

Avaliação de energia incidente

Por Luiz Carlos Catelani Junior*

Capítulo VI

Cálculo de energia incidente – Modelo OSHA 1910-269 para alta tensão

Para o conjunto de instalações elétricas destinadas à geração, transmissão e distribuição as características são bastante particulares.

São instalações com condutor nu, sobre cadeia de isoladores, ao ar livre, sem delimitação de área e como principal medida de controle para riscos elétricos a colocação fora de alcance.

A faixa de alta tensão alcança valores de até 245 kV, conforme norma IEC 60038 – Tabela 1.

TABELA 1 – FAIXA DE TENSÃO

Highest voltage for equipment kV	Nominal system voltage kV	
(52)	(45)	–
72,5	66	69
123	110	115
145	132	138
(170)	(150)	(154)
245	220	230

Acima de 245 kV, é considerado extra alta tensão e tem sua faixa de valores que pode atingir até 1200 kV.

Nas últimas publicações da OSHA – 1910.269, em seu Anexo E, há uma recomendação para os métodos de cálculo de energia incidente, conforme a tabela 2.

Diferentemente da NFPA 70E, a OSHA não recomenda o uso das equações de Ralph Lee para tensões acima de 15 kV.

Outras metodologias podem ser utilizadas desde que tenham justificativa técnica por um profissional da área elétrica. No próximo volume, nós iremos abordar uma outra forma de cálculo através das equações obtidas pelo EPRI – Electric Power Institute.

Nas tabelas e cálculos disponíveis na OSHA é utilizado o programa ArcPro® para desenvolvimento de todos os cálculos. Para os cálculos de energia incidente em alta tensão as seguintes condições de contorno são impostas: curto monofásico; arco vertical; corrente de arco igual a corrente de curto; e ambiente aberto.

A metodologia de cálculo do ArcPro® não é totalmente descrita, mas parte do princípio das equações gerais do arco elétrico. A primeira aproximação feita é que a corrente de arco é igual a corrente de curto-circuito fase terra.

TABELA 2 – METODOLOGIA DE CÁLCULO OSHA 1910.269

Incident-energy calculation method	600 V and Less ²			601 V to 15 kV ²			More than 15 kV		
	1Ø	3Øa	3Øb	1Ø	3Øa	3Øb	1Ø	3Øa	3Øb
NFPA 70E-2012 Annex D (Lee equation)	Y-C	Y	N	Y-C	Y-C	N	N ³	N ³	N ³
Doughty, Neal, and Floyd	Y-C	Y	Y	N	N	N	N	N	N
IEEE Std 1584b-2011	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N
ARCPRO	y	N	N	Y	N	N	Y	Y ⁴	Y ⁴

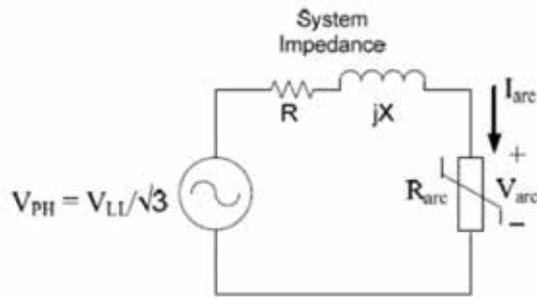


Figura 1- Modelo equivalente para arco elétrico.

$$I_{ARC} = I_{BOLTED}$$

Para o cálculo da potência do arco elétrico é utilizada a tensão de arco.

$$P_{ARC} = U_{ARC} \cdot I_{ARC}$$

Onde:

P_{ARC} → Potência de arco [W]

U_{ARC} → Tensão de arco [V]

I_{ARC} → Corrente de arco [A]

A tensão de arco é dependente da distância de arco, da corrente de curto e da tensão de operação.

$$U_{ARC} = \text{Função}(Arc_{gap}, U, I_{bf})$$

Em muitos artigos existem formas de estimar a tensão de arco, mas levam a equações que só podem ser solucionadas por métodos iterativos.

Uma particularidade que existe na metodologia do ArcPro® é que a distância de arco não é a distância física entre dois condutores. O valor assumido é através do gradiente de potencial no ar, sendo 10 kV/in ou 3,937 kV/cm (valor eficaz).

Este valor é inclusive mencionado na norma OSHA 1910.269 e indicado para cálculos na qual não se tem maiores informações sobre o estudo de coordenação de isolamento. Tal fato é também referenciado na norma IEEE Std. 4 que trata do valor crítico de tensão de ruptura de pico.

Usando os valores para a tensão de ruptura no caso de haste – haste na norma IEEE Std.4 – e fazendo uma regressão linear forçando que o ponto (0,0) seja a origem da equação, é obtido o Gráfico – 1. A equação obtida através da regressão linear é:

$$U = 5,59.d$$

U – Tensão [kV_{pico}]

d – Distância [cm]

A solução completa para usina fotovoltaica

- Rápida conexão
- Redução dos custos
- Customizado
- Transformadores a seco ou óleo
- Painel de proteção baixa e média tensão



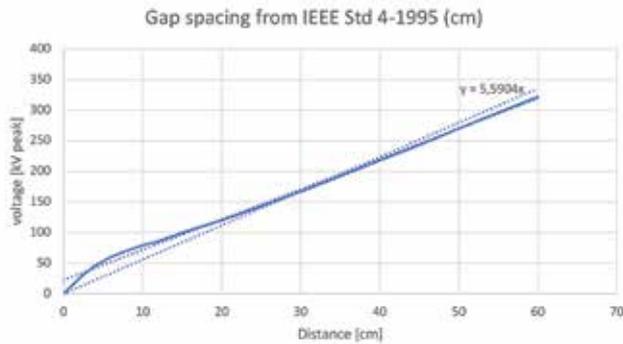


Gráfico 1 – Tensão de ruptura IEEE std. 4

Com o cálculo da potência de arco, a energia pode ser estimada através de:

$$E = P_{\text{ARC}} \cdot t$$

Onde:

E → Energia de arco [J]

P_{ARC} → Potência de arco [W]

t → tempo total para eliminação do arco [s]

Por se tratar de um arco vertical em ambiente aberto, o fluxo de energia se propaga em todas as direções criando uma superfície esférica com o raio D.

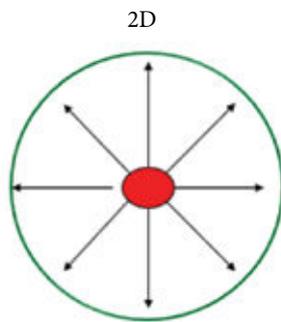


Figura 2- Geometria do arco elétrico – corte no plano.

Para obtenção do fluxo de calor, basta dividir a energia pela área da superfície da esfera.

$$E_{\text{INCIDENTE}} = \frac{(P_{\text{ARC}} \cdot t)}{\text{Area}}$$

$$\text{Area} = 4 \cdot \pi \cdot D^2$$

$E_{\text{INCIDENTE}}$ → Energia incidente [J/cm²]

Area → Área de uma esfera que circunda o arco elétrico com raio entre a fonte e o trabalhador [cm²]

D → Distância do trabalhador ao arco elétrico [cm]

Assim a equação geral para cálculo de arcos verticais em ambiente aberto pode ser reescrita:

$$E_{\text{INCIDENTE}} = \frac{(U_{\text{ARC}} \cdot I_{\text{BF}} \cdot t \cdot k)}{D^2}$$

U_{ARC} → Tensão de arco [V]

I_{BF} → Corrente de curto-circuito fase – terra franca [A]

t → Tempo de eliminação do defeito [s]

D → Distância de trabalho

K → Constante em função das condições de contorno do ARCPRO®

No Anexo E da norma OSHA 1910.269 foi desenvolvida uma série de tabelas com os valores previamente calculados com as seguintes condições de contorno:

- 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; 10 kV/in ou 3,93 kV/cm
- Distance to Arc é a distância física de trabalho menos duas vezes o Arc Gap;
- Work Distance é a distância real de trabalho

Na própria OSHA todos os calculados em alta tensão são referenciados na distância denominada de MAD – “Minimum Approach Distance”. Essa distância é o limite do qual o trabalhador pode estar do ponto energizado sem haver comprometimento e/ou rompimento do dielétrico.

O cálculo do MAD não está relacionado com as tabelas de distâncias de zona de risco, zona controlada e zona livre. Ela é calculada a partir da norma IEEE 516.

Caso queira obter o MAD o link abaixo realiza o cálculo para tensões acima de 72,5 kV:

<https://www.osha.gov/power-generation/rulemaking/madcalculator>

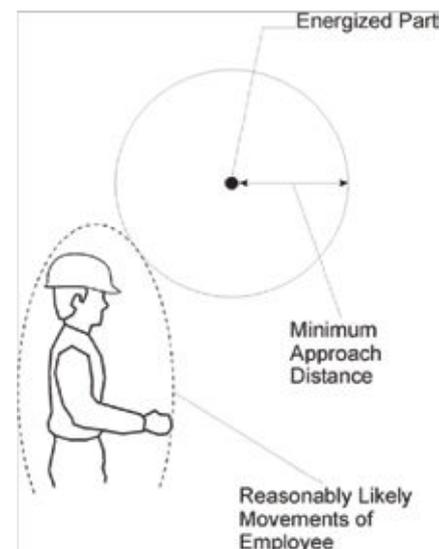


Figura 3 – Ilustração da posição de trabalho e distância.

As distâncias calculadas através do MAD para tensões até 245 kV têm como condições: altitude até 900m; fator ergonômico de 0,30m; e fator de sobretensão 3,00 pu.

Para tensões superiores há uma mudança no fator de sobretensão, os valores normalizados e utilizados na OSHA 1910.269 constam na Tabela 3.

TABELA 3 – MAD - OSHA 1910.269

Faixa de Tensão	MAD
72.6 to 121.0 kV	1.02 m
121.1 to 145.0 kV	1.16 m.
145.1 to 169.0 kV	1.30 m.
169.1 to 242.0 kV	1.72 m
242.1 to 362.0 kV	2.76 m
362.1 to 420.0 kV	2.50 m
420.1 to 550.0 kV	3.62 m

Trabalhando com alta tensão até a classe de 242 kV, temos os seguintes valores calculados na Tabela 4.

Vamos aplicar com um exemplo de um pátio de uma subestação 138 kV.

Condições de contorno:

$$U_{LL} = 138 \text{ kV}$$

$$I_{bf} = 30 \text{ kA}$$

$$t = 0,183 \text{ s ou } 11 \text{ ciclos}$$

$$MAD = 1,16 \text{ m}$$

Para se calcular o “Arc Gap” divide a tensão fase neutro por 10 e multiplica por 2,54

$$\text{Arc}_{\text{gap}} = \frac{138}{10 \cdot \sqrt{3}} \cdot 2,54$$

$$\text{Arc Gap} = 20,23 \text{ cm}$$

Como a equação geral de energia incidente é do tipo:

$$E_i = \frac{U_{\text{ARC}} \cdot I_{\text{BF}} \cdot t \cdot k}{D^2}$$

Implica que a energia incidente é proporcional ao tempo.

Na Tabela 4 obter o número de ciclos mais próximo de 11.

$$9 \text{ ciclos} \rightarrow 5 \text{ cal/cm}^2$$

$$11 \text{ ciclos} \rightarrow E_i$$

TABELA 4 – ENERGIA INCIDENTE - OSHA 1910.269

Voltage range (kV) **	Fault current (kA)	Maximum clearing time (cycles)			
		4 cal/cm ²	5 cal/cm ²	8 cal/cm ²	12 cal/cm ²
46.1 to 72.5	20	18	23	36	55
	30	10	13	20	30
	40	6	8	13	19
	50	4	5	9	13
72.6 to 121.0	20	10	12	20	30
	30	6	7	11	17
	40	4	5	7	11
	50	3	3	5	8
121.1 to 145.0	20	12	15	24	35
	30	7	9	15	22
	40	5	6	10	15
	50	4	5	8	11
145.1 to 169.0	20	12	15	24	36
	30	7	9	15	22
	40	5	7	10	16
	50	4	5	8	12
169.1 to 242.0	20	13	17	27	40
	30	8	10	17	25
	40	6	7	12	17
	50	4	5	9	13

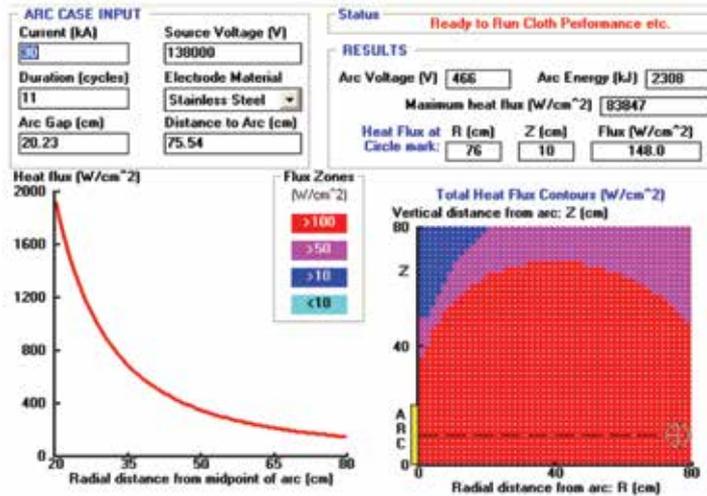


Figura 4 – Tela do ArcPro.

Utilizando da proporcionalidade, a energia incidente calculada para este caso é de 6,11 cal/cm²

Uma outra forma de se fazer o cálculo é usando o programa ArcPro.

$U_{LL} = 138 \text{ kV}$
 $I_{bf} = 30 \text{ kA}$
 $t = 0,183 \text{ s}$ ou 11 ciclos

MAD = 1,16 m ou 116 cm {distância física de trabalho}
 Arc Gap = 20,23 cm

Distance to Arc = MAD – 2 x Arc Gap
 Distance to Arc = 116 – 2.(20,23) = 75,54 cm

$E_i = 6,40 \text{ cal/cm}^2$

Além do programa ArcPro© será utilizado a metodologia para as equações de arco como forma de comparar valores com outros programas.

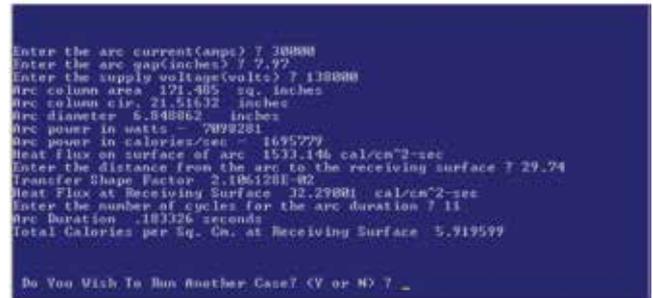


Figura 6 – Tela do programa HEATFLUX Allan Privett.

Abaixo podemos fazer uma comparação didática dos valores:

Classe Tensão	OSHA 1910	ArcPro
138 kV	6,11 cal/cm ²	6,40 cal/cm ²

ArcCalc	Heat Flux
5,91 cal/cm ²	5,92 cal/cm ²

Como podem perceber, todos os programas convergem para valores muito próximos. Lembrando que em todos as condições de contorno foram:

- Arc Gap 10 kV/in
- Distance to Arc igual Work distance menos duas ves Arc Gap

No próximo fascículo vamos passar ao cálculo de energia incidente na alta tensão com uma metodologia e condições de contorno que tratam das distâncias físicas entre condutores e não o Arc Gap.

*Luiz Carlos Catelani Junior é engenheiro electricista 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.

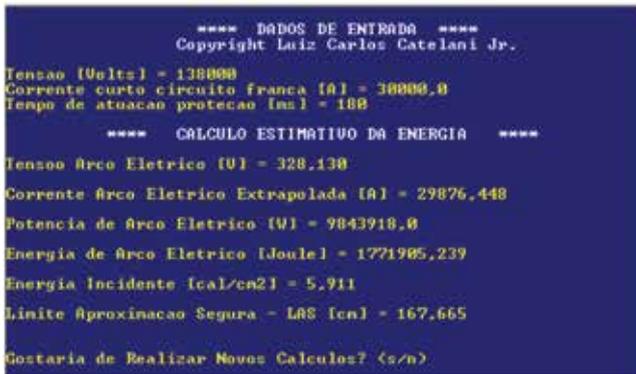


Figura 5 – Tela do programa ArcCalc - própria autoria.