

Avaliação de energia incidente

Por Luiz Carlos Catelani Junior*



Capítulo II

Cálculo de energia incidente – Modelo IEEE 1584 - Edição 2018 baixa tensão

No ano de 2021 as principais normas que tratavam da estimativa e cálculo de energia incidente sofreram revisões e foram lançadas nas suas versões atualizadas.

Neste caso, estamos nos referindo a NFPA© 70E – 2021 e IEEE© 1584 – 2018.

A grande alteração é que a metodologia do IEEE 1584 da edição de 2002 foi totalmente atualizada e essa atualização também foi reproduzida na edição da NFPA 70E - 2021. Ficando assim uma harmonia como referência normativa.

No caso da IEEE© 1584 – 2018 a citação que existia no passado em relação à metodologia de Ralph Lee foi retirada do texto. Agora a norma fica restrita aos valores de contorno mostrados abaixo e não indica ou recomenda qualquer tipo de metodologia fora da sua abrangência do modelo matemático.

Limites transcritos da IEEE© 1584 – 2018:

- Tensão trifásica de 208 V – 15.000 V
- Frequência 50 Hz ou 60 Hz
- Corrente de curto-circuito: simétrica
 - 208 V à 600 V: 500 A – 106.000 A
 - 601 V à 15.000 V: 200 A – 65 000 A
- Distâncias entre eletrodos:
 - 208 V à 600 V: 6,35 mm – 76,2 mm
 - 601 V à 15 000 V: 19,05 mm – 254,0 mm

Outra grande mudança está no fato que não é mais levado em conta o sistema de aterramento da fonte. No passado existia o cálculo para as opções: aterrado “ground” ou não aterrado “unground” o que alterava os valores calculados.

Na edição de 2002 toda a metodologia de cálculo era feita com

eletrodos na posição vertical em configuração aberto “open” ou enclausurado “closed”.

Com a revisão a posição do eletrodo passa a ter cinco opções distintas:

- VCB (vertical conductor in the box)
- HCB (horizontal conductor in the box)
- VOA (vertical conductor open air)
- HOA (horizontal conductor open air)
- VCBB (vertical conductor in the box with barrier)

A configuração VCB corresponde analogamente a condição “Box” da edição anterior, enquanto a configuração VOA a situação “open”.

Outra mudança que houve foi na classificação dos equipamentos. Na edição de 2002 havia a possibilidade:

- Cable
- Open air
- MCC
- Switchgear

Essa denominação também não existe mais desta forma levando agora o tamanho do invólucro como parâmetro para cálculo.

Os tamanhos considerados padrões estão relacionados na Tabela 1.

TABELA 1 – DIMENSÃO PADRÃO 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

Foi também dividido em classes de tensão para a aproximação dos cálculos sendo elas:

- 600 V
- 2700 V
- 14300 V

Em função da tensão do sistema são feitas as aproximações previstas para as classes de tensão sendo tratado como baixa tensão até o valor de 600 V.

No caso sistemas de 690 V são tratados como interpolação de todas as três classes acima e usa a mesma metodologia para o cálculo de média tensão.

Devido a todas estas mudanças vamos estabelecer um roteiro para cálculo de energia incidente na baixa tensão (até 600 V) na versão de 2018.

A primeira etapa do cálculo consiste em determinar a corrente de arco na faixa de 600V.

$$I_{arc600} = 10^{(k1+k2 \log(I_{bf})+k3 \log(G))} \cdot (k4 I_{bf}^6 + k5 I_{bf}^5 + k6 I_{bf}^4 + k7 I_{bf}^3 + k8 I_{bf}^2 + k9 I_{bf}^1 + k10)$$

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

G → Distância entre condutores [mm]

I_{arc600} → Corrente de arco intermediária faixa 600 V [kA]

k1 a k10 → constantes da Tabela 2

Para a distância entre eletrodos até 600 V os valores de 6,35 mm – 76,2 mm são permitidos no modelo matemático.

Após a obtenção da corrente de arco na faixa de 600 V deve-se fazer a interpolação para a tensão nominal do circuito.

TABELA 2 – CONSTANTES DA CORRENTE DE ARCO.

E.C./F _u	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	
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

Detecção inteligente contra Arcos Elétricos

O **Zygot Arco** protege sistemas elétricos e componentes através de uma rede inteligente de sensores que detectam arco elétrico através da radiação UV. Pode ser aplicado em painéis elétricos de baixa, média e alta tensão e em aplicações externas. Importante: não atua com luz visível e dispensa leitura de corrente. A solução mais rápida do mercado.



◀ Saiba mais



VARIXX

$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{0,6}{V_{oc}}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{I_{arc600}^2} - \left(\frac{0,6^2 - V_{oc}^2}{0,6^2 \cdot I_b f^2}\right)\right)}}$$

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

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

I_{arc600} → Corrente de arco intermediária 600 V [kA]

I_{arc} → Corrente de arco [kA]

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

$$VarCf = k1 Voc^6 + k2 Voc^5 + k3 Voc^4 + k4 Voc^3 + k5 Voc^2 + k6 Voc + k7$$

$$Cf = 1 - 0,5 \cdot VarCF$$

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

$k1$ a $k7$ → constantes da Tabela 3

Cf → Coeficiente de variação da corrente de arco

TABELA 3 – CÁLCULO DO LIMITE INFERIOR DA CORRENTE DE ARCO.

E.C.	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7
VCB	0	-0.0000014269	0.0000031137	-0.0019382	0.022366	-0.12643	0.30226
VCBB	1.138e-06	-6.0297e-05	0.0012758	-0.013778	0.000217	-0.24066	0.33524
HCB	0	-3.097e-06	0.00016405	-0.0033609	0.033308	-0.16182	0.34627
VOA	0.5606E-07	-5.1543E-03	0.0011161	-0.01242	0.075125	-0.23584	0.33696
HOA	0	-3.1555e-06	0.0001682	-0.0034607	0.034124	-0.1399	0.34629

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

Diferente da versão passada da norma onde “Correction fator (Cf)” era fixo e igual a 0,85.

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 à 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.

Agora ela remete todas essas considerações a IEEE Std. 551 – Violet Book. Como recomendação geral só sinaliza que para baixa tensão, os tempos de eliminação do arco não deve ser inferior a 50 ms para disjuntores e no caso de fusíveis não inferior a 10 ms.

Sempre o fabricante dos equipamentos deve ser consultado para obtenção dos tempos. O valor a ser solicitado é o “breaking time” que corresponde ao tempo total desde o início do defeito até a extinção do arco.

Outro ponto é a obtenção da correção do fator de forma dos

TABELA 5 – 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

compartimentos em função do tamanho.

Essa fórmula é válida para compartimentos de 508 mm até 660,4 mm e enquadra a faixa padrão de cálculo para compartimentos em baixa tensão.

Height → Altura do compartimento [mm]

Width → Largura do compartimento [mm]

Height1 = Height . 0,03937

Width1 = Width . 0,03937

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

EES → Tamanho equivalente do invólucro [in]

Com o tamanho equivalente do invólucro (EES) será obtido o valor de correção (CF).

$$CF = b1 \cdot EES^2 + b2 \cdot EES + b3$$

CF → Correção de fator

$b1, b2$ e $b3$ → constantes da norma da Tabela 4

TABELA 4 – CONSTANTES PARA CORREÇÃO DO TAMANHO INVÓLUCRO.

Box type	E.C.	b1	b2	b3
Typical	VCB	-0.000302	0.03441	0.4325
	VCBB	-0.0002976	0.032	0.479
	HCB	-0.0001923	0.01935	0.6899

Cálculo da energia incidente na faixa de 600 V.

Por se tratar de tensão até 600 V só é feito o cálculo nesta faixa de tensão.

$$E_{<600} = \frac{12552}{50} \cdot t \cdot 10^{[A+B+C]}$$

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

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

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

Onde:

$E_{<600}$ → Energia incidente [J/cm²]

t → Tempo de duração do arco elétrico [ms]

G → Distância entre condutores [mm]

I_{arc600} → Corrente de arco extrapolada para 600 V [kA]

I_{arc} → Corrente de arco [kA]

K_1 .. K_{13} → Constantes da Tabela 5

D → Distância do arco elétrico [mm]

CF → Fator de correção da forma do painel

BRVAL

ELECTRICAL

Soluções sob medida para uso ao tempo e uso abrigado.

BR6

Painel Compacto SF6 até 36kV
Testado conforme NBR IEC 62271-200



Uso abrigado



Uso ao tempo

G2 SLIM

Painel isolado à AR até 17,5kV
Testado conforme NBR IEC 62271-200



Uso abrigado



Uso ao tempo

BR-POWER

Transformador a seco MT até 36,2kV
Testado conforme NBR 5356



Uso abrigado

(IP00, IP21 e IP23)



Uso ao tempo

(IP54)

PROSE7

Painel de baixa tensão até 1000V
Testado conforme NBR IEC 61439



Uso abrigado



Uso ao tempo

ACESSE AQUI
DESENHOS TÉCNICOS INDIVIDUALIZADOS



BRVAL
ELECTRICAL

Atendimento ao Cliente | Vendas:

Av. Pastor Martin Luther King Jr. 126 Bl. 09 Torre 2 - Salas 1108 a 1111
Del Castilho (Shopping Nova América Condomínio Offices) - Rio de Janeiro - RJ
CEP 20.765-000 | ☎ 21 3812-3100 | 📠 21 97105-6853 | vendas@brval.com.br

Fábrica Sede:

Rodovia RJ 145, nº 27.295B - Canteiro - Valença - RJ
CEP 27.600-000 | 📞 24 2453-5004 | 📞 2453-5394 | sac@brval.com.br

Nova Unidade SP:

Rua Ribeirão Preto, nº 46 - Jardim Leocadia - Sorocaba - SP
CEP 18.085-380 | 📞 15 3327-3866 | 📞 15 99243-1717 | brvalsr@brval.com.br

✉ vendas@brval.com.br 🌐 www.brval.com.br 📱 @brvalelectrical

Finalmente o cálculo de distância de aproximação no limite de arco elétrico (Arc Flash Boundary - AFB).

Essa distância corresponde ao valor na qual a energia obtida é igual a 5 J/cm² ou 1,2 cal/cm².

$$AFB_{<600} = 10^{\left(\frac{A+B+F}{-K12}\right)}$$

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

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

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

AFB_{<600} → Limite de aproximação para arco elétrico [mm]

t → Tempo de duração do arco elétrico [ms]

G → Distância entre condutores [mm]

I_{arc600} → Corrente de arco extrapolada para 600 V [kA]

I_{arc} → Corrente de arco [kA]

K1 ..K13 → Constantes da tabela 5

CF → Fator de correção da forma do painel

O modelo de cálculo se tornou mais complexo e trabalhoso matematicamente. Visando uma didática vamos fazer um exemplo passo a passo de um equipamento com as seguintes características:

Painel de Baixa Tensão – VCB (eletrodos verticais enclausurados)

Tensão nominal – 480 V

Corrente de curto-circuito – 40 kA

Tamanho do compartimento – 508 x 508 x 508 mm (20' x 20' x 20')

Tempo de eliminação do arco – deverá ser confirmado após o cálculo da corrente de arco mínima

Gap – 32 mm

Distância de trabalho – 610 mm

Cálculo da energia incidente passo a passo

1) Calcular a corrente de arco interpolada na faixa de 600 V

Valores utilizados da Tabela 2 (VCB – 600V)

k1	k2	k3	k4	k5
-0.04287	1.035	-0.083	0	0

k6	k7	k8	k9	k10
-4.783E-09	1,96E-03	-0.000229	0.003141	1.092

$$I_{arc600} = 29,83 \text{ kA}$$

2) Calcular a corrente de arco na tensão estipulada

$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{0,6}{Voc}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{I_{arc600}^2} - \left(\frac{0,6^2 - Voc^2}{0,6^2 \cdot Ibf^2}\right)\right)}}$$

$$I_{arc} = 26,68 \text{ kA}$$

3) Estimar a variação de corrente

$$VarCf = k1 Voc^6 + k2 Voc^5 + k3 Voc^4 + k4 Voc^3 + k5 Voc^2 + k6 Voc^1 + k7$$

$$Cf = 1 - 0,5 \cdot VarCf$$

k1	k2	k3
0	-0.000014269	0,000083137

k4	k5	k6	k7
-0.0019382	0,022366	-0.12645	0,30226

$$VarCf = 0,2465$$

$$Cf = 0,8767$$

Mínima corrente de arco elétrico

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

$$I_{arc_min} = 23,39 \text{ kA}$$

4) Correção do tamanho do compartimento

Os valores da dimensão do invólucro devem ser convertidos em polegadas

Height = 508 mm

Width = 508 mm

Height1 = Height . 0,03937

Width1 = Width . 0,03937

Height1 = 20'

Width1 = 20'

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

$$EES = 20 \text{ in}$$

$$CF = b1 \cdot EES^2 + b2 \cdot EES + b3$$

Valores obtidos da Tabela 4 (VCB).

b1	b2	b3
-0.000302	0,03441	0,4325

$$CF = 0,999$$

5) Determinar o tempo de atuação da proteção

Para obtenção do tempo de eliminação do arco elétrico foi consultado o gráfico I x t Figura 2 fornecido pelo fabricante do elemento de proteção.

O tempo é definido pela corrente de arco mínima para garantir uma margem de segurança.

Ajuste do dispositivo de proteção por sobrecorrente é exibido na Figura 1.

Range	Masterpact	
Circuit-breaker	NW25H1	
Trip unit/curve	Micrologic 5.0 A	
Rating	2500.00	
Long-time		
I_o		
I_r	1.00	2500.0A
t_r	24.0	24.0s
Short-time		
I_m/t_{sd}	4.00	10000.0A
I_{st} (delay)	OFF	
t_m/t_{sd}	0.10	0.10s
Instantaneous		
I_i		OFF
Discrimination		
Limit	Upstream device	

Figura 1 – Ajustes do disjuntor do painel.

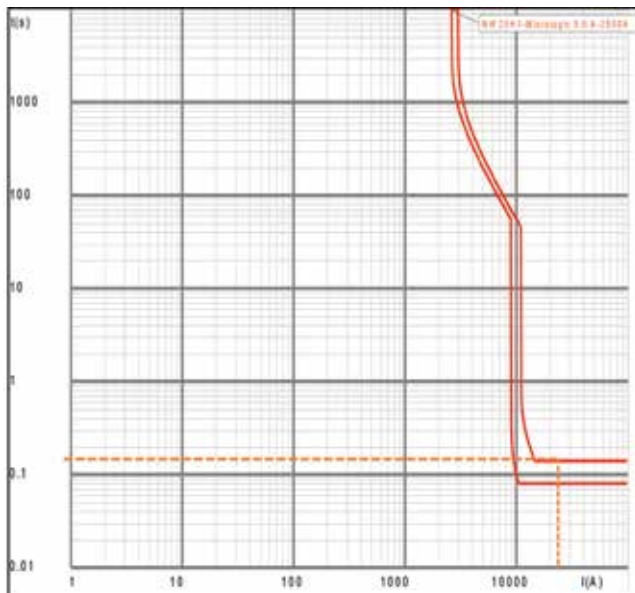


Figura 2 – Curva de tempo x corrente.

Desta forma, o tempo da proteção utilizado será de 150 ms. O tempo de eliminação considerado será o tempo de ajuste da unidade magnética de 100 ms e acrescido o 50 ms de abertura do disjuntor conforme obtido com o fabricante.

Condumax
FIOS E CABOS ELÉTRICOS

Um novo tempo para os SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

Aumente a durabilidade dos seus sistemas com cabos **SolarMax Flex**.

O primeiro cabo fotovoltaico certificado no Brasil e a escolha de grandes empresas.

Referência no mercado de usinas de energia solar e indústrias.



Qualidade e tecnologia que resistem a:

- Grandes oscilações de energia
- Radiação UV
- Alta e baixa temperatura
- Soluções ácidas e alcalinas



Baixe o nosso catálogo e solicite uma demonstração técnica

0800 701 3701
www.condumax.com.br

6) Cálculo da energia incidente

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

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

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

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

Valores das constantes obtidos na Tabela 5 (VCB – 600V).

k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7
0,753364	0,566	1,752636	0	0	-4.783E-09	0,000001962
k8	k9	k10	k11	k12	k13	
-0.000229	0,003141	1,092	0	-1.598	0,957	

Ei = 28,19 J/cm² ou 6,74 cal/cm²

7) Cálculo da distância de segurança para arco elétrico

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

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

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

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

Valores das constantes obtidos na Tabela 5 (VCB – 600V).

k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7
0,753364	0,566	1,752636	0	0	-4.783E-09	0,000001962
k8	k9	k10	k11	k12	k13	
-0.000229	0,003141	1,092	0	-1.598	0,957	

AFB_{<600} = 1796 mm

Para efeitos de comparação será estimado a energia incidente pelo método de 2002 e para a posição de eletrodo HCB versão 2018 nas mesmas condições.

VCB 2002 <i>unground</i>	VCB 2002 <i>ground</i>	VCB 2018	HCB 2018
8,66 cal/cm²	6,67 cal/cm²	6,74 cal/cm²	12,15 cal/cm²

No caso para a distância de segurança em relação ao arco elétrico:

VCB 2002 <i>unground</i>	VCB 2002 <i>ground</i>	VCB 2018	HCB 2018
2333 mm	1955 mm	1796 mm	1908 mm

A grande mudança nos valores de energia incidente se dá pela posição do eletrodo. Quando comparamos o modelo de 2002 e 2018 para condição VCB a diferença não é tão expressiva, já o mesmo não ocorre com a posição HCB.

Fazendo uma interpolação entre as metodologias de 2002 e 2018 pode-se dizer que os valores obtidos com a versão da IEEE 1584 - 2002 ficam entre as envoltórias da metodologia IEEE 1584 - 2018 para configuração VCB e HCB na faixa de corrente de 10 kA até 90 kA. Isto está demonstrado na Figura 3.

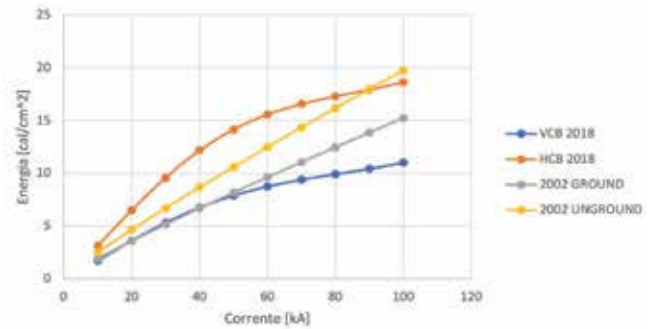


Figura 3 – Corrente de curto-circuito x energia incidente.

Caso a posição dos eletrodos permaneça na vertical o modelo de 2002 apresenta valores superiores ao de 2018.

A situação só se torna diferente se os eletrodos estejam na posição horizontal na qual os valores de 2018 sempre serão maiores.

A metodologia de cálculo para a energia incidente até 600 V em outras configurações segue a mesma sequência demonstrada acima, somente com a variação das constantes em função da posição dos eletrodos.

No próximo volume iremos abordar o cálculo da energia incidente até 15 kV.

*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.