

Capítulo V

A IEEE 1584 e os métodos para cálculo de energia incidente e distância segura de aproximação

Por Alan Rômulo e Eduardo Senger*

No artigo anterior foram abordados os métodos previstos na NFPA 70E para estimativa da energia incidente, incluindo um resumo da metodologia proposta pela norma IEEE 1584 e as limitações de cada método.

Este capítulo tem como objetivo apresentar, com mais detalhes, a metodologia para cálculo de energia incidente, aplicando-se o disposto na norma IEEE 1584, amplamente utilizada na atualidade, especialmente em instalações industriais.

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. Esta norma deve ser empregada somente em instalações que se enquadrem dentro das seguintes características:

- Tensão entre 208 V e 15000 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.

Etapas para realização do cálculo de energia incidente

Pelo método da IEEE 1584, são necessárias nove etapas para estimativa da energia incidente e determinação dos EPIS adequados. A Figura 1 apresenta essas etapas.

ETAPA	IEEE 1584
1	Coleta de dados da instalação e do sistema.
2	Determinar os modos de operação do sistema.
3	Determinar a corrente de curto-circuito.
4	Determinar a corrente do arco elétrico.
5	Encontrar as características dos dispositivos de proteção e o tempo de duração do arco.
6	Determinar as tensões dos sistemas e a classe dos equipamentos
7	Determinar a distância de trabalho.
8	Calcular a energia incidente em todos os equipamentos.
9	Determinar a distância segura de aproximação contra arco elétrico.

Figura 1 – Passos para a determinação da energia incidente e da distância segura de aproximação de acordo com a IEEE 1584.

Os itens a seguir detalham cada etapa desse processo de cálculo.

• **Etapa 1: coleta de dados da instalação e do sistema**

Nesta etapa é necessário realizar a coleta de dados do sistema elétrico da unidade, tais como diagramas unifilares, que devem estar atualizados. Devem ser considerados os circuitos de distribuição de baixa tensão e possíveis alimentadores alternativos.

Após a coleta dos diagramas unifilares, devem ser providenciados todos os dados necessários para o cálculo de curto-circuito. O estudo deve considerar todas as fontes de energia, incluindo a concessionária, geradores auxiliares e motores acima de 37 kW (segundo a IEEE 1584, motores com potência superior ou igual a 37 kW contribuem de maneira significativa para os valores de curto-circuito). Os diagramas devem mostrar os transformadores, linhas de transmissão, circuitos de distribuição, sistemas de aterramento elétrico, reatores limitadores de correntes e outros equipamentos limitadores de corrente, correção ou estabilização de tensão, capacitores, chaves seccionadoras, disjuntores e CCMs. Também deve considerar painéis e cubículos, incluindo equipamentos de proteção, chaves fusíveis (informando o tipo e capacidade dos fusíveis), alimentadores e circuitos derivados, bem como motores menores que 600V e transformadores para instrumentos e proteção. Equipamentos abaixo de 240 V não necessitam ser considerados a não ser que possuam potência mínima de 125 kVA.

• **Etapa 2: determinação dos modos de operação do sistema**

Nessa etapa, é necessário analisar todos os modos de operação do sistema elétrico. De acordo com a IEEE 1584, em sistemas radiais, há somente um modo de operação normal, porém existem outros sistemas mais complexos que possuem vários modos de operação, como CCMs com um ou dois alimentadores (com ambos ou apenas um alimentador energizado) ou geradores com possibilidade para operar em paralelo com a concessionária de energia (operando ou em standy-by).

É importante determinar a corrente de curto-circuito para o modo de operação que tem a maior e a menor corrente de curto-circuito.

• **Etapa 3: determinação da corrente de curto-circuito**

Nesta etapa, a IEEE 1584 recomenda que todas as informações referentes ao diagrama unifilar e os dados coletados dos equipamentos sejam inseridos em um programa para cálculo de curto-circuito. Há programas comerciais que possibilitam a inclusão de milhares de barras para execução dos cálculos e que permitem um fácil chaveamento entre os modos de operação.

Os valores da corrente de curto-circuito devem ser determinados, principalmente, nos pontos da instalação onde os trabalhadores desenvolvam suas atividades laborais.

• Etapa 4: determinação da corrente do arco elétrico

Nesta etapa é determinada a corrente do arco elétrico nos pontos de interesse da instalação quanto ao risco do arco elétrico. Também é determinada a parcela da corrente que passa pelo primeiro equipamento de proteção à montante do local da falta envolvendo arco.

A corrente do arco elétrico depende principalmente dos valores da corrente de curto-circuito, mensurados na etapa 3. Após a determinação desses valores, a corrente do arco elétrico pode ser calculada pela aplicação de equações estabelecidas na norma, para sistemas de baixa tensão (até 1 kV) ou para tensões maiores, entre 1 kV e 15 kV. Para baixa tensão, deve-se aplicar a equação (1).

$$\lg I_a = K + 0,6621 \lg I_{bf} + 0,0966V + 0,000526G + \dots$$

$$\dots 0,5588V(\lg I_{bf}) - 0,00304G(\lg I_{bf}) \quad (1)$$

Em que:

\lg = Logaritmo na base 10;

I_a = corrente do arco elétrico, em kA;

K = é -0,153 para arco em ambiente aberto;

é -0,097 para arco em ambiente fechado;

I_{bf} = Corrente de curto-circuito para uma falta trifásica, em kA;

V = tensão do sistema, em kV;

G = distância entre condutores, em mm.

A distância entre condutores (G) é determinada pela Tabela 1, extraída da IEEE 1584.

TABELA 1 – FATORES PARA EQUIPAMENTOS E CLASSES DE TENSÃO

TENSÃO DO SISTEMA (kV)	TIPO DE EQUIPAMENTO	DISTÂNCIA TÍPICA ENTRE CONDUTORES (MM)	DISTÂNCIA X FATOR
0,208 - 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 - 5	Ambiente aberto	102	2,000
	Painel de distribuição	13-102	0,973
	Cabos	13	2,000
>5 - 15	Ambiente aberto	13-153	2,000
	Painel de distribuição	153	0,973
	Cabos	13	2,000

Para tensões entre 1 kV e 15 kV, não há distinção entre as configurações em ambiente aberto e ambiente fechado, devendo ser aplicada a seguinte equação (2):

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \quad (2)$$

Em que:

\lg = Logaritmo na base 10;

I_a = corrente do arco elétrico, em kA;

I_{bf} = Corrente de curto-circuito para uma falta trifásica, em kA.

Posteriormente, realiza-se a conversão do logaritmo, conforme a equação (3).

$$I_a = 10^{\lg I_a} \quad (3)$$

Esta etapa determina, ainda, que deve ser calculada uma segunda corrente do arco elétrico equivalente a 85% da I_a , com o objetivo de determinar um segundo tempo de duração do arco.

• Etapa 5: encontro das características dos dispositivos de proteção e o tempo de duração do arco

Para esse levantamento, recomenda-se que os dados do sistema de proteção sejam retirados dos equipamentos instalados no campo. Caso contrário, os parâmetros da proteção devem ser calculados pela aplicação de softwares comerciais específicos ou, caso a instalação analisada seja simples, as características dos dispositivos de proteção podem ser encontradas nos catálogos dos fabricantes.

Para fusíveis, as curvas de tempo/corrente dos fabricantes podem incluir o tempo de fusão e de interrupção. Neste caso, deve-se adotar o tempo de interrupção. Caso o fabricante forneça somente a média do tempo de fusão, deve-se somar 15% no tempo de fusão, desde que esse tempo seja de até 0,03 s. Para tempo superior a 0,03 s, soma-se 10% no tempo de fusão. Essas somas têm como objetivo determinar o tempo total da interrupção.

Para disjuntores com relés de proteção integrados, a curva tempo/corrente inclui as informações referentes ao tempo de disparo e o tempo de interrupção.

Para disjuntores operados por relés externos, a curva do relé mostra somente o tempo de operação do relé na região temporizada. Para relés operando na região instantânea, considera-se a sua operação em 16 ms, à frequência de 60 Hz, devendo ser somado o tempo para abertura do disjuntor. A IEEE 1584 possui uma tabela em que são recomendados tempos de abertura para disjuntores de potência. A Tabela 2 apresenta essas recomendações. A norma orienta, ainda, que tempos de abertura para disjuntores específicos devem ser consultados nos catálogos dos fabricantes.

TABELA 2 – TEMPO DE ABERTURA PARA DISJUNTORES DE POTÊNCIA

TENSÃO E TIPO DE DISJUNTOR	TEMPO DE ABERTURA EM 60 Hz (CICLOS)	TEMPO DE ABERTURA (s)
Baixa tensão (<1 kV), caixa moldada e relé de proteção integrado	1,5	0,025
Baixa tensão (<1 kV), caixa isolada com relé de proteção integrado ou operado por relé externo	3,0	0,050
Média Tensão (1 a 35 kV)	5,0	0,080
Alta tensão (> 35 kV)	8,0	0,130

• Etapa 6: determinação das tensões dos sistemas e a classe dos equipamentos

Deve-se documentar, para cada barramento, a tensão do sistema e o tipo de equipamento, conforme dispõe a Tabela 3 (adaptada da tabela 2 da IEEE 1584), com o objetivo de identificar o espaçamento entre os barramentos.

TABELA 3 – TIPO DE EQUIPAMENTO E DISTÂNCIA TÍPICA ENTRE BARRAMENTOS

TIPO DE EQUIPAMENTO	DISTÂNCIA TÍPICA ENTRE OS BARRAMENTOS (MM)
Painel de 15 kV	152
Painel de 5 kV	104
Painel de baixa tensão	32
CCMs e quadros elétricos de baixa tensão	25
Cabos	13
Outros	Não necessário

• Etapa 7: determinação da distância de trabalho

De acordo com a IEEE 1584, a proteção contra arco elétrico é sempre baseada no nível de energia incidente que atinge a face ou o corpo de um trabalhador a uma determinada distância, e não na energia incidente que atinge suas mãos ou braços. O nível do dano depende da porcentagem da pele do corpo de uma pessoa que sofre uma queimadura. A cabeça e o corpo representam a maior parte da superfície do corpo humano, por isso queimaduras nessas áreas são mais graves do que aquelas ocorridas nas extremidades do corpo. A Tabela 4, adaptada da tabela 3 da IEEE 1584, apresenta as distâncias de trabalho típicas de acordo com os tipos de equipamentos.

TABELA 4 – TIPO DE EQUIPAMENTO E DISTÂNCIA DE TRABALHO TÍPICA

TIPO DE EQUIPAMENTO	DISTÂNCIA DE TRABALHO TÍPICA (MM)
Painel de 15 kV	910
Painel de 5 kV	910
Painel de baixa tensão	610
CCMs e quadros elétricos de baixa tensão	455
Cabos	455
Outros	A ser determinada no campo

A distância de trabalho típica é a soma da distância entre o trabalhador e a parte frontal do equipamento com a distância entre a parte frontal e a fonte de origem do arco, localizada dentro do equipamento.

• Etapa 8: cálculo da energia incidente em todos os equipamentos

Nesta etapa, a IEEE 1584 recomenda a utilização de um programa para cálculo da energia incidente. A própria IEEE 1584 disponibiliza uma planilha em Excel para a realização desses cálculos.

Para a realização dos cálculos de energia incidente, a norma estabelece que deve ser determinado, primeiramente, o valor da energia incidente normalizada, a qual é baseada em valores normalizados para um arco de 200 ms de duração e uma distância de 610 mm entre o ponto de origem do arco e uma pessoa. Essa energia pode ser estimada por meio da equação (4).

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011G \quad (4)$$

Em que:

\lg = Logaritmo na base 10;

E_n = Energia incidente normalizada (J/cm²) para tempo de 200 ms e distância de 610 mm;

K_1 = é -0,792 para ambiente aberto;
é -0,555 para ambiente fechado.

K_2 = é 0 para sistema isolado ou aterrado por alta resistência;
é -0,113 para sistema solidamente aterrado.

G = Distância entre os condutores, em mm (conforme a Tabela 1).

Posteriormente, realiza-se a conversão do logaritmo, aplicando a equação (5).

$$E_n = 10^{\lg E_n} \quad (5)$$

Finalmente, converte-se para energia incidente a partir da energia normalizada pela equação (6).

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (6)$$

Em que:

E = Energia incidente (J/cm²);

C_f = é um fator de cálculo

1,0 para tensão acima de 1 kV

1,5 para tensão igual ou menor do que 1 kV

E_n = Energia incidente normalizada;

t = tempo do arco, em segundos;

D = Distância do possível ponto do arco para uma pessoa (mm);

x = Expoente de distância, conforme Tabela 1.

Para determinar o valor da energia incidente em cal/cm², deve ser aplicada a seguinte equação (7):

$$E = C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (7)$$

Em que:

E = Energia incidente (cal/cm²);

C_f = é um fator de cálculo

1,0 para tensão acima de 1 kV;

1,5 para tensão igual ou menor do que 1 kV.

E_n = Energia incidente normalizada;

t = tempo do arco, em segundos;

D = Distância do possível ponto do arco para uma pessoa (mm);

x = Expoente de distância, conforme Tabela 1.

• Etapa 9: determinação da distância segura de aproximação contra arco elétrico

Assim como a NFPA 70E, a IEEE 1584 define a distância segura de aproximação como a distância da fonte do arco na qual uma energia de calor de 1,2 (cal/cm²), ou 5,0 (J/cm²), incide sobre uma pessoa sem equipamento de proteção, causando-lhe queimadura de segundo grau.

Para determinar a distância segura de aproximação, deve-se aplicar a seguinte equação (8):

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (8)$$

Em que:

D_B = Distância de aproximação do ponto do arco, em (mm);

C_f = é um fator de cálculo

1,0 para tensão acima de 1 kV;

1,5 para tensão igual ou menor do que 1 kV;

E_n = Energia incidente normalizada;

E_B = Energia incidente (J/cm²) na distância de proteção;

t = tempo do arco, em segundos;

x = Expoente de distância, conforme Tabela 1.

Conclusão

Este artigo abordou as principais etapas para cálculo de energia incidente e da distância segura de aproximação, conforme metodologia prevista na IEEE 1584. Recomenda-se que esses cálculos sejam realizados aplicando-se softwares para simulação computacional de sistemas elétricos, que possua módulo específico para análise de arco elétrico. Esses softwares também indicam qual a categoria de risco ATPV dos EPIs, de acordo com o disposto na NFPA 70E.

Como este artigo apresentou as principais etapas da norma IEEE 1584 de maneira resumida, recomenda-se também a leitura da norma antes da realização dos cálculos para obtenção de mais detalhes.

Referências

- 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.
- SOUZA, F. B. "Vestimenta de proteção contra queimaduras provocadas por arcos elétricos para trabalhadores que atuam em instalações e serviços em eletricidade". Monografia (Pós-graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho). Universidade Nove de Julho, 2009.

*ALAN RÔMULO SILVA QUEIROZ é engenheiro eletricitista 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 SENGER é engenheiro eletricitista 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
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail redacao@atitudeeditorial.com.br