

Avaliação de energia incidente

Por Luiz Carlos Catelani Junior*

Capítulo VII

Cálculo de energia incidente – Modelo EPRI para alta tensão

O modelo usado pela OSHA 1910.269 para cálculo de energia incidente é baseado no programa ArcPro®, que tem sua validação em laboratório para comprimentos de arco de até 30 cm. Em paralelo, existe um grande trabalho desenvolvido pelo EPRI (Electric Power Research Institute) com modelos matemáticos e testes para arcos longos.

Essa metodologia de cálculo tem um vasto número de ensaios e valores certificados para arcos verticais ao ar livre de até 1,50 m. Todos estes ensaios foram feitos tendo como parâmetro a distância física entre a cadeia de isoladores, ou um ponto energizado, até um ponto referenciado à terra – Figura 1.

Diferentemente da OSHA 910.269, onde o “Arc Gap” é estimado como 10 kV/in, no EPRI corresponde a distância física e é denominado de “Arc Length”.

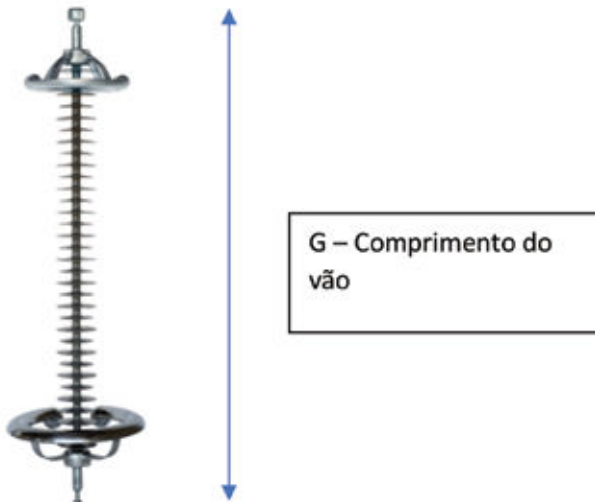


Figura 1 - Cadeia de isolador. Fonte: balestro.

Para a determinação do comprimento físico entre parte energizada e potencial de terra, pode-se usar como forma orientativa as distâncias de coordenação de isolamento previstas na IEC 60071, caso não haja o projeto eletromecânico da instalação a ser calculada ou os valores da norma de instalação elétrica acima de 1 kV a IEC 61936.

TABELA 1 - FAIXA DE TENSÃO IEC 61936 ATÉ 245 KV.

| Voltage range | Highest voltage for installation | Standard rated short-duration power-frequency withstand voltage | Standard rated lightning impulse withstand voltage ^a | Minimum phase-to-earth and phase-to-phase clearance ^b | |
|---------------|----------------------------------|---|---|--|-----------------------|
| | E_m RMS | E_d RMS | E_p 1,2 μ s/50 μ s (peak value) | Indoor installations | Outdoor installations |
| | kV | kV | kV | mm | mm |
| 3,6 | 10 | 20 | 40 | 60 | 120 |
| 7,2 | 20 | 40 | 60 | 60 | 120 |
| 12 | 28 | 60 | 75 | 90 | 150 |
| 17,5 | 38 | 75 | 95 | 120 | 160 |
| 24 | 50 | 95 | 125 | 160 | 160 |
| 36 | 70 | 145 | 170 | 160 | 160 |
| 52 | 95 | 250 | 325 | 160 | 160 |
| 72,5 | 140 | 325 | 450 ^b | 160 | 160 |
| 123 | 185 ^b | 450 ^b | 550 | 160 | 160 |
| 145 | 230 | 550 | 650 | 160 | 160 |
| 170 | 275 | 650 | 750 | 160 | 160 |
| 245 | 325 ^b | 750 ^b | 850 | 160 | 160 |
| | 360 | 850 | 950 | 160 | 160 |
| | 385 | 950 | 1 050 | 160 | 160 |
| | 460 | 1 050 | | 160 | 160 |

A distância da coordenação de isolamento está diretamente relacionada com o nível básico de isolamento (NBI) para instalações de até 245 kV. Para instalações superiores a 245 kV, o valor representativo leva em conta, além do NBI, o nível de isolamento de chaveamento.

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

Nível básico de isolamento → Frente de onda 1,2 x 50 μs

Nível de isolamento para chaveamento → Frente de onda 250 x 2500 μs

TABELA 2 - FAIXA DE TENSÃO IEC 61936 ACIMA DE 245 KV.

| Voltage range | Highest voltage for installation | Standard rated lightning impulse withstand voltage * | Standard rated switching impulse withstand voltage | Minimum phase-to-earth clearance | | Standard rated switching impulse withstand voltage | Minimum phase-to-phase clearance | |
|---------------|----------------------------------|--|--|----------------------------------|-----------------|--|----------------------------------|---------------------|
| | E_m RMS | E_p 1.2 μs/ 50 μs (peak value) | E_s Phase-to-earth 250 μs/2 500 μs (peak value) | Conductor - structure | Rod - structure | E_p Phase-to-phase 250 μs/ 2 500 μs (peak value) | Conductor - conductor parallel | Rod - conductor |
| | kV | kV | kV | mm | | kV | mm | |
| 300 | 850/950 | 750 | 1 600 | 1 700 [†] | 1 900 | 1 125 | 2 300 | 2 600 |
| | 950/1 050 | 850 | 1 600 | 1 900 [†] | 2 400 | 1 275 | 2 600 | 3 100 |
| 362 | 950/1 050 | 850 | 1 800 | 1 900 [†] | 2 400 | 1 275 | 2 600 | 3 100 |
| | 1 050/1 175 | 950 | 2 200 | 2 900 | 1 425 | 3 100 | 3 600 | 3 600 |
| 420 | 1 050/1 175 | 850 | 1 600 | 2 200 [†] | 2 400 | 1 360 | 2 900 | 3 400 |
| | | | 2 200 | 2 400 [†] | 2 900 | 1 425 | 3 100 | 3 600 |
| | 1 175/1 300 | 950 | 2 400 [†] | 2 900 | 1 425 | 3 100 | 3 600 | 4 200 |
| 550 | 1 300/1 425 | 1 050 | 2 600 | 3 400 | 1 575 | 3 600 | 4 200 | 4 200 |
| | | | 2 200 | 2 400 [†] | 2 900 | 1 615 | 3 700 | 4 300 |
| | 1 175/1 300 | 950 | 2 200 | 2 900 [†] | 2 900 | 1 615 | 3 700 | 4 300 |
| 800 | 1 300/1 425 | 1 050 | 2 600 | 3 400 | 1 680 | 3 900 | 4 600 | 4 600 |
| | 1 425/1 550 | 1 175 | 3 100 | 4 100 | 1 753 | 4 200 | 5 000 | 5 000 |
| | 1 675/1 800 | 1 300 | 3 600 | 4 800 | 2 210 | 6 100 | 7 400 | 7 400 |
| 1 100 | 1 800/1 950 | 1 425 | 4 200 | 5 600 | 2 423 | 7 200 | 9 000 | 9 000 |
| | 1 950/2 100 | 1 550 | 4 900 | 6 400 | 2 480 | 7 600 | 9 400 | 9 400 |
| | 1 950/2 100 | 1 425 [†] | 4 200 | 5 600 | - | - | - | - |
| | 2 100/2 250 | 1 550 | 4 900 | 6 400 | 2 635 | 8 400 [†] | 10 000 [†] | 10 000 [†] |
| 1 200 | 2 250/2 400 | 1 675 | 5 600 [†] | 7 400 [†] | 2 764 | 9 100 [†] | 10 900 [†] | 10 900 [†] |
| | 2 400/2 550 | 1 800 | 6 300 [†] | 8 300 [†] | 2 880 | 9 800 [†] | 11 600 [†] | 11 600 [†] |
| | 2 100/2 250 | 1 675 | 5 600 [†] | 7 400 [†] | 2 848 | 9 600 [†] | 11 400 [†] | 11 400 [†] |
| 1 200 | 2 250/2 400 | 1 800 | 6 300 [†] | 8 300 [†] | 2 970 | 10 300 [†] | 12 300 [†] | 12 300 [†] |
| | 2 550/2 700 | 1 950 | 7 200 [†] | 9 500 [†] | 3 120 | 11 200 [†] | 13 300 [†] | 13 300 [†] |

Para os cálculos de energia incidente em alta tensão na metodologia EPRI, as seguintes condições de contorno são impostas:

- Curto monofásico;
- Arco vertical;
- Corrente de arco igual a corrente de curto;
- Ambiente aberto.

Para a determinação da energia incidente, é calculado primeiramente o gradiente de potencial:

$$E_{ave} = \alpha + \beta I_{arc} = 0.0000112G^{-8} + 1.19 + (0.0069G^{-1.239} - 0.0126)I_{arc}$$

Onde:

G – Gap length (comprimento do vão entre fase e terra) – cadeia de isoladores [m]

I_{arc} – Corrente de Arco [kA] (igual corrente de curto franco fase – terra)

E_{ave} – Gradiente de potencial [kV/m]

Para o cálculo da tensão de arco:

$$V_{arc,ms} = \frac{[0.0000112G^{-8} + 1.19 + (0.0069G^{-1.239} - 0.0126)I_{arc}]G}{1.1255}$$

Onde:

G – Gap length (comprimento do vão entre fase e terra) – cadeia de isoladores [m]

I_{arc} – Corrente de Arco [kA] (igual corrente de curto franco fase – terra)

V_{arc} – Tensão de Arco [kV]

Através da tensão de arco é elaborado o cálculo do fluxo de energia:

$$\Phi = 6.7 \times E_{ave} \times I_{arc} \times G^{0.58} \times (3.281 \times D)^{-1.58G^{-0.152}}$$

Onde:

Φ = Fluxo de energia [cal/(cm². s)]

E_{ave} – Gradiente de potencial [kV/m]

G – Gap length (comprimento do vão entre fase e terra) – cadeia de isoladores [m]

I_{arc} – Corrente de Arco [kA] (igual corrente de curto franco fase – terra)

D – Distância de trabalho [m]

O cálculo da energia incidente corresponde ao produto do tempo pelo fluxo de calor.

$$W = \Phi \times T$$

Onde:

W – Energia incidente [cal/cm²]

Φ – Fluxo de energia [cal/(cm². s)]

T – tempo de atuação da proteção [s]

O limite dos dados pelo modelamento do EPRI garantido em ensaio está indicado na Tabela 3.

TABELA 3 - VALORES ASSEGURADOS EM ENSAIO PELO EPRI.

| Parameter | Description |
|---|---------------------|
| Gap orientation | Vertical |
| Gap length (ft); gap length (m) | 1 – 5; 0.31 – 1.5 |
| Current (kArms) | 8 – 40 |
| Duration (s); duration (cycles) | 0.033 – 0.2; 2 – 12 |
| Electrode material | Stainless steel |
| Working distance (ft); working distance (m) | 1 – 4; 0.31 – 1.2 |

Em função dos dados obtidos e a regressão linear dos dados, o valor da energia incidente calculado deve ser multiplicado pelo fator estatístico.

$$W_{MAX} = W \cdot k$$

$$k = (1 + n \times \sigma)$$

W_{MAX} = Energia incidente máxima com o ajuste do valor estatístico [cal/cm²]

Na qual o valor de k é 1,588.

Para a consideração da distância de trabalho, é utilizado o mesmo procedimento da OSHA 1910.269.

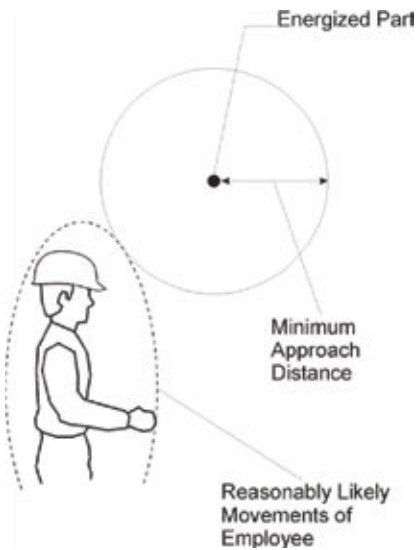


Figura 2 - Ilustração da posição de trabalho e distância.

Os valores normalizados e utilizados na OSHA 1910.269 constam na Tabela 4.

TABELA 4 - 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 |

Vamos aplicar com um exemplo de um pátio de uma subestação 230 kV.

Condições de contorno:

$U_{LL} = 230$ kV
 $I_{bf} = 30$ kA
 $t = 0,166$ s ou 10 ciclos
 $MAD = 1,72$ m
 $NBI = 1050$ kV

Para o comprimento de arco "Arc Length" será utilizado a distância em relação ao NBI.

$G = 2,10$ m

$$E_{ave} = \alpha + \beta I_{arc} = 0.0000112G^{-8} + 1.19 + (0.0069G^{-1.239} - 0.0126)I_{arc}$$

Considerando:

$I_{arc} = 30$ kA
 $G = 2,10$ m
 $E_{ave} = 0,89$ kV/m

$$\Phi = 6.7 \times E_{ave} \times I_{arc} \times G^{0.58} \times (3.281 \times D)^{-1.58} G^{-0.152}$$

$\Phi = 24,04$ cal/cm².s

Estimando a energia incidente:

$$W = \Phi \times T$$

$W = 3,99$ cal/cm²

Usando coordenadas espaciais, onde:

$$Z = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad X = 1,22 \text{ m} \quad Y = 1,22 \text{ m} \quad Z = 1,72$$

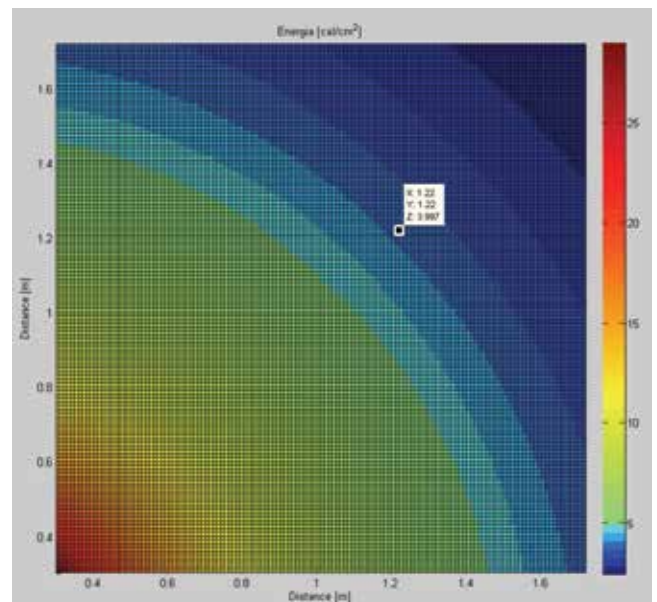


Figura 3 - Gráfico por cálculo incremental.

sil.com.br

**SIL, CONECTADA
COM PEQUENAS
E GRANDES
OBRAS.**

CABO FLEXÍVEL SILNAX 0,6/1 kV HEPR 90 °C Δ



Pensou nos cabos grossos para o padrão de entrada do seu projeto, use os **Cabos Flexíveis Silnax 0,6/1 kV HEPR 90°C**, que podem ser utilizados em todos os métodos de instalações descritos da tabela 33 - Tipos de Linhas Elétricas, da norma NBR 5410 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão.

SIL, energia e proteção de qualidade.



SIL ESTÁ NA REDE!
SIGA-NOS

Sil

Conectada com o futuro.

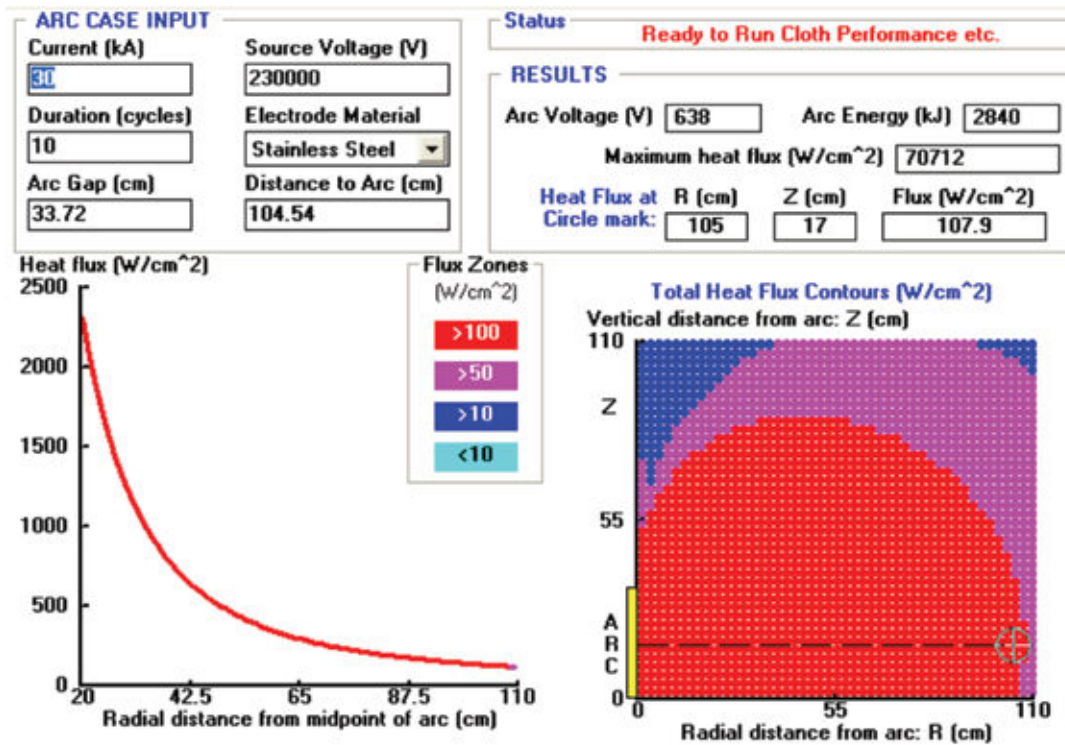


Figura 5 - Tela do ARC PRO.

Traçando o gráfico da distância de trabalho x energia incidente, pode-se observar que esta metodologia não obedece à lei do inverso do quadrado das distâncias.

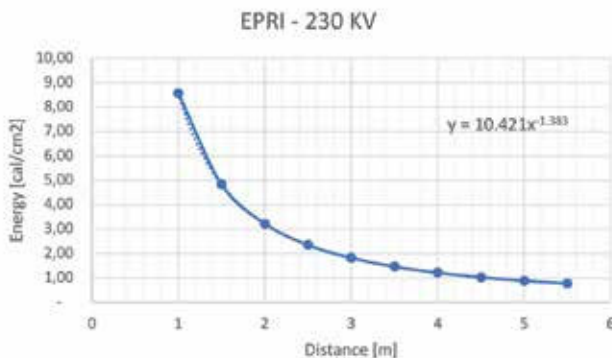


Figura 4 - Energia incidente x distância.

Na metodologia EPI, o valor do expoente depende do comprimento de arco, “Gap Length”.

Aplicando o fator estatístico:

$$W_{MAX} = W \cdot k$$

$$W_{MAX} = 6,34 \text{ cal/cm}^2$$

Como forma de comparação, será feito o mesmo cálculo usando o programa ArcPro com as considerações da OSHA 1910.269.

$$E_i = 4,39 \text{ cal/cm}^2$$

De maneira resumida:

| | OSHA 1910.269 | ArcPro | EPRI | EPRI com Coeficiente |
|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 230 kV | 5,00 cal/cm ² | 4,39 cal/cm ² | 3,99 cal/cm ² | 6,34 cal/cm ² |

A avaliação para alta tensão sempre considera arcos verticais em ambiente aberto. Os valores obtidos, tanto na tabela da OSHA 1910.269 (Anexo E) como pelo ArcPro, ou ainda através da metodologia do EPRI, são bem próximos e coerentes.

As duas metodologias podem ser utilizadas lembrando as condições de contorno de cada método e/ou programa:

| | ArcPro | EPRI |
|-----------------------|--------------------------------|--|
| Comprimento do arco | “Arc Gap” 10 kV/in | “Arc Length” Distância física entre fase -terra |
| Distância de trabalho | MAD – 2 x Arc Gap | Distância física operador e ponto energizado |
| Corrente de Arco | Corrente de curto fase - terra | Corrente de curto fase - terra |

*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.