ‘A Summary of Arc-Flash Energy Calculations’, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(4), pp. 1200–1204.
- Doughty, R. L., Neal, T. E. and Floyd, H. L. (2000) ‘Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on

600-V power distribution systems', *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(1), pp. 257–269.

Floyd, H. L. *et al.* (2005) 'Arc flash hazards and electrical safety program implementation', in *Fortieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005*. IEEE, pp. 1919–1923.

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

IEEE (2020) *34-Bus Feeder*. Available at: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/#:~:text=34-bus Feeder%3A This feeder,unbalanced loading%2C and shunt capacitors.> (Accessed: 4 June 2020).

Lang, M., Neal, T. and Wilkins, R. (2007) 'Introduction to arc flash', in *2007 8th International Conference on Electric Fuses and their Applications*. Clermont-Ferrand, France.

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

Mohla, D. C. *et al.* (2010) 'Mitigating electric shock and arc flash energy - A total system approach for personnel and equipment protection', in *2010 Record of Conference Papers Industry Applications Society 57th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC)*. San Antonio, TX, USA.

National Fire Protection Association. *Electrical Safety in the Workplace*. NFPA 70E-2018 (Revision of NFPA 70E-2015), 2018.