

# Capítulo IV

## A NFPA 70E e os métodos para cálculo de energia incidente

Por Alan Rômulo e Eduardo Senger\*

No artigo anterior, foram abordados os principais pontos da NFPA 70E que tratam dos Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) recomendados para as atividades que envolvem o risco de arco elétrico. Também foi apresentada uma forma de selecionar as vestimentas de proteção e os demais EPIs por meio da utilização de um método simplificado e pela aplicação de tabelas.

Este artigo tem como objetivo apresentar a outra metodologia de seleção de EPIs prevista na NFPA 70E, por meio do cálculo de energia incidente.

### *Métodos para cálculo de energia incidente*

Os métodos para realização do cálculo de energia incidente estão disponíveis, de maneira resumida, no Anexo Informativo D (Incident Energy and Arc Flash Boundary Calculation Methods), da NFPA 70E. Cabe ressaltar que os anexos dessa norma não fazem parte dos seus requisitos e estão incluídos apenas para fins informativos.

### *Método proposto por Doughty e Neal*

Este método foi proposto em um artigo intitulado “Predicting Incident Energy to Better Manage the Electric Arc Hazard on 600 V Power Distribution Systems”, publicado por Doughty e Neal, em 1998.

As equações dispostas nesse método podem ser utilizadas para estimar a energia incidente de um arco elétrico em sistemas elétricos trifásicos com tensão nominal igual ou inferior a 600 V. É

fundamental que as equações sejam utilizadas respeitando-se as suas limitações.

Os parâmetros necessários para realização dos cálculos são os seguintes:

- a) Corrente máxima de curto-circuito (primeira etapa do cálculo) e corrente de curto-circuito mínima capaz de autossustentar um arco elétrico (segunda etapa). Para sistemas de 480 V, é aceito pela indústria que o valor mínimo da corrente de curto-circuito capaz de autossustentar um arco elétrico seja equivalente a 38% da corrente de curto-circuito máxima. A exposição a níveis maiores de energia incidente pode ocorrer em níveis menores de curto-circuito, pois o dispositivo de sobrecorrente pode demorar mais tempo para ser sensibilizado e abrir o circuito envolvido na falta.
- b) Tempo total para atuação da proteção à montante do ponto de origem do arco elétrico para as condições de máxima corrente de curto-circuito e para a corrente de curto-circuito mínima capaz de autossustentar um arco elétrico.
- c) Distância do trabalhador a partir do ponto de origem do arco até o ponto em que a tarefa será executada. As distâncias típicas de trabalho utilizadas para os cálculos de energia incidente são:

- Quadros de distribuição e CCMs de baixa tensão (com tensão igual ou inferior à 600 V) – 455 mm;
- Painéis de distribuição de baixa tensão (com tensão

igual ou inferior a 600 V) – 610 mm;

- Painel de distribuição de média tensão (acima de 600V) – 910 mm.

Após o levantamento das informações prévias, é possível proceder os cálculos de energia incidente. Para arcos elétricos ocorridos em ambientes abertos, deve ser utilizada a seguinte equação:

$$E_{MA} = 5271 \times D_A^{-1,9593} \times t_A \times [0,0016F^2 - 0,0076F + 0,8938]$$

Em que:

EMA= energia incidente máxima em ambiente aberto, em cal/cm<sup>2</sup>;

DA = distância de trabalho do ponto de arco elétrico, em polegada;

tA = tempo de duração do arco, em segundos;

F = corrente de curto-circuito, em kA (na faixa de 16 kA a 50 kA).

Para arcos ocorridos em ambientes fechados, deve ser aplicada a equação a seguir para estimativa de energia incidente. Enquadram-se, nesse caso, arcos elétricos ocorridos no interior de painéis, CCMs ou outro tipo de compartimento.

$$E_{MB} = 1038,7 \times D_B^{-1,4738} \times t_A \times [0,0093F^2 - 0,3453F + 5,9675]$$

Em que:

EMB= energia incidente máxima em ambiente fechado, em cal/cm<sup>2</sup>;

DB = distância de trabalho do ponto de arco elétrico, em polegada;

tA = tempo de duração do arco, em segundos;

F = corrente de curto-circuito, em kA (na faixa de 16 kA a 50 kA).

#### **Método de Ralph Lee para instalações superiores a 600 V**

Este método pode ser aplicado para estimar os valores de energia incidente produzidos por um curto-circuito trifásico em ambiente aberto para tensões superiores a 600 V. Para realização dos cálculos, os seguintes parâmetros são requeridos:

- a) Corrente máxima de curto-circuito trifásico.
- b) Tempo total para atuação da proteção à montante do ponto de origem do arco elétrico para a condição de máxima corrente de curto-circuito.
- c) Distância do trabalhador a partir do ponto de origem do arco até o ponto em que a tarefa será executada. Se o tempo para atuação do dispositivo de proteção for superior a dois segundos, deve-se considerar por quanto tempo a pessoa irá permanecer no local em que ocorreu o arco elétrico. É provável que uma pessoa exposta a um arco elétrico se afaste rapidamente se for fisicamente possível. Dessa forma, dois segundos é o tempo máximo razoável para realização dos cálculos. Trabalhadores que estiverem executando atividades no interior de painéis, por exemplo, necessitarão de mais tempo para se afastarem do ponto de origem do arco. Essa situação deve ser analisada previamente.

d) Tensão de linha do sistema.

Após a determinação desses parâmetros, a seguinte equação deve ser aplicada:

$$E = \frac{793 \times F \times V \times t_A}{D^2}$$

Em que:

E = energia incidente, em cal/cm<sup>2</sup>;

F = corrente de curto-circuito, em kA;

V = tensão de linha, em V;

t<sub>A</sub> = tempo de duração do arco, em segundos;

D = distância de trabalho do ponto de arco elétrico, em polegadas.

### Método da norma IEEE 1584

O cálculo para estimativa da energia incidente aplicando o disposto na IEEE 1584 é um dos métodos previstos no Anexo D da NFPA 70E. A norma IEEE 1584 é um guia que fornece técnicas para determinação da distância segura para o risco de arco elétrico e energia incidente durante o desenvolvimento de atividades realizadas em um equipamento elétrico ou nas proximidades de um sistema energizado.

Os cálculos estabelecidos na norma IEEE 1584 empregam modelos baseados em análise estatística e ajuste de curvas com base em uma série de ensaios realizados. Por meio desses ensaios, o grupo de trabalho da norma IEEE 1584 desenvolveu novos modelos para o cálculo da energia incidente em sistemas de alta e baixa tensão.

A norma IEEE 1584 é utilizada para o cálculo da energia incidente e determinação dos EPIS para proteção contra arco elétrico para as seguintes características da instalação elétrica:

- Tensão entre 208 V e 15.000 V;
- Sistema trifásico;
- Frequência de 50 Hz a 60 Hz;
- Corrente de curto-circuito de 700 A a 106 kA;
- Espaçamento entre condutores de 13 mm a 152 mm.

Dada sua relevância atual e ampla utilização, a metodologia de cálculo para estimativa de energia incidente aplicando a norma IEEE 1584 será abordada com maiores detalhes no próximo artigo.

### Cálculo de energia incidente em corrente contínua

#### Método da máxima potência

O método para estimativa da energia incidente em instalações de corrente contínua disposto no Anexo D da NFPA foi apresentado no artigo "Arc Flash Calculations for Exposures to DC Systems", de autoria de Daniel Doan, em 2007. Neste artigo, o autor modelou um sistema de corrente contínua, conforme a Figura 1. Neste caso, a fonte é modelada como uma fonte de tensão (V<sub>sys</sub>) e uma

impedância interna (Z<sub>sys</sub>). Também é considerada a impedância do arco (Z<sub>arc</sub>). Para iniciar uma estimativa para os cálculos, o autor considerou uma corrente de arco constante, a fim de utilizar as resistências da fonte e do arco para os cálculos. Qualquer outra indutância no sistema tenderia a reduzir a potência disponível para formação do arco. Adicionalmente, as indutâncias do sistema tenderiam a reduzir a potência durante o curto-circuito, o que limitaria a corrente de arco ao início do curto.

Este método baseia-se no conceito de que a máxima potência possível em um arco em corrente contínua ocorrerá quando a tensão do arco é metade da tensão do sistema.

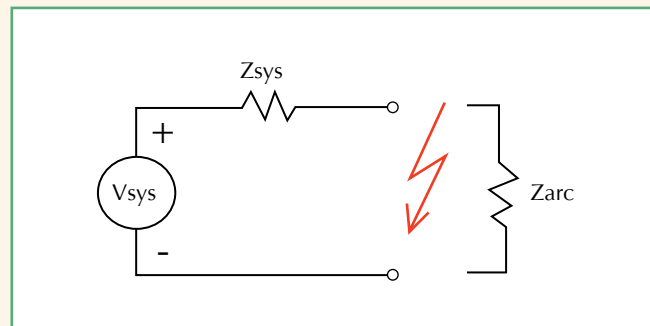


Figura 1 – Modelo simplificado de um sistema de corrente contínua.

Testes complementares demonstraram que essa metodologia de cálculo é altamente conservativa na estimativa da energia incidente. Este método é aplicável para sistemas de corrente contínua com tensão nominal de até 1.000 Vcc.

$$I_{arc} = \frac{0,5 \times I_{bf}}{D^2}$$

$$IE_m = 0,01 \times V_{sys} \times I_{arc} \times \frac{T_{arc}}{D^2}$$

Em que:

I<sub>arc</sub> = corrente do arco, em ampères;

I<sub>bf</sub> = corrente de curto-circuito, em ampères;

IE<sub>m</sub> = energia incidente estimada em um arco elétrico por corrente contínua para máxima potência, em cal/cm<sup>2</sup>;

V<sub>sys</sub> = tensão do sistema, em V;

T<sub>arc</sub> = tempo de duração do arco, em segundos;

D = distância de trabalho do ponto de arco elétrico, em centímetros.

Caso a probabilidade de ocorrência de um arco seja no interior de um painel, este método considera prudente multiplicar o valor da energia incidente por três.

### Limitações dos métodos de cálculo

Um ponto importante para escolha do método para realização dos cálculos de energia incidente é respeitar as limitações de cada um. A tabela 1 apresenta os métodos e essas limitações e foi adaptada da Tabela D.1 da NFPA 70E.

**TABELA 1 – LIMITAÇÃO DOS MÉTODOS DE CÁLCULO**

FONTE	LIMITAÇÃO/PARÂMETROS
Doughty/ Neal	Calcula a energia incidente para arcos em sistemas trifásicos com tensão nominal igual ou inferior a 600 V. Aplica-se para correntes de curto-circuito entre 16 kA e 50 kA.
Ralph Lee	Calcula a energia incidente para arcos em sistemas trifásicos em ambiente aberto para instalações acima de 600 V. Torna-se mais conservador conforme a tensão aumenta.
Norma IEEE 1584	Calcula a energia incidente e a distância segura de aproximação para instalações com as seguintes características: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensão entre 208 V e 15.000 V;</li> <li>• Sistema trifásico;</li> <li>• Frequência de 50 Hz a 60 Hz;</li> <li>• Corrente de curto-circuito de 700 A a 106 kA;</li> <li>• Espaçamento entre condutores de 13 mm a 152 mm.</li> </ul>
ANSI/IEEE C2 NESC Seção 410 Tabelas 410-1 e 410-2	Calcula a energia incidente para arcos fase-terra em ambiente aberto de 1 kV a 500 kV para trabalho em linha viva.

### Conclusão

Este artigo abordou os métodos previstos na NFPA 70E para estimativa da energia incidente. A escolha do método a ser utilizado depende das características da instalação, devendo-se respeitar as limitações de cada método.

O resultado final dos cálculos de energia incidente deve ser utilizado para determinação da categoria de risco das vestimentas e EPIS. Por exemplo, o resultado do cálculo de energia incidente de uma instalação elétrica foi 9,3 cal/cm<sup>2</sup>. Neste caso, aplicando-se a Tabela 2, adaptada da Tabela 130.7(C)(16) da NFPA 70E, conclui-se que devem ser adotados vestimentas e EPIS categoria de risco ATPV 3 (utilizada para valores de energia incidente maiores que 8 cal/cm<sup>2</sup> até 25 cal/cm<sup>2</sup>, conforme destacado em vermelho na Tabela 2).

No próximo artigo, será abordada a metodologia para cálculo de energia incidente aplicando-se o disposto na norma IEEE 1584, amplamente utilizada na atualidade, especialmente em instalações industriais.

**TABELA 2 – VESTIMENTAS DE PROTEÇÃO E EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO INDIVIDUAL (EPI)**

CATEGORIA DE RISCO	VESTIMENTA DE PROTEÇÃO E EPI
0	<p><b>Vestimenta de proteção, fibra natural não tratada (por exemplo, algodão não tratado, lã, nylon, seda ou mistura desses materiais), com gramatura mínima de 152 g/cm<sup>2</sup></b> Camisas (manga comprida) Calças (compridas)</p> <p><b>Equipamento de proteção</b> Óculos de segurança Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo) Luvas de couro, quando necessário</p>
1	<p><b>Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 4 cal/cm<sup>2</sup></b> Camisas e calças compridas resistentes a arco ou macacão resistente a arco Protetor facial resistente a arco ou capuz carrasco resistente a arco</p> <p><b>Equipamento de proteção</b> Capacete Óculos de segurança Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo) Luvas de couro Sapato de segurança em couro, quando necessário</p>

**Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 8 cal/cm<sup>2</sup>**

Camisas e calças compridas resistentes a arco ou macacão resistente a arco

Protetor facial resistente a arco ou capuz carrasco resistente a arco e balaclava resistente a arco

2 Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário

**Equipamento de proteção**

Capacete

Óculos de segurança

Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo)

Luvas de couro

Sapato de segurança em couro, quando necessário

**Vestimenta resistente a arco elétrico selecionada de modo que atenda à classificação de arco mínima de 25 cal/cm<sup>2</sup>**

Camisas de manga comprida resistente a arco, quando requeridas

Calças compridas resistentes a arco, quando requeridas

Macacão resistente a arco, quando requerido

Jaqueta resistente a arco elétrico, quando requerida

Capuz carrasco resistente a arco

3 Luvas resistentes a arco

Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário

**Equipamento de proteção**

Capacete

Óculos de segurança

Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo)

Sapato de segurança em couro, quando necessário

**Vestimenta resistente a arco elétrico selecionada de modo que atenda à classificação de arco mínima de 40 cal/cm<sup>2</sup>**

Camisas de manga comprida resistente a arco, quando requeridas

Calças compridas resistentes a arco, quando requeridas

Macacão resistente a arco, quando requerido

Jaqueta resistente a arco elétrico, quando requerida

Capuz carrasco resistente a arco

4 Luvas resistentes a arco

Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário

Equipamento de proteção

Capacete

Óculos de segurança

Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo)

Sapato de segurança em couro, quando necessário

### Referências

DOAN, D. R. Arc flash calculations for exposures to dc systems. IEEE IAS Electrical Safety Workshop, 2007.

NFPA 70E. "Standard for electrical safety requirement for employee workplace", 2012.

IEEE Std. 1584. "IEEE Guide for performing arc-flash hazard calculations", 2002.

QUEIROZ, A. R. S. Utilização de relés digitais para mitigação dos riscos envolvendo arco elétrico. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo, 2011.

\*ALAN RÔMULO SILVA QUEIROZ é engenheiro electricista graduado pela Universidade Santa Cecília (Santos, SP), mestre em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e membro do IEEE-IAS.

\*EDUARDO CÉSAR SINGER é engenheiro electricista e doutor pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. É professor livre-docente na área de Proteção de Sistemas Elétricos pela Universidade de São Paulo e coordenador do Laboratório de Pesquisa em Proteção de Sistemas Elétricos – Lprot.

### Continua na próxima edição

Confira todos os artigos deste fascículo em [www.osetoreletrico.com.br](http://www.osetoreletrico.com.br)  
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail [redacao@atitudeditorial.com.br](mailto:redacao@atitudeditorial.com.br)