

Avaliação de energia incidente

Por Luiz Carlos Catelani Junior*



Capítulo I

Introdução

Com o avanço das normas técnicas e de segurança, o estudo de energia incidente (“Arc Flash Analysis”) vem cada dia mais sendo necessário para as instalações elétricas.

Na edição de 2015 da NFPA 70E foi introduzido o programa de gerenciamento de risco elétrico contemplando choque elétrico e arco elétrico.

No caso de arco elétrico o programa prevê:

- Identificar os perigos
- Avaliar os riscos
- Implementar as medidas para controle do risco

As medidas de controle começam na concepção do projeto de uma instalação, durante reformas ou atualizações e principalmente em instalações existentes.

As medidas de controle podem ser tanto as administrativas, as de engenharia ou mesmo as adicionais.

No caso das medidas administrativas temos as definições das condições de trabalho, procedimentos, sinalização e treinamento.

As medidas de engenharia englobam descrição da instalação, filosofia de proteção, dispositivos de proteção sobrecorrente, características dos equipamentos e os estudos de coordenação, seletividade e energia incidente.

Por fim as medidas adicionais vão determinar quais requisitos deverão ser utilizados para garantir a segurança. Nessa classe se enquadra:

- Adequação das práticas de trabalho a instalação
- Determinação do limite de aproximação para arco elétrico (“Arc Flash Boundary”)
- Elencar os equipamentos de proteção individual necessários, EPI’s

A aplicação das medidas de controle deve ocorrer na seguinte ordem:

- Eliminação
- Substituição
- Medidas de Engenharia
- Conhecimento
- Medidas Administrativas
- EPI

Lembrando sempre que o EPI é a última medida a ser adotada sendo priorizadas as medidas de proteção coletiva que englobam as administrativas e as de engenharia.

Outro fato que traz notoriedade ao cálculo de energia incidente é que este deva estar documentado, fazer parte do compêndio de documentos da instalação elétrica, revisado no máximo a cada cinco anos ou em caso de alteração nas instalações elétricas.

Após isso, todos os equipamentos deverão ser sinalizados de maneira apropriada seguindo as normas pertinentes.

CONCEITOS BÁSICOS

Em qualquer instalação elétrica os riscos inerentes são:

- Choque elétrico
- Arco elétrico
- Fogo de origem elétrica (categoria C)

O conceito de avaliar e analisar o arco elétrico em instalações foi potencializado após a publicação da Norma Regulamentadora

– NR-10 em 2005.

Em um dos seus itens, mais especificamente:

10.2.9.2 As vestimentas de trabalho devem ser adequadas às atividades, devendo contemplar a condutibilidade, inflamabilidade e influências eletromagnéticas.

Essa diretriz, de forma indireta, estabeleceu que vestimentas com critérios de inflamabilidade dizem respeito a tecidos que possuam características apropriadas aos efeitos térmicos dos riscos elétricos. Dos efeitos térmicos se originam tanto o arco elétrico como o fogo de origem elétrica, mas com características bem distintas.

O arco elétrico é dividido em duas partes:

Arc Flash é a falha de isolamento entre dois pontos com potencial diferente que produz uma corrente que irá ionizar o ar e formar o plasma inicial para projeção de uma onda de calor com grande concentração de energia em curto período.

Arc Blast é o fenômeno que ocorre após a formação do arco elétrico vindo a expansão de uma onda de pressão que provoca deslocamento de ar, projeção de peças e metal fundido oriundo do ponto de ocorrência do arco.

A grande diferença do arco elétrico para o fogo de origem elétrica está na quantidade de energia liberada e das altas temperaturas atingidas em algumas dezenas de milissegundos.

Esse fluxo de calor tão intenso e em tão pouco tempo que leva a danos em equipamentos e pessoas de grande magnitude.

A formação de um arco elétrico em um equipamento ocorre quando há a ruptura do meio dielétrico formando uma falha de isolamento entre fase e terra. Logo em seguida essa falha de isolamento atinge fases adjacentes formando um defeito bifásico para terra. Por último a terceira fase é envolvida no processo e estabelece um arco trifásico dentro do equipamento.

Vamos exemplificar a formação de um arco elétrico real no interior de um painel de 13,80 kV – 630 A com nível de curto-

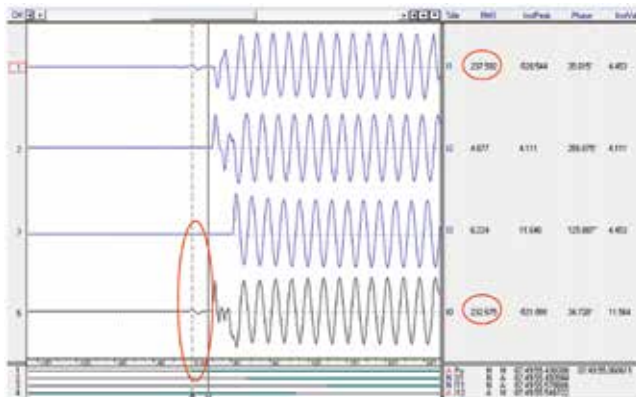


Figura 1 - Início do arco elétrico.

circuito de 16 kA registrado em uma oscilografia.

Na Figura 1 ocorre uma falha de isolamento entre fase e terra da ordem de 237 A.

Na Figura 2 observa que o defeito evolui para fase – fase e terra com corrente de falta superior a 2000 A.

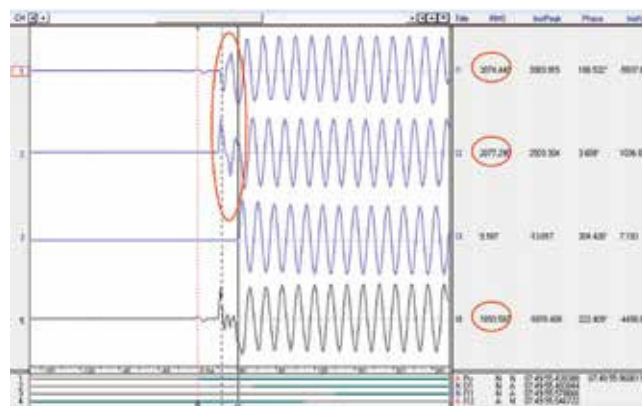


Figura 2 – Evolução do arco elétrico para duas fases.

No final do evento, Figura 3, as três fases do equipamento são envolvidas no defeito atingindo mais de 4000 A.

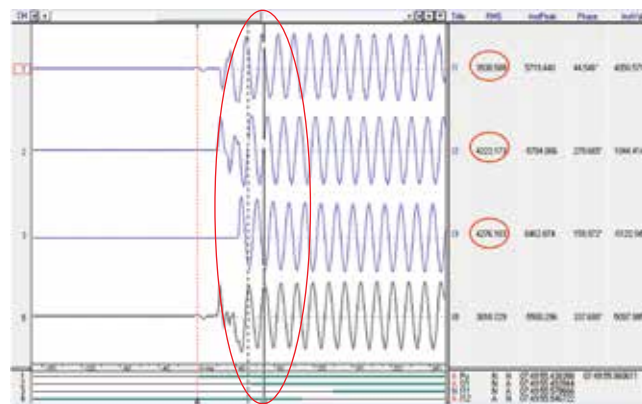


Figura 3 – Formação do arco elétrico com as três fases.

Toda essa sequência de formação do arco da ignição até a falha envolvendo as três fases se dá em menos de 62 ms ou menor do que 4 ciclos de rede.

A partir deste ponto, a Norma NR-10 traz a necessidade de inicialmente calcular a energia incidente em todos os pontos da instalação para poder determinar os procedimentos de trabalho, as medidas de controle e os respectivos EPI's (choque e arco elétrico).

O estudo de arco elétrico já ocorria desde a década de 80. Nessa época um dos precursores do assunto relacionava o fluxo de calor com relação ao efeito de queimaduras na pele humana.

Fluxo de calor é a quantidade de energia (Joules ou caloria dependendo do sistema de medida) por unidade de área (cm²). Habitualmente este fluxo de calor é chamado de energia incidente (E_i).

Em 1982, Ralph Lee publicou seu precioso artigo “The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns”. O modelo criado por ele é utilizado até hoje com ótima aproximação em sistemas de baixa tensão.

O estudo era muito mais do que o cálculo de um valor de energia incidente, mas sua correlação com o tipo de queimaduras que poderia ocorrer no corpo humano.

Seu trabalho teve como base as curvas de Curtis P. Artz and John A. Moncrief sobre tratamento de queimaduras e sua relação com temperatura e tempo de exposição da pele de acordo com a Figura 4.

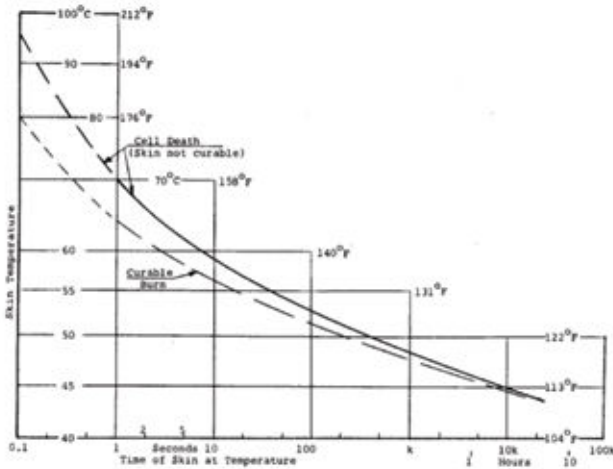


Figura 4 - Outro perigo do arco elétrico: queimaduras na pele.
Fonte: Ralph Lee.

A Figura 4 mostra as curvas usadas que classificam a queimadura na pele em dois tipos:

- Curáveis
- Não curáveis

O gráfico relaciona tempo em que a pele humana ficaria a uma determinada temperatura e em função destas duas condições se chegava aos valores recomendados de energia incidente por cálculo da transferência de calor.

Como potência é igual a energia dividida pelo tempo, Ralph Lee criou uma tabela com recomendações de potência de arco elétrico máxima para atender os critérios de segurança dos mantenedores das instalações. A condição de contorno é que a energia incidente não fosse superior a 1,2 cal/cm² ou 5,00 J/ cm².

Seu modelo assumia que em um arco elétrico, a corrente de arco era igual a metade da corrente de curto-circuito.

Um circuito elétrico equivalente ao modelo proposto acima pode ser representado de acordo com a Figura 5.

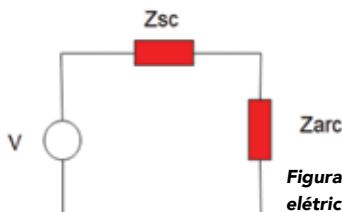


Figura 5 – Representação por circuito elétrico de um arco.

V – Tensão da fonte

Zsc – Impedância de curto-circuito

Zarc – Impedância do arco elétrico

No modelo teórico, Ralph Lee assumiu que a impedância de curto-circuito seria igual a impedância do arco elétrico, em outras palavras, que a potência do arco elétrico fosse a metade da potência de curto-circuito. Essa condição é definida como Teorema da Máxima Energia Incidente uma vez que remete ao teorema de circuitos elétricos, na qual, quando a impedância da fonte é igual a impedância da carga a transferência de potência é máxima.

Condições de contorno:

Em caso de um curto-circuito franco:

$$Z_{arc} = 0$$

$$I_{cc} = \frac{V}{Z_{sc}}$$

Já para o caso de um arco elétrico:

$$I_{cc_arc} = \frac{V}{Z_{sc} + Z_{arc}}$$

Assumindo:

$$Z_{arc} = Z_{sc}$$

$$I_{cc_arc} = \frac{V}{Z_{sc} + Z_{sc}}$$

$$I_{cc_arc} = \frac{V}{2 \cdot Z_{sc}} = \frac{I_{cc}}{2}$$

Com essa suposição da máxima energia incidente as equações de Ralph Lee mostrada no simpósio do IEEE de 1982 foram:

$$E_i = \frac{5116 \cdot I_{bf} \cdot V \cdot t}{D^2}$$

E_i - Energia máxima Incidente [cal/cm²]

t - Tempo de duração [s]

I_{bf} - Corrente de Curto – Circuito [kA] sólida (Bolted)

D - Distância do operador ao arco elétrico [cm]

V - Tensão de Alimentação [kV]

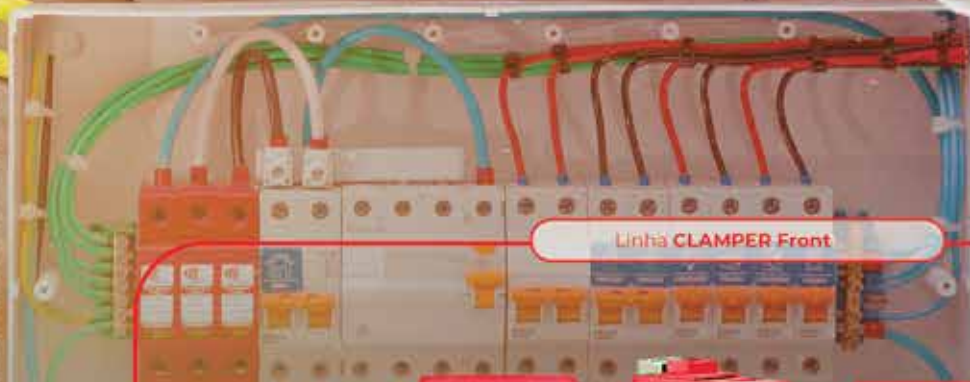
Outra definição também foi dada como limite de contorno para o arco elétrico, no documento referenciado com “Arc Flash Boundary”.

O “Arc Flash Boundary” corresponde a qual distância a energia



PROTEÇÃO EM QUADROS ELÉTRICOS

CLAMPER
LÍDER E ESPECIALISTA
EM DISPOSITIVOS
DE PROTEÇÃO CONTRA
RAIOS E SURTOS
ELÉTRICOS



Linha CLAMPER Front



incidente calculada atinja um valor de 1,2 cal/cm² ou 5,00 J/cm².

Esse valor é o limite de suportabilidade da pele para queimaduras de segundo grau. A equação para obtenção da distância é mostrada abaixo:

$$D_c = \sqrt{2462 \cdot MVA_{bf} \cdot t}$$

MVA_{bf} - Potência de curto - circuito franco [MVA]

t - Tempo de duração arco [s]

D_c - Distância de segurança para arco elétrico [cm]

A potência de curto-circuito franca pode ser calculada com a corrente de curto-circuito.

$$MVA_{bf} = \sqrt{3} V \cdot I_{cc}$$

Sendo:

V - tensão entre fases

I_{bf} - corrente de curto-circuito franca

O modelo conhecido como o da máxima energia incidente é desenvolvido para ambientes abertos, não para locais delimitados ou compartimentados. Isso pode ser notado pelo fato de a energia incidente ser inversamente proporcional ao quadrado da distância.

Seu modelo se mostra bem adaptado para tensão de até 1000 V, acima deste patamar os valores ficam muito distorcidos levando a uma majoração da energia calculada o que pode ser observado na Figura 6 em função da diferença entre as curvas.

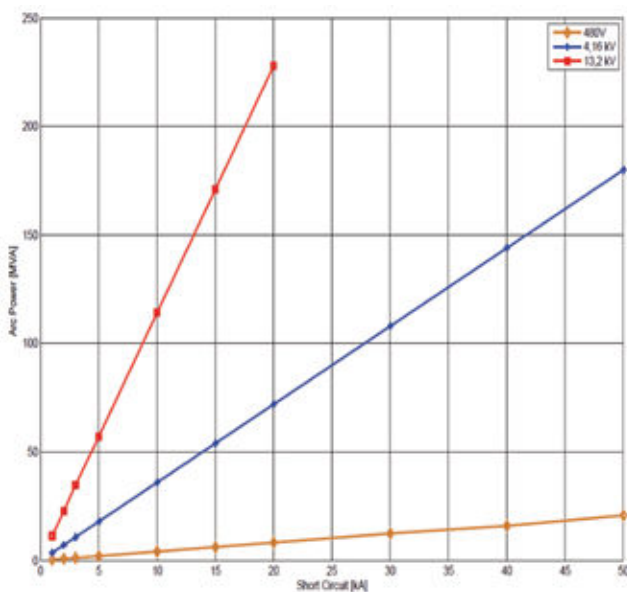


Figura 6 - Fonte: Própria: Corrente de curto-circuito x potência de arco.

Na NFPA 70E, norma de segurança para serviços em eletricidade, as recomendações e cálculos de Ralph Lee já apareciam

desde a edição de 1995 e sendo a única metodologia existente na época para a determinação da energia incidente e a distância de segurança para o arco elétrico.

Nesta edição já se tinha noção das distâncias de segurança que pode ser representada conforme Figura 7. Elas eram divididas em duas categorias:

- Distância de segurança para choque elétrico (definida previamente pelo nível de tensão)
- Distância de segurança para o arco elétrico (calculado caso a caso pelas equações de Ralph Lee)

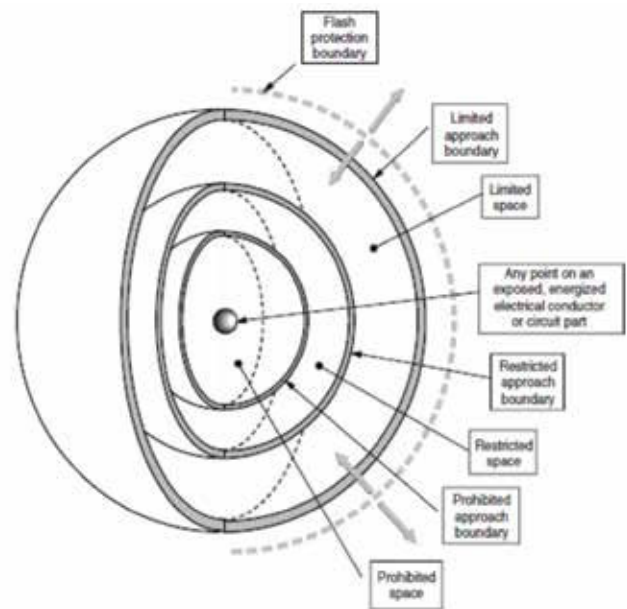


Figura 7 - Fonte: NFPA 70E: 1995 Editions.

A última esfera (linha pontilhada na Figura 7) corresponde ao limite de aproximação para arco elétrico e é determinado conforme o cálculo exposto acima.

Vale lembrar que estas distâncias que constam na NFPA 70E não são as mesmas dispostas no Anexo II da NR-10 que só é válida para o choque elétrico.

Desta edição da NFPA em diante houve várias atualizações na norma e em sua última revisão o cálculo de energia incidente pode ser feito com outras metodologias.

Na edição atual (2021) da Norma NFPA 70E, as metodologias que constam em seu anexo D são:

- Ralph Lee - Método da Máxima Energia Incidente (Teórico)
- Doughty & Neal - Aproximação para Baixa Tensão do método (Empírico)
- IEEE © 1584 @ 2018 - Modelos baseado em ensaios normalizados (Estatístico)
- Doan © - Modelo arco elétrico em Corrente Contínua (Teórico)

Wirex

Cable Solution

www.wirex.com.br

vendas.cabos@wirex.com.br

(12) 3972-6000 / (12) 99214-9959 (Whatsapp)

Consulte-nos.



O modelo teórico de Ralph Lee pode ser utilizado em qualquer nível de tensão ficando claro que para tensões acima de 1 kV seu valor é muito conservativo. Sendo que pela linha normativa da NFPA 70E é a única opção possível para tensões acima de 15 kV.

Outra metodologia que acompanha a mesma norma é a de Doughty & Neal. Destinado ao cálculo de energia incidente máxima para tensões inferiores a 600 V. Este modelo não representa necessariamente os maiores valores calculados e só devem ser usados dentre os limites estabelecidos:

- Tensões entre fases de até 600 V
- Correntes de curto-circuito trifásico de 16 kA a 50 kA
- Distância mínima de 18" ou 45 cm
- Equações distintas para ambientes abertos ("open") ou compartimentados ("closed")

A metodologia se destina mais a instalações industriais em baixa tensão com um valor de curto-circuito moderado (abaixo de 50 kA).

Para arcos na condição aberto ("open air"):

$$E_i = \frac{5271 \cdot t \cdot [0,0016 \cdot I_{bf}^2 - 0,0076 \cdot I_{bf} + 0,8938]}{D^{1,9593}}$$

E_i - Energia máxima Incidente [cal/cm²]

D - Distância de trabalho do ponto do arco elétrico [in]

t - Tempo de duração [s]

I_{bf} - Corrente de Curto - Circuito [kA] sólida (Bolted válido de 16 kA - 50 kA)

Para arcos na condição confinado ("cubic box"):

$$E_i = \frac{1038,7 \cdot t \cdot [0,0093 \cdot I_{bf}^2 - 0,3453 \cdot I_{bf} + 5,9675]}{D^{1,4738}}$$

E_i - Energia máxima Incidente [cal/cm²]

D - Distância de trabalho do ponto do arco elétrico [in]

t - Tempo de duração [s]

I_{bf} - Corrente de Curto - Circuito [kA] sólida (Bolted - válido de 16 kA - 50 kA)

Toda a equação de cálculo de energia incidente é escrita na sua forma genérica como:

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

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)

Na metodologia de Doughty & Neal pode se observar que a corrente de arco é calculada como uma aproximação de segundo grau em relação a corrente de curto-circuito franco.

Tanto para ambiente aberto como para ambiente enclausurado a aproximação da corrente de arco é dada por:

• **Condição aberto:**

$$E_i = \frac{5271 \cdot t \cdot [0,0016 \cdot I_{bf}^2 - 0,0076 \cdot I_{bf} + 0,8938]}{D^{1,9593}}$$

Aproximação da corrente de arco:

$$I_{arc} = [0,0016 \cdot I_{bf}^2 - 0,0076 \cdot I_{bf} + 0,8938]$$

• **Condição "cubic box":**

$$E_i = \frac{1038,7 \cdot t \cdot [0,0093 \cdot I_{bf}^2 - 0,3453 \cdot I_{bf} + 5,9675]}{D^{1,4738}}$$

$$I_{arc} = [0,0093 \cdot I_{bf}^2 - 0,3453 \cdot I_{bf} + 5,9675]$$

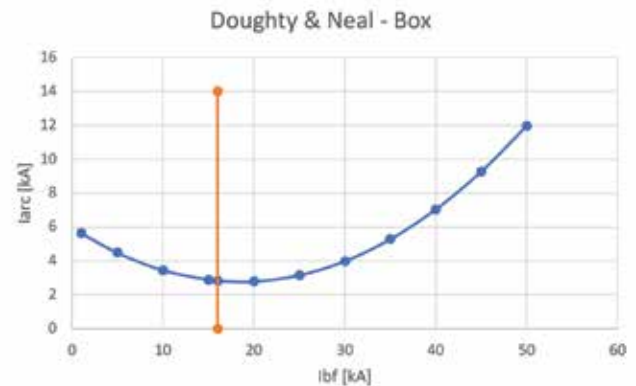


Figura 8 - Fonte: Próprio autor

Na Figura 8, o gráfico da corrente de curto [I_{bf}] x corrente arco [I_{arc}] é fácil de perceber por que a aproximação só é válida a partir dos 16kA, para valores inferiores a corrente de arco aumenta com a redução da corrente de curto, o que fisicamente não é visto nos ensaios.

Bom abordamos duas metodologias que a NFPA 70E prevê, a mais antiga e abrangente que corresponde ao Teorema da Máxima Energia Incidente de Ralph Lee e a metodologia exclusiva para baixa tensão (até 600V) de Doughty & Neal.

Como forma de ilustrar esses dois métodos vamos fazer um exemplo de um painel de baixa tensão com as seguintes características:

$V_n = 440$ V

$I_{cc} = 25$ kA

$t = 0,150$ s (tempo de proteção 100 ms + 50 ms abertura do disjuntor)

$D = 455$ mm ou 45,5 cm ou 17,91 in

Pela equação de Ralph Lee:

$$E_i = \frac{5116 \cdot I_{bf} \cdot V \cdot t}{D^2}$$

Corrente de arco será a metade da corrente de curto-circuito; 12,5 kA.
 $E_i = 4,08 \text{ cal/cm}^2$ (lembrando que esse valor sempre é para arco ao ar livre)

Limite de aproximação para o arco elétrico:

$$D_c = \sqrt{2462 \cdot MV A_{bf} \cdot t}$$

DC = 83,88 cm

Através do modelo de Doughty & Neal - Open

$$E_i = \frac{5271 \cdot t \cdot [0,0016 \cdot I_{bf}^2 - 0,0076 \cdot I_{bf} + 0,8938]}{D^{1,9593}}$$

Corrente de arco interpolada é 1,70 kA.
 $E_i = 4,72 \text{ cal/cm}^2$

Através do modelo de Doughty & Neal - Box

$$E_i = \frac{1038,7 \cdot t \cdot [0,0093 \cdot I_{bf}^2 - 0,3453 \cdot I_{bf} + 5,9675]}{D^{1,4738}}$$

Corrente de arco interpolada é 3,15 kA.
 $E_i = 6,98 \text{ cal/cm}^2$

Esses valores só são válidos se a proteção conseguir atuar com o desligamento no tempo determinado de 150 ms.

Nos próximos fascículos iremos tratar da metodologia para cálculo de energia incidente mais utilizada na baixa e média tensão até 15 kV: IEEE 1584 edição de 2018.

**Luiz Carlos Catelani Junior é engenheiro eletricitista 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.*

VARIXX

Sistema de Termografia Online

O Zyggot Temperatura é um sistema inteligente de monitoramento sem contato, pensado para trazer diagnósticos preditivos continuamente, além de permitir a seleção de trips e alarmes. Foi desenvolvido para o uso em painéis de baixa e média tensão e outras conexões elétricas críticas. Dispensa a termografia convencional e a abertura do painel. Relé touch screen com comunicação Ethernet e Modbus RTU. Permite até 125 sensores em uma única rede.



Ethernet TCP-IP



< Saiba mais