

Avaliação de energia incidente

Por Luiz Carlos Catelani Junior*

Capítulo III

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

A nova edição da IEEE 1584 – 2018 foi bastante modificada em relação aos cálculos de energia incidente com tensões acima de 600 V.

Na versão antiga existia um conjunto de equações para baixa tensão, até 1000 V, e outro conjunto para tensões acima de 1kV e inferior a 15 kV.

Hoje para tensões acima de 600 V deve ser calculados valores intermediários em três faixas de tensão previamente definidas na norma:

- 600 V
- 2700 V
- 14300 V

Isto quer dizer que tanto para o cálculo de energia incidente como para distância de aproximação segura para o arco elétrico, o cálculo é feito em três faixas e interpolado para o valor da tensão real de trabalho.

Outro fato é que os valores obtidos estão relacionados com o tamanho dos invólucros dos equipamentos. Na versão antiga os valores de testes eram fixos e não existia fatores para correção de forma.

O tamanho padrão dos invólucros corresponde aos mostrados na Tabela -1.

Para o cálculo da corrente de arco inicialmente deve ser calculado a corrente de arco para faixas de tensão intermediária, 600 V , 2700 V e 14300 V.

FAIXA DE 600 V:

$$I_{a600} = 10^{(k1+k2 \log(I_{bf})+k3 \log(G))} \cdot (k4 I_{bf}^6 + k5 I_{bf}^5 + k6 I_{bf}^4 + k7 I_{bf}^3 + k8 I_{bf}^2 + k9 I_{bf} + k10)$$

FAIXA DE 2700 V:

$$I_{a2700} = 10^{(k1+k2 \log(I_{bf})+k3 \log(G))} \cdot (k4 I_{bf}^6 + k5 I_{bf}^5 + k6 I_{bf}^4 + k7 I_{bf}^3 + k8 I_{bf}^2 + k9 I_{bf} + k10)$$

FAIXA DE 14300 V:

$$I_{a14300} = 10^{(k1+k2 \log(I_{bf})+k3 \log(G))} \cdot (k4 I_{bf}^6 + k5 I_{bf}^5 + k6 I_{bf}^4 + k7 I_{bf}^3 + k8 I_{bf}^2 + k9 I_{bf} + k10)$$

Sendo:

I_{bf} → Corrente de curto-circuito franca [kA]

G → Distância entre condutores [mm]

I_{arc600} , $I_{arc2700}$, $I_{arc14300}$ → Corrente de arco intermediária [kA]

$k1$ a $k10$ → constantes da Tabela 2 em função da configuração dos eletrodos

TABELA 1 – DIMENSÃO DOS INVÓLUCROS.

Open Voltage	Tamanho [mm]	Tamanho [in]
600 V	508 x 508 x 508	20 x 20 x 20
2700 V	660,4 x 660,4 x 660,4	26 x 26 x 26
14300 V	914,4 x 914,4 x 914,4	36 x 36 x 36

TABELA 2 – CONSTANTES DA CORRENTE DE ARCO.

E.C./V _{oc}	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	
VCB	600 V	-0.04287	1.035	-0.083	0	0	-4.783E-09	1.962E-06	-0.000229	0.003141	1.092
	2 700 V	0.0065	1.001	-0.024	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729
	14 300 V	0.005795	1.015	-0.011	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729
VCBB	600 V	-0.017432	0.98	-0.05	0	0	-5.767E-09	2.524E-06	-0.00034	0.01187	1.013
	2 700 V	0.002823	0.995	-0.0125	0	-9.204E-11	2.901E-08	-3.262E-06	0.0001569	-0.004003	0.9825
	14 300 V	0.014827	1.01	-0.01	0	-9.204E-11	2.901E-08	-3.262E-06	0.0001569	-0.004003	0.9825
HCB	600 V	0.054922	0.988	-0.11	0	0	-5.382E-09	2.316E-06	-0.000302	0.0091	0.9725
	2 700 V	0.001011	1.003	-0.0249	0	0	4.859E-10	-1.814E-07	-9.128E-06	-0.0007	0.9881
	14 300 V	0.008693	0.999	-0.02	0	-5.043E-11	2.233E-08	-3.046E-06	0.000116	-0.001145	0.9839
VOA	600 V	0.043785	1.04	-0.18	0	0	-4.783E-09	1.962E-06	-0.000229	0.003141	1.092
	2 700 V	-0.02395	1.006	-0.0188	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729
	14 300 V	0.005371	1.0102	-0.029	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729
HOA	600 V	0.111147	1.008	-0.24	0	0	-3.895E-09	1.641E-06	-0.000197	0.002615	1.1
	2 700 V	0.000435	1.006	-0.038	0	0	7.859E-10	-1.914E-07	-9.128E-06	-0.0007	0.9981
	14 300 V	0.000904	0.999	-0.02	0	0	7.859E-10	-1.914E-07	-9.128E-06	-0.0007	0.9981

Após o cálculo da corrente de arco nas classes de tensão deve se determinar as correntes intermediárias que são interpolação das classes de tensão predefinidas.

$$I_{arc2} = \frac{I_{a14300} - I_{a2700}}{11,6} \cdot (V_{oc} - 14,3) + I_{a14300}$$

$$I_{arc1} = \frac{I_{a2700} - I_{a600}}{2,1} \cdot (V_{oc} - 2,7) + I_{a2700}$$

$$I_{arc3} = \frac{I_{arc1}(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{I_{arc2}(2,7 - 0,6)}{2,1}$$

varixx

Monitore instalações elétricas e reduza a energia incidente!

Zyggot Arco e Zyggot Temperatura são duas soluções inteligentes que, quando combinadas, maximizam a segurança do seu sistema elétrico, associando um sistema de proteção contra arco elétrico e a redução da energia incidente aliado a um sistema que fornece diagnósticos preditivos e monitoramento contínuo de temperatura de pontos críticos em painéis e sistemas de baixa e média tensão.



◀ Saiba mais

I_{arc1} , I_{arc2} , I_{arc3} → Correntes de arco interpoladas [kA]

V_{oc} → Tensão nominal do circuito [kV]

I_{arc600} , $I_{arc2700}$, $I_{arc14300}$ → Corrente de arco por faixas [kA]

Para cálculos aonde a tensão for maior que 600 V e menor que 2700 V:

$I_{arc} = I_{arc3}$

Quando a tensão for maior que 2700 V e menor que 15000 V:

$I_{arc} = I_{arc2}$

Para a distância entre eletrodos de 601 V até 15000 V os valores de 19,05 mm – 254 mm são permitidos e possuem validação.

Após a obtenção da corrente de arco na tensão desejada deverá ser calculada a corrente de arco mínima para obtenção do tempo de atuação da proteção.

Com a corrente de arco calculada passa a calcular a corrente de arco mínima.

$$\text{VarCf} = k1V_{oc}^6 + k2V_{oc}^5 + k3V_{oc}^4 + k4V_{oc}^3 + k5V_{oc}^2 + k6V_{oc}^1 + k7$$

$$Cf = 1 - 0,5 \cdot \text{VarCF}$$

V_{oc} → Tensão nominal do circuito [kV]

$k1$ a $k7$ → constantes da Tabela 3

Cf → Coeficiente de variação da corrente de arco na Tabela 3

$$I_{arc_min} = Cf \times I_{arc}$$

Diferente da versão passada da norma aonde “Correction

fator (Cf) era fixo e igual a 0,85 para qualquer faixa de tensão.

Com o valor da corrente de arco e a corrente de arco mínimo deve ser obtido o tempo de atuação da proteção.

Para a determinação do tempo de eliminação do arco elétrico, que corresponde a soma do tempo da unidade de proteção mais o tempo de abertura do dispositivo de seccionamento, não há mais os valores padronizados conforme a versão antiga.

Como regra geral sempre o fabricante dos equipamentos deve ser consultado para obtenção dos dados. O valor a ser solicitado é o “breaking time” que corresponde ao tempo total desde o início do da abertura até a extinção do arco.

Deve também obter a correção do fator de forma dos compartimentos em função do tamanho.

Acima de 600 V os invólucros podem apresentar diversos tamanhos, sendo assim uma tabela 4 foi construída para facilitar os cálculos.

Equação 1:

$$\text{Width1} = \frac{660,4 + (\text{Width} - 660,4) \cdot \left(\frac{V_{oc} + A}{B}\right)}{25,5}$$

Equação 2:

$$\text{Height1} = \frac{660,4 + (\text{Height} - 660,4) \cdot \left(\frac{V_{oc} + A}{B}\right)}{25,5}$$

TABELA 3 – CÁLCULO DO LIMITE INFERIOR DA CORRENTE DE ARCO

E.C.	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7
VCB	0	-0.0000014269	0.000083137	-0.0019382	0.022366	-0.12645	0.30226
VCBB	1.138e-06	-6.0287e-05	0.0012758	-0.013778	0.080217	-0.24066	0.33524
VCBB	0	-3.097e-06	0.00016405	-0.0033609	0.033308	-0.16182	0.34627
VOA	9.5606E-07	-5.1543E-05	0.00111161	-0.01242	0.075125	-0.23584	0.33696
HOA	0	-3.1555e-06	0.0001682	-0.0034607	0.034124	-0.1599	0.34629

TABELA 4 – COEFICIENTES DE CORREÇÃO PARA TAMANHO DO INVÓLUCRO

Configuração	660,4 mm até 1244,6mm	Maior que 1244,6mm
VCB	Width1	Equação 1
	Height1	0,03937 x Height
VCBB	Width1	Equação 1
	Height1	Equação 2
VCBB	Width1	Equação 1
	Height1	Equação 2



Solução completa em dispositivos de proteção, comando e medição elétrica

Referência mundial em automação industrial, a Mitsubishi Electric fornece também produtos e soluções para proteção elétrica de instalações, que podem ser aplicados em diversos segmentos, de grandes indústrias e edifícios a painéis e residências, inclusive no canteiro de obras.

Nossa família de produtos de baixa tensão é composta por disjuntores, contatores, relés de sobrecarga e multimedidores. São mais de cinco mil itens fabricados no Japão, de fácil instalação e manutenção, além de alta qualidade, confiabilidade e custo-benefício. São disjuntores até 6.300A e partidas de motores até 800A que seguem as principais normas internacionais de segurança, atendendo inúmeros clientes ao redor do mundo.

No Brasil, contamos com uma vasta rede de distribuidores e integradores de sistemas devidamente treinados e prontos para atendê-lo tanto em novas instalações como em retrofits. Acesse os nossos canais de comunicação e conheça mais.

Conheça a Mitsubishi Electric nos seguintes canais:



mitsubishielectric.com.br/ia



@mitsubishielectric.br



@mitsubishielectric_br



(11) 4689-3000



@mitsubishielectric_br



mitsubishi-electric-brasil

Automating the World

TABELA 5 – CONSTANTES PARA CORREÇÃO DO TAMANHO DO INVÓLUCRO

E.C.	A1	k2	k3	k4	k5	k6	k7
VCB	0	-0.0000014269	0.000083137	-0.0019382	0.022366	-0.12645	0.30226
VCBB	1.138e-06	-6.0287e-05	0.0012758	-0.013778	0.080217	-0.24066	0.33524
HCB	0	-3.097e-06	0.00016405	-0.0033609	0.033308	-0.16182	0.34627
VOA	9.5606E-07	-5.1543E-05	0.0011161	-0.01242	0.075125	-0.23584	0.33696
HOA	0	-3.1555e-06	0.0001682	-0.0034607	0.034124	-0.1599	0.34629

Width → Largura [mm]

Height → Altura [mm]

Voc → Tensão do circuito [kV]

Constante A = 4 para VCB e A = 10 para VCBB e HCB

Constante B = 20 para VCB, B = 24 para VCBB e B = 22 para HCB

$$EES = \frac{Height1 + Width1}{2}$$

EES → Tamanho equivalente do invólucro [in]

$$CF = b1.EES^2 + b2.EES + b3$$

CF → Correção de fator

b1, b2 e b3 → Constantes da norma da Tabela 5

Da mesma forma que na corrente de arco elétrico, a energia deverá ser calculada em três faixas.

Cálculo da energia incidente na faixa de 600 V.

$$E_{600} = \frac{12552}{50} \cdot t \cdot 10^{(A+B+C)}$$

$$A = k_1 + k_2 \cdot \log(G)$$

$$B = \frac{k_3 \cdot I_{arc600}}{k_4 Ibf^7 + k_5 Ibf^6 + k_6 Ibf^5 + k_7 Ibf^4 + k_8 Ibf^3 + k_9 Ibf^2 + k_{10} Ibf^1}$$

$$C = k_{11} \log(Ibf) + k_{12} \log(D) + k_{13} \log(I_{arc}) + \log\left(\frac{1}{CF}\right)$$

Cálculo da energia incidente na faixa de 2700 V.

$$E_{2700} = \frac{12552}{50} \cdot t \cdot 10^{(A+B+C)}$$

$$A = k_1 + k_2 \cdot \log(G)$$

$$B = \frac{k_3 \cdot I_{arc2700}}{k_4 Ibf^7 + k_5 Ibf^6 + k_6 Ibf^5 + k_7 Ibf^4 + k_8 Ibf^3 + k_9 Ibf^2 + k_{10} Ibf^1}$$

$$C = k_{11} \log(Ibf) + k_{12} \log(D) + k_{13} \log(I_{arc}) + \log\left(\frac{1}{CF}\right)$$

Cálculo da energia incidente na faixa de 14300 V.

$$E_{14300} = \frac{12552}{50} \cdot t \cdot 10^{(A+B+C)}$$

$$A = k_1 + k_2 \cdot \log(G)$$

$$B = \frac{k_3 \cdot I_{arc14300}}{k_4 Ibf^7 + k_5 Ibf^6 + k_6 Ibf^5 + k_7 Ibf^4 + k_8 Ibf^3 + k_9 Ibf^2 + k_{10} Ibf^1}$$

$$C = k_{11} \log(Ibf) + k_{12} \log(D) + k_{13} \log(I_{arc}) + \log\left(\frac{1}{CF}\right)$$

Onde:

 $E_{600} / E_{2700} / E_{14300}$ → Energia incidente por faixa [J/cm²]

t → Tempo de duração do arco elétrico [ms]

G → Distância entre condutores [mm]

 $I_{arc600} / I_{arc2700} / I_{arc14300}$ → Corrente de arco por faixa [kA]

 I_{arc} → Corrente de arco [kA]

 $K_1 \dots K_{13}$ → Constantes da Tabela 6

D → Distância do arco elétrico [mm]

CF → Fator de correção da forma do painel

Com o resultado da energia incidente por faixas deve-se calcular os valores interpolados.

$$E_1 = \frac{E_{2700} - E_{600}}{2,1} \cdot (V_{oc} - 2,7) + E_{2700}$$

$$E_2 = \frac{E_{14300} - E_{2700}}{11,6} \cdot (V_{oc} - 14,3) + E_{14300}$$

$$E_3 = \frac{E_1(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{E_2(2,7 - 0,6)}{2,1}$$

 E_1, E_2, E_3 → Valores de energia incidente interpolados [J/cm²]

Voc → Tensão nominal do circuito [kV]

 $E_{600}, E_{2700}, E_{14300}$ → Energia incidente intermediária [J/cm²]

Da mesma forma o cálculo de distância de aproximação no limite de arco elétrico (Arc Flash Boundary - AFB) deve ser calculado por faixas também.

Faixa de 600 V:

$$AFB_{600} = 10^{\left(\frac{A+B+F}{-k_{12}}\right)}$$

$$A = k_1 + k_2 \cdot \log(G)$$

TABELA 6 – CONSTANTES PARA CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE

600 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
VCB	0.753364	0.566	1.752636	0	0	-4.783E-09	0.000001962	-0.000229	0.003141	1.092	0	-1.598	0.957
VCBB	3.068459	0.26	-0.098107	0	0	-5.767E-09	0.000002524	-0.00034	0.01187	1.013	-0.06	-1.809	1.19
HCB	4.073745	0.344	-0.370259	0	0	-5.382E-09	0.000002316	-0.000302	0.0091	0.9725	0	-2.03	1.036
VOA	0.679294	0.746	1.222636	0	0	-4.783E-09	0.000001962	-0.000229	0.003141	1.092	0	-1.598	0.997
HOA	3.470417	0.465	-0.261863	0	0	-3.895E-09	0.000001641	-0.000197	0.002615	1.1	0	-1.99	1.04

2700 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
VCB	2.40021	0.165	0.354202	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729	0	-1.569	0.9778
VCBB	3.870592	0.185	-0.736618	0	-9.204E-11	2.901E-08	-3.262E-06	0.0001569	-0.004003	0.9825	0	-1.742	1.09
HCB	3.486391	0.177	-0.193101	0	0	4.859E-10	-1.814E-07	-9.128E-06	-0.0007	0.9881	0.027	-1.723	1.055
VOA	3.880724	0.105	-1.906033	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729	0	-1.515	1.115
HOA	3.616266	0.149	-0.761561	0	0	7.859E-10	-1.914E-07	-9.128E-06	-0.0007	0.9981	0	-1.639	1.078

14300 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
VCB	3.825917	0.11	-0.999749	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729	0	-1.568	0.99
VCBB	3.644309	0.215	-0.585522	0	-9.204E-11	2.901E-08	-3.262E-06	0.0001569	-0.004003	0.9825	0	-1.677	1.06
HCB	3.044516	0.125	0.245106	0	-5.043E-11	2.233E-08	-3.046E-06	0.000116	-0.001145	0.9839	0	-1.655	1.084
VOA	3.405454	0.12	-0.93245	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729	0	-1.534	0.979
HOA	2.04049	0.177	1.005092	0	0	7.859E-10	-1.914E-07	-9.128E-06	-0.0007	0.9981	-0.05	-1.633	1.151

$$B = \frac{k_3 \cdot I_{arc600}}{k_4 \text{ lbf}^7 + k_5 \text{ lbf}^6 + k_6 \text{ lbf}^5 + k_7 \text{ lbf}^4 + k_8 \text{ lbf}^3 + k_9 \text{ lbf}^2 + k_{10} \text{ lbf}^1}$$

$$F = k_{11} \log(\text{lbf}) + k_{13} \log(I_{arc600}) + \log\left(\frac{1}{CF}\right) - \log\left(\frac{20}{t}\right)$$

Faixa de 2700 V:

$$AFB_{2700} = 10^{\left(\frac{A+B+F}{-k_{12}}\right)}$$

$$A = k_1 + k_2 \cdot \log(G)$$

$$B = \frac{k_3 \cdot I_{arc2700}}{k_4 \text{ lbf}^7 + k_5 \text{ lbf}^6 + k_6 \text{ lbf}^5 + k_7 \text{ lbf}^4 + k_8 \text{ lbf}^3 + k_9 \text{ lbf}^2 + k_{10} \text{ lbf}^1}$$

$$F = k_{11} \log(\text{lbf}) + k_{13} \log(I_{arc2700}) + \log\left(\frac{1}{CF}\right) - \log\left(\frac{20}{t}\right)$$

Faixa de 14300 V:

$$AFB_{14300} = 10^{\left(\frac{A+B+F}{-k_{12}}\right)}$$

$$A = k_1 + k_2 \cdot \log(G)$$

$$B = \frac{k_3 \cdot I_{arc14300}}{k_4 \text{ lbf}^7 + k_5 \text{ lbf}^6 + k_6 \text{ lbf}^5 + k_7 \text{ lbf}^4 + k_8 \text{ lbf}^3 + k_9 \text{ lbf}^2 + k_{10} \text{ lbf}^1}$$

$$F = k_{11} \log(\text{lbf}) + k_{13} \log(I_{arc14300}) + \log\left(\frac{1}{CF}\right) - \log\left(\frac{20}{t}\right)$$

$AFB_{600} / AFB_{2700} / AFB_{14300} \rightarrow$ Limite de aproximação para arco elétrico [mm]

t \rightarrow Tempo de duração do arco elétrico [ms]

G \rightarrow Distância entre condutores [mm]

$I_{arc600} / I_{arc2700} / I_{arc14300} \rightarrow$ Corrente de arco por faixa [kA]

$K_1 \dots K_{13} \rightarrow$ Constantes da Tabela 6

CF \rightarrow Fator de correção da forma do painel

A / B / F \rightarrow Valores intermediários para cálculo

Calcular os valores interpolados.

$$AFB_1 = \frac{AFB_{2700} - AFB_{600}}{2,1} \cdot (V_{oc} - 2,7) + AFB_{2700}$$

$$AFB_2 = \frac{AFB_{14300} - AFB_{2700}}{11,6} \cdot (V_{oc} - 14,3) + AFB_{14300}$$

$$AFB_3 = \frac{AFB_1(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{AFB_2(2,7 - 0,6)}{2,1}$$

Para tensões maiores que 600 V e menores que 2700 V:

Ei = E₃

AFB = AFB₃

Para tensões maiores que 2700 V e menores que 15000 V:

Ei = E₂

AFB = AFB₂

Se para casos de cálculo de energia incidente até 600 V já era trabalhoso, para casos com tensão superior a 600 V tornou-se muito mais. Deve ser calculado valores por classe (600 V, 2700 V e 14300 V) da corrente de arco, energia incidente e distância de aproximação para arco elétrico e somente após isso a interpolação para a tensão desejada.

Na próxima edição faremos um exemplo prático de cálculo.

**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.*