

Avaliação de energia incidente

Por Luiz Carlos Catelani Junior*

Capítulo V

Cálculo de Energia Incidente – Modelo IEEE 1584 edição 2018 para média tensão Parte 3

Como referência normativa para cálculo de energia incidente acima de 15 kV, podemos utilizar a NFPA 70E, através das equações de Ralph Lee, ou partir para uma metodologia enfocada tanto pela NESC C2, como pela OSHA 1910-269.

A média tensão está dividida em duas faixas de tensão, em função do país de origem, pela norma IEC 60038 – Tabela 1.

A norma IEEE 1584 sempre teve seu modelo limitado a 15 kV, para tensões maiores com equipamentos de até 40,5 kV, devem ser adotados outros modelos que permitam o cálculo da energia incidente.

Ralph Lee não se faz uma boa escolha pois levará a valores extremamente elevados e irrealis.

Na última publicação da OSHA – 1910.269, a metodologia não é recomendada e sugere que seja utilizado o programa ArcPro® ou outro método que apresente valores razoáveis, desde que feito por um profissional habilitado.

Uma alternativa é utilizar as tabelas orientativas da NESC C2 – 2017 que utiliza a metodologia das equações de arco com base no programa ArcPro®, bem como trabalham por faixa de tensão para ambiente aberto e arcos verticais monofásicos.

Na Tabela 2, existem valores previamente calculados para as faixas de média tensão, que englobam os equipamentos amplamente utilizados na indústria.

TABELA 1 – FAIXA DE TENSÃO

Series I			Series II	
Highest voltage for equipment kV	Nominal system voltage kV		Highest voltage for equipment kV	Nominal system voltage kV
3,6 ^b	3,3 ^b	3 ^b	4,40 ^b	4,16 ^b
7,2 ^b	6,6 ^b	6 ^b	–	–
12	11	10	–	–
–	–	–	13,2 ^c	12,47 ^c
–	–	–	13,97 ^c	13,2 ^c
–	–	–	14,52 ^b	13,8 ^b
(17,5)	–	(15)	–	–
24	22	20	–	–
–	–	–	26,4 ^{c,e}	24,94 ^{c,e}
36 ^d	33 ^d	30 ^d	–	–
–	–	–	36,5 ^c	34,5 ^c
40,5 ^d	–	35 ^d	–	–

TABELA 2 – VALORES DE ENERGIA INCIDENTE X TEMPO DE ELIMINAÇÃO

Phase-to-phase voltage (kV)	Fault current (kA)	4-cal system	8-cal system	12-cal system
		Maximum clearing time (cycles)	Maximum clearing time (cycles)	Maximum clearing time (cycles)
1.1 to 15	5	46.5	93.0	139.5
	10	18.0	36.1	54.1
	15	10.0	20.1	30.1
	20	6.5	13.0	19.5
15.1 to 25	5	27.6	55.2	82.8
	10	11.4	22.7	34.1
	15	6.6	13.2	19.8
	20	4.4	8.8	13.2
25.1 to 36	5	20.9	41.7	62.6
	10	8.8	17.6	26.5
	15	5.2	10.4	15.7
	20	3.5	7.1	10.6
36.1 to 46	5	16.2	32.4	48.6
	10	7.0	13.9	20.9
	15	4.3	8.5	12.8
	20	3.0	6.1	9.1

A Tabela 2 relaciona, para cada classe de tensão, o tempo em ciclos (1 ciclo 16,6 ms) para interrupção do arco elétrico vertical aberto para as faixas de energia disponível (4, 8 e 12 cal/cm²).

Todos estes cálculos foram feitos a uma distância fixa de 38 cm ou 15 in.

Resumo das condições de contorno para o cálculo consta na Tabela 3.

Como a Tabela 2 foi construída pela metodologia das equações

de arco utilizadas no programa ArcPro©, algumas considerações devem ser feitas:

- Arc Gap é a distância no ar entre dois pontos na qual existe a possibilidade de ocorrer um arco elétrico. Não é a distância física entre dois condutores;
- Distance to Arc é a distância física de trabalho, menos duas vezes o Arc Gap;
- Work Distance é a distância real de trabalho

TABELA 3- CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA O CÁLCULO

	15 kV	25 kV	36 kV
Arc Gap	5,1 cm	10,2 cm	15,2 cm
Distance to Arc	38 cm	38 cm	38 cm
Work Distance	48,2 cm	58,4 cm	68,4 cm

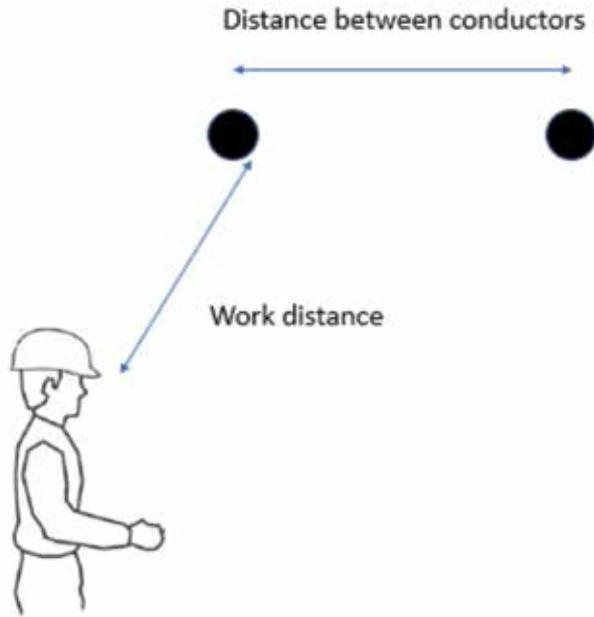


Figura 1– Ilustração da posição de trabalho e distância.

De acordo com a literatura do programa ArcPro®, é possível converter o valor calculado de um arco monofásico aberto para um arco trifásico em ambiente fechado, através de coeficientes de acomodação. O uso destes coeficientes é mencionado na OSHA 1910.269 Anexo E, assim, a metodologia, neste caso, tem aderência normativa.

TABELA 4– COEFICIENTES DE ACOMODAÇÃO - ARCPRO®

Scenario	Adjustment Factor – Multiply by
1-phase arc in a box	1.5
3-phase open air arc	1.2 to 2.2
3-phase arc in a box	3.7 to 6.5

A equação geral de energia incidente para arcos verticais ao ar livre sempre assume a forma de:

$$E_i = \frac{k \cdot V \cdot I_{ARC} \cdot t}{D^x}$$

k → constante de acordo com a metodologia

V → tensão entre fases

I_{ARC} → corrente de arco elétrico

t → tempo de duração do arco

x → expoente em função da configuração do arco (aberto ou enclausurado)

No modelo utilizado pelo ArcPro® temos as seguintes particularidades:

- Corrente de arco é igual a corrente de curto
- Para arcos abertos o expoente x é igual a 2

Rescrevendo a equação:

$$E_i = \frac{k \cdot V \cdot I_{CC} \cdot t}{D^2}$$

Para obter os valores de energia incidente a uma distância diferente da tabela, mantendo as demais variáveis, pode-se utilizar a fórmula:

$$E_{i_TABELA} \cdot (38)^2 = E_i \cdot (D)^2$$

E_{i_TABELA} → Valor da energia incidente da Tabela 2 [cal/cm²]

E_i → Valor da energia incidente a uma nova distância [cal/cm²]

D → Distância ao arco = Distância de trabalho – 2 x Arc Gap [cm]

Uma vez tendo a possibilidade de trabalhar com diversas distâncias, temos que obter a mesma funcionalidade para a questão do tempo.

Através da análise numérica e regressão linear, a Tabela 2 pode ser decomposta em três classes de tensão:

- Classe 15 kV:

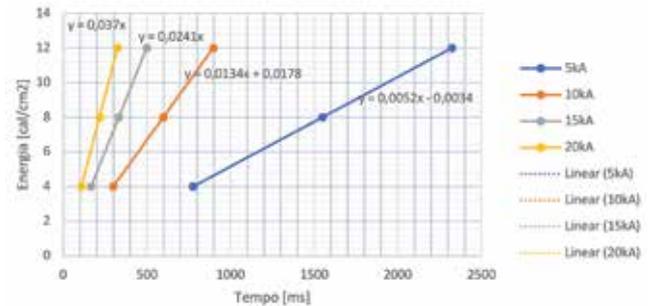


Gráfico 1 – Classe 15 kV.

- Classe 25 kV:

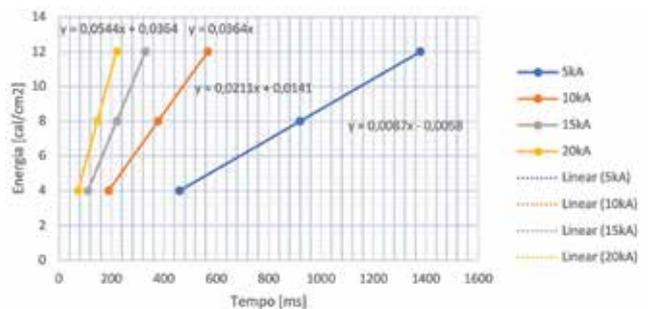


Gráfico 2 – Classe 25 kV.

- Classe 36 kV:

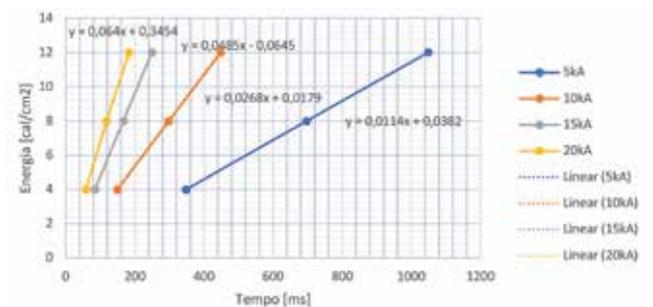


Gráfico 3 – Classe 36 kV.



WhatsApp

EcoBox



Bifásico



Monofásico



Trifásico

Dispositivo de Proteção contra Surtos

DPS



Antes de prosseguir com o cálculo de painéis, vamos fazer uma validação da metodologia proposta, usando o caso que possa ser calculado, tanto pela IEEE 1584, como pela NESC C2.

Como uma primeira análise, uma situação de uma instalação aberta em 13,80 kV – 20 kA, com tempo de proteção em 680 ms, a uma distância de trabalho típica de 910 mm.

$U_n = 15$ kV (classe de tensão)

$I_{cc} = 20$ kA

Work distance = 91 cm

Arc gap = 5,1 cm (não é a distância física entre barramentos)

Distance to arc = 80,8 cm (91 cm – 2 x 5,1)

Para a classe de 15 kV – 20 kA a equação que descreve a energia incidente é apresentada no Gráfico 1.

$E_i = 0,037.t$, onde:

$E_i \rightarrow$ Energia incidente [cal/cm²]

$t \rightarrow$ Tempo [ms]

Para um tempo de 680 ms, a energia incidente, na condição aberta a 38 cm, é 25,16 cal/cm².

$$E_{i_TABELA} \cdot (38)^2 = E_i \cdot (D)^2$$

Agora temos que aplicar a proporção para mudar o “Distance to Arc” de 38 cm para 80,80 cm.

$$25,16 \cdot (38)^2 = E_i \cdot (80,80)^2$$

$$E_{i_OPEN} = 5,56 \text{ cal/cm}^2$$

Não é permitido a apresentação de diversos valores de energia incidente em um estudo, mas para fins comparativos e didáticos, vamos propor:

- Cálculo pelo método de Ralph Lee (previsto na NFPA 70E)
- Cálculo pelo método do IEEE – 1584 de 2002
- Cálculo pelo método do IEEE – 1584 de 2018 configuração vertical open air
- Extrapolação da NESC C2

Ralph Lee	IEEE 1584 - 2002
115,95 cal/cm ²	6,83 cal/cm ²
IEEE 1584 - 2018	NESC – C2
12,35 cal/cm ²	5,56 cal/cm ²

A metodologia do IEEE 1584 – 2002 é muito próxima ao valor obtido pela NESC C2.

Agora faremos a mesma reflexão para uma instalação na configuração fechada.

Um painel de distribuição de 13,80 kV – 20 kA, com tempo de interrupção de 680 ms, a uma distância de trabalho de 910 mm.

Primeiro vamos realizar o cálculo com as tabelas da NESC

$U_n = 15$ kV (classe de tensão)

$I_{cc} = 20$ kA

Work distance = 91 cm

Arc gap = 5,1 cm

Distance to arc = 80,8 cm (91 cm – 2 x 5,1)

Para a classe de 15 kV – 20 kA a equação que descreve a energia incidente é apresentada no Gráfico 1.

$E_i = 0,037.t$, onde:

$E_i \rightarrow$ Energia incidente [cal/cm²]

$t \rightarrow$ Tempo [ms]

Para um tempo de 680 ms a energia incidente na condição aberta a 38 cm é 25,16 cal/cm².

Agora temos que aplicar a proporção para mudar o “Distance to Arc” de 38 cm para 80,80 cm.

$$25,16 \cdot (38)^2 = E_i \cdot (80,80)^2$$

$$E_{i_OPEN} = 5,56 \text{ cal/cm}^2$$

Esse valor obtido é para arcos abertos na vertical, na condição “closed”, deve-se multiplicar por um valor de 3,7 a 6,5, conforme a Tabela 4.

$$E_{i_CLOSED} = 20,57 \text{ cal/cm}^2 \text{ (mínimo)}$$

$$E_{i_CLOSED} = 36,17 \text{ cal/cm}^2 \text{ (máximo)}$$

Para fins comparativos, veja abaixo estudo com diversos valores de energia incidente:

- Cálculo pelo método de Ralph Lee (previsto na NFPA 70E)
- Cálculo pelo método do IEEE – 1584 de 2002
- Cálculo pelo método do IEEE – 1584 de 2018 configuração vertical open air
- Extrapolação da NESC C2 com coeficientes do ArcPro

Ralph Lee	IEEE 1584 - 2002
115,95 cal/cm ²	17,77 cal/cm ²
IEEE 1584 - 2018	NESC – C2
15,27 cal/cm ²	36,17 cal/cm ²

Avaliando os resultados do IEEE – 1584 com as extrapolações pertinentes pela NESC C2, o valor se mostra bem conservativo, mas não chega ser tão discrepante como a metodologia de Ralph Lee.

Tomando como base as tabelas da NESC C2, podemos calcular os valores de energia incidente para painéis classe de tensão 24 e 36 kV.

Essas classes de tensão são muito importantes, pois são faixas bastante utilizadas na indústria e não existe uma outra metodologia que não seja as equações de arco com coeficientes de acomodação além da de Ralph Lee.

Vamos calcular a energia incidente de um painel isolado a ar classe 36 kV.

Referência normativa TABELA NESC C2

Configuração:

PAINEL AIS 36 kV

Curto-Circuito estimado 20 kA

Tensão: 34,5 kV

Configuração do painel:

Distância de trabalho = 910 mm ou 91 cm

Arc gap = 15,2 cm (conforme tabelas NESC classe de tensão 36 kV)

Distance to arc = 38 cm

Para 20 kA a equação de energia incidente conforme Gráfico 3

$$E_i = 0,064.t + 0,3454$$

$$t = 380 \text{ ms}$$

$$E_i = 24,66 \text{ cal/cm}^2 \text{ (condição aberto e a 38 cm de distância)}$$

Transformar para condição real de trabalho:

Distância de trabalho = 910 mm ou 91 cm

$$\text{Distância de cálculo} = 91 - 2 \cdot 15,2 = 60,60 \text{ cm}$$

Agora temos que aplicar a proporção para mudar o “Distance to Arc” de 38 cm para 60,60 cm.

$$24,66 \cdot (38)^2 = E_i \cdot (60,60)^2$$

$$E_{i_real} = 9,70 \text{ cal/cm}^2 \text{ (condição aberto)}$$

Para condição fechado multiplicar por 6,5

A energia incidente de 63,19 cal/cm².

Ralph Lee	NESC – C2
161,99 cal/cm ²	63,02 cal/cm ²

Quando comparado com a metodologia de Ralph Lee, a aproximação pelas equações de arco através da tabela NESC C2 é mais razoável.

Não é a metodologia ideal uma vez que toda ela foi desenvolvida para arcos monofásicos em ambiente aberto, mas é uma opção para cálculos nesta faixa de tensão com respaldo normativo.

No próximo capítulo vamos passar ao cálculo de energia incidente na alta tensão.

**Luiz Carlos Catelani Junior é engenheiro eletricista pela Unicamp, com ampla experiência em proteção de sistemas elétricos, subestações AT, linhas de transmissão elétrica e plantas industriais. Ao longo de sua carreira, tem desenvolvido atividades ligadas à geração de fontes renováveis, sendo, atualmente, um dos principais especialistas do país em análise de energia incidente de média e alta tensão – ATPV e Arc Flash.*

As melhores soluções em materiais elétricos de média tensão a Exponencial disponibiliza para o mercado.

- ✕ Luminárias públicas LED;
- ✕ Cabos de cobre nu, flexíveis e isolados;
- ✕ Preformados;
- ✕ Cabos de alumínio nu, multiplexados, protegidos e isolados;
- ✕ Isoladores, chaves, para-raios, cruzetas, dutos corrugados;
- ✕ Rede de distribuição aérea e subterrânea.



Produtos Homologados CEMIG

[exponencialmg](#)

www.exponencialmg.com.br

Rua Titânio 153 - Camargos - BH/MG
vendas@exponencialmg.com.br

(31) 3317-5150



Exponencial
MATERIAL ELÉTRICO