

Software para especificação da vestimenta de proteção contra arcos elétrico

Marco Antonio Ferreira Finocchio (UTFPR – Cornélio Procópio) mafinocchio@utfpr.edu.br

Paulo Roberto dos Santos (COMTRAFO – Cornélio Procópio) santospaulor21@gmail.com

Luiz Marcelo Chiesse da Silva (UTFPR – Cornélio Procópio) chiesse@utfpr.edu.br

Jeferson Gonçalves Ferreira (CECA – Cornélio Procópio) jefersongf_07@hotmail.com

Resumo:

O objetivo deste trabalho é avaliar e propor o uso de métodos que permitam a correta especificação de roupas de proteção contra arco voltaico. Como a energia incidente de um arco elétrico é extremamente prejudicial à segurança das pessoas que trabalham diretamente com uma instalação elétrica e equipamentos, ele deve ser medido de acordo com as regulamentações atuais e os riscos devem ser controlados e neutralizados, para que a integridade física das pessoas e as instalações são preservadas. Portanto, propõe a aplicação de uma ferramenta gráfica para auxiliar na especificação de roupas de proteção contra a energia incidente liberada.

Palavras chave: Arco Elétrico, Energia Incidente, Vestimenta de Proteção.

Software for the specification of protective clothing against electric arcs

Abstract:

The objective of this work is to evaluate and propose the use of methods that allow the correct specification of protective clothing against arc. Since the incident energy from an electric arc is extremely detrimental to the safety of persons working directly with an electrical installation and equipment, it must be measured in accordance with current regulations and the risks must be controlled and neutralized so that the physical integrity of the people and facilities are preserved. Therefore, it proposes the application of a graphical tool to assist in the specification of protective clothing against the incident energy released.

Key-words: Electric Arc, Incident Energy, Protective Clothing.

1. Introdução

Em sistemas elétricos potência (SEP), existe um fenômeno indesejável decorrente de curtos-circuitos ou falhas elétricas, chamado de arco elétrico (AE). O está associado a falhas no sistema, em geral, mau funcionamento de chaves seccionadoras, má operação de equipamentos elétricos energizados, quedas de ferramentas em painéis, entre outros. O arco libera partículas de metais ionizadas, que conduzem correntes, gerando um deslocamento de ar e uma região de alta pressão muito prejudicial aos materiais do SEP e, para o ser humano.

O trabalhador do setor elétrico está exposto aos riscos, por realizar atividades em pontos energizados sujeitos a ocorrência do AE. No caso de sinistro com arco, a energia liberada poderá causar a queima da roupa e graves queimaduras na pele, ou até a morte. Quanto à

segurança no trabalho e às melhores condições de uma instalação elétrica segura, devem-se conhecer os efeitos e causas do AE, para que o eletricitista possa utilizar uma vestimenta que minimize ou elimine os efeitos do arco.

No Brasil, não há um método claro de cálculo da energia incidente (EI) do AE, para com os dados do SEP em mãos, possa se fazer um estudo, que demarca o alcance de segurança preciso para os efeitos destrutivos do AE, e sua correta seleção da vestimenta de proteção (VP), provendo segurança às pessoas que estiverem envolvidas no raio de alcance do arco.

Este cenário, pode contribuir com os casos de sinistros envolvendo arcos elétricos (SANTOS, AMORIM, 2016). Esta não particularidade da norma pode levar ao mau dimensionamento da VP gerando fatalidades.

Este trabalho aborda o estudo, implementação de normas e métodos para verificação da EI, a distância de segurança para a especificação da roupa adequada.

2. Fundamentação arco elétrico

A definição de arco elétrico está associada a fato da passagem de uma grande quantidade de corrente elétrica por um meio anteriormente isolante, como exemplo o ar (LEE, 1982). Visto que o ar tem baixas propriedades condutoras de eletricidade, o fluxo da corrente do arco ocorre entre dois eletrodos através de gases superaquecidos e partículas do ar ionizado. A combinação de vapores ionizados e gases a altas temperaturas resultam em gases de plasma (CADICK, CAPELLI, NEITZEL, 2006).

Na Figura 1 apresenta a nuvens de plasma no ponto de incidência do arco voltaico e sua evolução no tempo (HOAGLAND, 2013).



Figura 1 - Surgimento de nuvens de plasma na superfície do AE.

Para Kumpulainen, Dahl e Ma (2008), o surgimento do arco ocorre, por perdas de conexões do SEP, erro em dimensionamento de acionadores de dispositivos elétricos com acionamentos mecânicos, mau funcionamento de equipamentos, perda de isolamento elétrica e animais em contato com circuitos energizados.

O tempo de duração da ocorrência do AE é tipicamente de 1s ou menos, nesse curto intervalo de tempo são produzidos intensos níveis de energia (NEAL, BINGHAM, DOUGHT, 1997). No ponto de incidência do arco a temperatura é extrema, próxima de 20.000°C, o que representa uma temperatura de até quatro vezes maior que a superfície solar (LEE, 1982).

Quando ocorre, a alta temperatura e ondas de pressão no ponto de incidência do arco produzem expansões de gases e plasma, projetando materiais derretidos para fora da nuvem de gás com um alcance de até 3m de distância do ponto de incidência, podendo causar sérios danos aos profissionais que atuam diretamente com o sistema energizado (CADICK, CAPELLI, NEITZEL, 2006).

A característica de alta energia liberada em um curto intervalo de tempo torna o arco voltaico um dos principais riscos envolvendo eletricidade, assim como o risco de choque elétrico

(LOBO, CABRAL, 2016). Os danos que o arco pode causar são drásticos, sejam eles materiais ocorridos na destruição total ou parcial de um painel elétrico, ou seja, gerando danos ao trabalhador que, exposto a energia desprendida pelo arco, pode sofrer graves queimaduras e até mesmo óbito (IEEE, 2002).

A Figura 2 exemplifica etapas de transformação da energia elétrica durante o arco elétrico (BOWEN, WACTOR, MILLER et al., 2004).

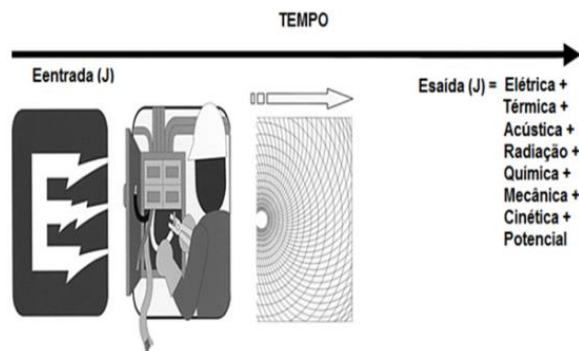


Figura 2 - Transformações da energia elétrica durante o AE.

Ocorrendo o AE, a corrente circula pelo ar, o primeiro risco eminente ao trabalhador é o choque elétrico. Com o tempo de até 1s, o efeito térmico na superfície do arco pode gerar sérios danos à pele humana, como queimaduras de segundo ou terceiro grau. Por conta da grande energia em torno do arco, a combinação dos vapores de ar ionizado e os gases produz o gás de plasma. Com a expansão dos gases, o efeito explosivo ocorre, a projeção de materiais derretidos em direção do trabalhador, adicionadas as altas intensidades luminosas e sonoras (BOWEN, et al., 2004; JONES, et. al., 1997). A Figura 3 corresponde aos riscos que a energia desprendida pelo arco elétrico representa aos seres humanos (BOWEN, et al., 2004; KUMPULAINEN, DAHL, 2010; KUMPULAINEN, DAHL, MA, 2008).

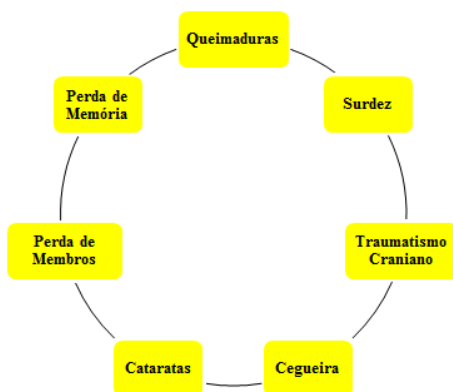


Figura 3 - Riscos para os seres humanos quando expostos ao AE.

As pesquisas de Ralph Lee, nos anos 80, contribuíram para o entendimento dos níveis de energia incidente do AE. Possibilitando classificar os riscos dos efeitos do arco para o trabalhador, e o desenvolvimento de vestimentas de proteção contra arcos elétricos (NEAL, BINGHAM, DOUGHT, 1997).

As roupas de proteção são feitas de tecidos especiais, que objetivam neutralizar parcial ou totalmente os efeitos causados pelo arco, como queimaduras de segundo e terceiro grau. A American Society for Testing and Materials (ASTM), definiu um indicador chamado Arc Thermal Performance Value (ATPV) para medir o desempenho dos tecidos contra AE. Este

indicador é o valor máximo da EI sobre o tecido que não resulta em energia no lado protegido (do corpo) superior ao valor que produz queimadura de segundo grau, ou que não ultrapasse $5\text{J}/\text{cm}^2$ ($1,2\text{cal}/\text{cm}^2$) e não entre em combustão (CADICK, CAPELLI, NEITZEL, 2006; HOAGLAND, 2013).

Na Figura 4(a), tem-se a representação da EI do arco sobre o traje de proteção e como essa energia é reduzida no lado em contato com a pele do trabalhador (SOUZA, CARRARA, FINOCCHIO, 2009). A Figura 4(b), mostra um trabalhador utilizando a roupa de proteção contra os agentes térmicos gerados pelo AE.

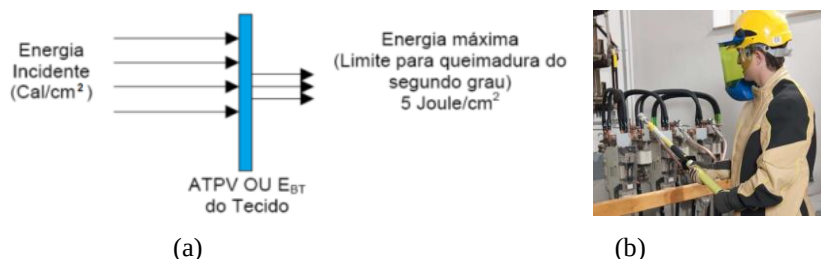


Figura 4 - (a) Representação da EI em uma VP. (b) Profissional com EPI's para proteção contra AE.

3. Normas versus arco elétrico

As atividades envolvendo eletricidade são cada vez mais regulamentadas. Existem normas no Brasil e exterior que abordam os riscos e proteção contra o AE com propriedade. Entretanto, quando se trata de especificar medidas de prevenção contra os efeitos térmicos do arco, levando em conta as características do SEP, as normas Americanas são as melhores (LOBO, CABRAL, 2016).

A legislação brasileira para segurança e saúde dos trabalhadores em eletricidade não possui métodos próprios para cálculo dos riscos do AE. A Norma Regulamentadora NR 6 Equipamento de Proteção Individual (EPI) de 2001 e NR-10 Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade de 2004 não especificam VP contra os efeitos causados pelo AE baseando-se nos valores de energia incidente calculados, apenas sugerem o uso de roupas de proteção contra efeitos térmicos e que devem ser adequadas às atividades, segundo os níveis de condutibilidade, influência magnética e inflamabilidade (MTE, 2001; MTE, 2004). Isto é um problema, porque não estabelece critérios que levam em conta os diferentes tipos de sistemas e instalações elétricas, podendo ocasionar a escolha errada da VP, seja ela com proteção mínima, ao ponto de não minimizar os efeitos do arco, ou com proteção excessiva ao ponto de dificultar as atividades laborais do profissional (LOBO, CABRAL, 2016).

Nos Estados Unidos, as normas mais relevantes que abordam a proteção contra AE são:

- IEEE Std 1584-2002, (IEEE, 2002)
- NFPA 70E, (NFPA, 2004)]

A norma do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) - IEEE 1584 determina a distância de segurança para o risco do AE e a consequente EI na realização de atividades próximas ao sistema energizado. A metodologia da norma baseia-se na verificação da EI por meio de equações obtidas por análises estatísticas empíricas (CADICK, CAPELLI, NEITZEL, 2006).

A norma da *National Fire Protection Association* (NFPA) NFPA 70E, também se fundamenta no cálculo da EI e na verificação da distância segura de aproximação para especificação dos EPI's a serem utilizados por eletricitistas. No entanto, a distância de segurança é à distância da

fonte de arco na qual a quantidade de energia de $1,2\text{cal/cm}^2$ (5J/cm^2) atua sobre um eletricitista sem EPI, provocando-lhe queimaduras de segundo grau (CADICK, CAPELLI, NEITZEL, 2006; LOBO, CABRAL, 2016; NEAL, BINGHAM, DOUGHT, 1997). Esta norma especifica os EPI's para trabalhos executados a uma distância que apresente riscos de queimaduras em função do AE, baseado na EI. A determinação da EI é necessária, para trabalho executados a uma distância segura de aproximação.

A metodologia de cálculo da NFPA 70E estima a EI por três métodos:

- Método Teórico
- Método Simplificado
- Método Empírico

O Método Teórico estima a EI de um valor teórico máximo, segundo estudos de Ralph Lee. Aplicado para arcos elétricos em local aberto e tensão superior a 600V, segundo Equação (1):

$$E = \frac{793 I_{cc} V t_A}{D^2} \quad (1)$$

E : Energia incidente, em $[\text{cal/cm}^2]$

I_{cc} : Corrente de curto-circuito $[\text{kA}]$

V : Tensão do sistema $[\text{kV}]$

t_A : Tempo de duração do arco $[\text{s}]$

D : Distância de trabalho do ponto de arco elétrico $[\text{in}]$.

Por ser um modelo teórico, a EI encontrada pode assumir valores elevados.

Para arcos ocorridos em local aberto, à estimativa da EI máxima é dada pela Equação (2):

$$E_{MA} = 5271 D_A^{-1,9593} t_A [0,0016 I_{cc}^2 - 0,0076 I_{cc} + 0,8938] \quad (2)$$

E_{MA} : Energia incidente máxima (local aberto) $[\text{cal/cm}^2]$;

D_A : Distância de trabalho do ponto de AE $[\text{in}]$.

I_{cc} : Corrente de curto-circuito, em $[\text{kA}]$ (entre 16 a 50kA).

Em ambientes fechados, a EI é calculada pela Equação (3).

$$E_{MB} = 1038,7 D_B^{-1,4738} t_A [0,0093 I_{cc}^2 - 0,3453 I_{cc} + 5,9675] \quad (3)$$

E_{MB} : Energia incidente máxima (ambiente fechado) $[\text{cal/cm}^2]$;

D_B : Distância de trabalho do ponto de AE $[\text{in}]$.

O Método Simplificado consiste na especificação do EPI para proteção contra AE segundo o nível de tensão, o tempo da proteção do circuito para eliminar o arco e a I_{cc} . As categorias de risco neste método são 2 e 4, não considerando o valor da EI.

Na Tabela 1 são apresentados os valores da EI para instalações de baixa tensão, adaptada da tabela D.9.1 da NFPA 70E. Na NFPA 70E tem outro grupo de tabelas para especificação do EPI. Nestas tabelas, a escolha é feita pelo tipo de equipamento, atividade que será executada, a I_{cc} e o tempo de eliminação do arco (CADICK, CAPELLI, NEITZEL, 2006).

Tensão [V]	Tempo para eliminação do Arco [s]	$I_{máx\text{cc } 3\phi}$ para uso de EPI Cat. 2 (8 cal/cm ²)	$I_{máx\text{cc } 3\phi}$ para uso de EPI Cat. 4 (40 cal/cm ²)
690	0,05	39 kA	180 kA
	0,10	20 kA	93 kA
	0,20	10 kA	48 kA
	0,33	Não Recomendado	29 kA
	0,50	Não Recomendado	20 kA
600	0,05	48 kA	200 kA
	0,10	24 kA	122 kA
	0,20	12 kA	60 kA
	0,33	Não Recomendado	36 kA
	0,50	Não Recomendado	24 kA
480	0,05	200 kA	200 kA
	0,10	122 kA	183 kA
	0,20	60 kA	86 kA
	0,33	36 kA	50 kA
	0,50	24 kA	32 kA
400	0,05	87 kA	200 kA
	0,10	39 kA	200 kA
	0,20	18 kA	113 kA
	0,33	10 kA	64 kA
	0,50	Não Recomendado	39 kA
208	0,05	200 kA	Não Aplicável
	0,10	104 kA	200 kA

Tabela 1 - Limites máximos da I_{cc} para vários níveis de tensão e tempo de abertura de disjuntores, para uso de EPI's nas categorias de risco 2 e 4 e AE em local fechado.

O Método Empírico (IEEE 1854) lista as fases para especificação dos EPI's Tabela 2.

Etapas	NFPA 70E
1	Informações necessárias: I_{cc} , tempo de interrupção do arco e descrição da tarefa a ser executada.
2	Consultar a tabela 130.7.(C) (9) para definir a categoria do risco.
3	Consulta-se a tabela 130.7.(C) (10) que define as VP e os EPI's de acordo com a categoria de risco.
4	Consulta-se a tabela 130.7.(C) (11) que define as características das VP de acordo com a categoria de risco.

Tabela 2- Etapas para determinação da VP (NFPA-70E).

A norma IEEE 1584 determina a distância segura do risco de AE e energia incidente que o trabalhador esta exposto durante as atividades efetuadas em um equipamento elétrico ou nas proximidades do sistema energizado (AMMERMAN, SEN, NELSON, 2009). Os modelos matemáticos da norma são baseados em análises estatísticas e ajustes de curvas baseados em testes empíricos de laboratório. Na aplicação desta norma, as instalações devem atender as seguintes especificações:

- Sistema trifásico com tensão de 208V a 15kV
- Frequência 50Hz e 60Hz
- I_{cc} de 700A a 106kA
- Distância dos condutores entre 13mm a 152mm

Os passos do cálculo da EI e distância de segurança constam da Tabela 3.

Etapas	IEEE 1584
1	Coleta de dados da instalação e do sistema.
2	Determinar os modos de operação do sistema.
3	Determinar a corrente de curto-circuito.
4	Determinar a corrente do AE.
5	Encontrar as características dos dispositivos de proteção e o tempo de duração do arco.
6	Determinar as tensões dos sistemas e a classe dos equipamentos.
7	Determinar a distância de trabalho.
8	Calcular a energia incidente em todos os equipamentos.
9	Determinar a distância segura de aproximação contra o AE.

Tabela 3 - Etapas para o cálculo da EI e da distância segura de aproximação pela IEEE 1584.

No primeiro passo são coletadas informações do SEP dos diagramas unifilares. Considerando-se os alimentadores alternativos e circuitos de baixa tensão.

Dos diagramas unifilares, são extraídos os dados para o cálculo de curto-circuito. As fontes de energia como a concessionária, geradores auxiliares e motores com potência maiores que 37kW devem ser levadas em consideração, por, contribuir expressivamente com os curto-circuitos. Os diagramas devem apresentar os equipamentos de transformação, circuitos de distribuição, linhas de transmissão, aterramento elétrico, reatores limitadores de corrente, correção ou estabilização de tensão, capacitores, disjuntores, chaves seccionadoras e Centro de Comando de Motores (CCM's). Quanto mais detalhada for a instalação, melhor a estimativa da EI e distância de aproximação.

No segundo passo, analisam-se os tipos de funcionamento do SEP. Para sistemas radiais IEEE 1584, aponta ter apenas um tipo de operação normal.

Sistemas complexos como os CCM's possuem modos distintos de funcionamento. Podendo operar com um ou dois alimentadores ou geradores com possibilidade de utilização de sistemas de paralelismo com a concessionária. Considera-se essencial a determinação da corrente de curto-circuito (I_{cc}) para o modo de operação com máxima e mínima corrente de curto circuito possível (IEEE, 2002).

Caso os dados estejam nos limites de aceitação, calcula-se I_{cc} no ponto desejado da EI. Com o valor de I_{cc} , no quarto passo determina-se a corrente do arco elétrico (I_a) para sistemas de baixa tensão (BT) (até 1 kV) por meio da Equação (4):

$$\log I_a = K + 0,662 \log I_{cc} + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588V(\log I_{cc}) - 0,00304G(\log I_{cc}) \quad (4)$$

I_a : Corrente do arco elétrico, em [kA]

K : $\begin{cases} -0,153 & \text{para arco em local aberto} \\ -0,097 & \text{para arco em local fechado} \end{cases}$

I_{cc} : corrente de curto-circuito para uma falta trifásica [kA]

V : Tensão do sistema, em [kV]

G : Distância entre condutores [mm].

A distância entre condutores (G) é fornecida na Tabela 4.

Tensão do Sistema (kV)	Tipo de Equipamento	Distância Típica entre Condutores (mm)	Distância x Fator
0,208 - 1,0	Ambiente aberto	10-40	2,000
	Painel de distribuição	32	1,473
	CCM e Painel	25	1,641
	Cabos	13	2,000
>1 - 5	Ambiente aberto	102	2,000

	Painel de distribuição	13-102	0,973
	Cabos	13	2,000
>5 - 15	Ambiente aberto	13-153	2,000
	Painel de distribuição	153	0,973
	Cabos	13	2,000

Tabela 4 - Fatores para equipamentos e classes de tensão.

Para tensões de 1kV à 15kV, não há distinção entre as configurações em local aberto ou fechado, devendo aplicar a Equação (5):

$$\log I_a = 0,00402 + 0,983 \log I_{cc} \quad (5)$$

Para conversão do logaritmo, utiliza-se a Equação (6).

$$I_a = 10^{\log I_a} \quad (6)$$

Com a função de determinar um segundo tempo de duração do arco, a norma determina o cálculo de uma segunda corrente do AE, sendo 85% da I_a .

No quinto passo, define o tipo de dispositivo de proteção contra o AE, para identificar o tempo de interrupção deste equipamento. Este valor é o tempo de duração do arco.

Alguns dispositivos têm valores de tempo de interrupção conforme Tabela 5. Caso outros dispositivos não se enquadrem a tabela, deve-se obter os tempos do fabricante.

Tensão e Tipo de Disjuntor	τ a em 60 Hz (ciclos)	τ (s)
BT (<1kV), caixa moldada e relé de proteção integrado	1,5	0,025
BT (<1kV), caixa moldada e relé de proteção integrado ou operado por relé externo	3,0	0,050
Média tensão (1 a 35kV)	5,0	0,080
Alta tensão (> 35kV)	8,0	0,130

Tabela 5 - Tempo de abertura (τ) para disjuntores de potência.

Para determinar as tensões dos sistemas e a classe dos equipamentos, no sexto passo, deve-se documentar, para cada barramento, a tensão e o tipo de equipamento, conforme Tabela 6.

Tensão e Tipo de Disjuntor	Distância típica entre os barramentos (mm)
Painel de 15 kV	152
Painel de 5 kV	104
Painel de baixa tensão	32
CCM's e quadros elétricos de BT	25
Cabos	13
Outros	Não necessário

Tabela 6 - Distância entre barramentos.

Em sétimo, determina-se o equipamento e distância de trabalho. A distância típica de trabalho para a próxima etapa do cálculo está demonstrada na Tabela 7.

Tipo de equipamento	Distância típica de trabalho (mm)
Painel de 15 kV	910
Painel de 5 kV	910
Painel de baixa tensão	610
CCM's e quadros elétricos de BT	455
Cabos	455
Outros	A ser determinada no campo

Tabela 7 - Equipamento e distância de trabalho.

Para a IEEE 1584, os valores são o espaçamento entre a parte frontal do equipamento e o corpo ou a cabeça do trabalhador. As mãos e os braços não entram no valor da distância, visto que, os maiores perigos com relação a danos nocivos estão relacionados ao tronco e à cabeça.

Com os dados anteriores, o oitavo passo é determinar a energia incidente normalizada (E_n). Sendo determinada por valores padrões, como: tempo de duração do arco elétrico de 200ms e distância de trabalho de 610 mm. A Equação (7) fornece a energia incidente normalizada:

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \log I_a + 0,0011G \quad (7)$$

E_n : Energia incidente normalizada [J/cm^2]

K_1 : $\begin{cases} -0,792 & \text{para ambiente aberto} \\ -0,555 & \text{para ambiente fechado} \end{cases}$

K_2 : é 0 para sistema isolado ou aterrado por alta resistência

e: $-0,113$ para sistema solidamente aterrado

G : Distância entre condutores [mm].

Para conversão do logaritmo, utiliza-se a Equação (8).

$$E_n = 10^{\log E_n} \quad (8)$$

A EI a partir da energia normalizada em cal/cm^2 Equação (9):

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t_A}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (9)$$

E : Energia incidente

C_f : Fator de cálculo: $\begin{cases} -1,0 & \text{para tensão} > 1kV \\ -1,5 & \text{para tensão} \leq 1kV \end{cases}$

E_n : Energia incidente normalizada

D : Distância do possível ponto do arco para uma pessoa [mm]

x : Expoente de distância, conforme Tabela IV.

O último passo consiste encontrar a distância segura de aproximação contra o AE. As normas NFPA 70E e IEEE 1584, definem a distância segura de aproximação como a distância da fonte do arco na qual uma energia de $1,2 cal/cm^2$ ($5 J/cm^2$), incide sobre um trabalhador sem EPI, causando queimadura de segundo grau. A distância segura é dada pela Equação (10).

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t_A}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (10)$$

D_B : Distância de aproximação do ponto do arco [mm]

E_B : Energia incidente [J/cm^2] na distância de proteção

Categoria de risco ou ferimento	Descrição da vestimenta	Suportabilidade mínima do EPI contra arco elétrico [J/cm^2 (cal/cm^2)]
0	Não fundível, materiais inflamáveis (como algodão não tratado, lã, nylon, seda ou mistura destes) com gramatura mínima de 152 g/cm ²	Não aplicável
1	Camisa e calça antichamas ou macacão antichama.	16,74 (4)

2	Camisa e calça antichamas ou macacão antichama.	33,47 (8)
3	Camisa e calça antichamas ou macacão antichama e roupa de proteção contra arco selecionada de forma que atenda os requisitos mínimos do nível de proteção desejado.	104,6 (25)
4	Camisa e calça antichamas ou macacão antichama e roupa de proteção contra arco selecionada de forma que atenda os requisitos mínimos do nível de proteção desejado.	167,36 (40)

Tabela 8 - Propriedades das roupas de proteção.

Caso os valores excedam os limites permitidos, o cálculo deve ser refeito, para diminuir o valor de EI. Isto atender o valor de ATPV, especificado na norma (NFPA, 2004).

4. Resultados

Com a programação do Visual Basic, elaborou-se o modelo matemático de cálculo da EI e a estimativa da distância segura. Na interface gráfica, entra-se com os dados do sistema para obter os resultados calculados.

Para validação da ferramenta, considerou-se a instalação do medidor de energia elétrica em baixa tensão, em um consumidor localizado próximo ao transformador abaixador de potência 112,5kVA 13,8kV/380/220V. Os dados da instalação para estimativa da energia incidente do AE e distância segura de aproximação constam na Tabela 9 (LOBO, CABRAL, 2016).

Medidor de energia elétrica em BT	Ambiente de trabalho aberto
Tensão	380 V
Corrente de curto-circuito trifásica simétrica	1,22 kA
Tempo de atuação da proteção	0,8 s
Distância entre os condutores	40 mm
Distância de trabalho típica	455 mm
Sistema aterrado	Sim

Tabela 9 - Dados da instalação do medidor de energia em baixa tensão.

Os dados de entrada para ferramenta de cálculo:

- Corrente de curto-circuito [kA]
- Tensão elétrica do sistema [kV]
- Local de trabalho (área aberta ou fechada)
- Distância entre barramentos [mm]
- Fator de aterramento do sistema
- Tempo de atuação da proteção [s]
- Distância de trabalho típica [mm]
- Expoente de distância

Com os dados do sistema, basta pressionar o botão “CALCULAR” para obter os valores de ATPV, classe de risco e distância segura de aproximação, conforme Figura 5.

LabSIEE - ESPECIFICAÇÃO DA VESTIMENTA DE PROTEÇÃO CONTRA ARCOS ELÉTRICOS

LabSIEE
Laboratório de Segurança Iluminação Eficiência Energética

ESPECIFICAÇÃO DA VESTIMENTA DE PROTEÇÃO CONTRA ARCOS ELÉTRICOS

Dados do Sistema

Corrente I_{cc} (kA): 1,22

Tensão do Sistema (kV): 0,38

Local de trabalho (aberto / fechado): -0,153

Distância típica entre os barramentos (mm): 40

Fator de Aterramento K2: -0,113

Tempo de Abertura da Proteção (s): 0,8

Distância de Trabalho Típica (mm): 455

Expoente de Distância: 2

Material de Apoio

Resultados

ATPV (cal/cm²): 5,76

RISCO: 1

DISTÂNCIA SEGURA DE APROXIMAÇÃO (mm): 489

CALCULAR

ENCERRAR

Figura 5 - Resultados de cálculo da instalação do medidor de energia.

Os resultados conferem com os cálculos, validando a ferramenta na especificação da roupa.

Para auxiliar na especificação da roupa, existe a função denominada “Material de Apoio”, que pode conferir todos os passos do método e os valores padronizados.

O aplicativo gera a placa de sinalização, alertando sobre o risco de AE, os níveis de energia e distância de segurança, conforme Figura 6.

PERIGO

RISCO DE ARCO E CHOQUE ELÉTRICO
NÃO SE APROXIME SEM O USO DO EPI

ATPV cal/cm² RISCO

DISTÂNCIA SEGURA mm

V_{nom}= V I_{cc}= kA T_{interr.}= s

Cálculos de acordo com a norma
IEEE Std. 1584-2002.

LabSIEE

Figura 6 - Placa de sinalização

A placa contém as informações de segurança para utilização da vestimenta correta.

5. Conclusão

Este artigo exibiu as principais características do arco elétrico e seus riscos as pessoas. Observou-se que os níveis de energia incidentes do AE são elevados, com alto potencial de destruição, e uma das principais fontes de acidentes. Foram aplicadas duas metodologias de cálculo da EI e distância segura de aproximação. Para depois ser aplicado em uma ferramenta gráfica para especificação da roupa. A elaboração da interface gráfica facilitou a especificação da vestimenta, evitando erros de cálculos nas etapas do método.

Referências

- AMMERMAN, R. F.; SEN, P.K.; NELSON, J.P. *Electrical arcing phenomena: a historical perspective and comparative study of the standards IEEE 1584 and NFPA 70E*. IEEE Industry Applications Magazine. v. 15, n. 3, p. 42-52, may/jun. 2009.
- BOWEN, J. E.; WACTOR, M. W.; MILLER, M.; CAPELLI-SCHELLPFEFFER, M. *Catch the wave*. IEEE Industry Applications Magazine. v. 10, n. 4, p. 59-67, jul./ago. 2004.
- CADICK, John; CAPELLI-SCHELLPFEFFER, M; NEITZEL, D. K. *Electrical safety handbook*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
- HOAGLAND, H. *Arc-flash PPE research update*. IEEE Transactions on Industry Applications. v. 49, n. 3, p. 1177-1187, may/jun. 2013.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *IEEE Std. 1584. - Guide for performing arc-flash hazard calculations*. IEEE Industry Applications Society. New York, New York: IEEE, 2002.
- JONES, R. A.; LIGGETT, D. P.; CAPELLI-SCHELLPFEFFER, M.; MACALADY, T.; SAUNDERS, L. F.; DOWNEY, R. E.; MCCLUNG, L. B.; SMITH, A.; JAMIL, S.; SAPORITA, V. J. *Staged tests increase awareness of arc-flash hazards in electrical equipment*. In: 44th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, Record of Conference Papers. Banff, Canada: IEEE, 1997.
- KUMPULAINEN, L.; DAHL, S. *Minimizing hazard to personnel, damage to equipment, and process outages by optical arc-flash protection*. In: PCIC Europe 2010 Conference Record. Oslo, Norway: IEEE, 2010.
- KUMPULAINEN, L.; DAHL, S.; MA, J. *Mitigation of arc-flash hazards and reduction of costs by selective arc-flash protection*. China International Conference on Electricity Distribution - CICED. Guangzhou, China: IEEE, 2008.
- LEE, R. H. *The other electrical hazard: electric arc blast burns*. IEEE Transactions on Industry Applications. v. IA-18, p. 246-251, may/jun. 1982.
- LOBO, D. L.; CABRAL, S.H.L. *Métodos de especificação de EPIs para proteção contra arcos elétricos*. Eletricidade Moderna, São Paulo, p.52-58, ago. 2016.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO - MTE. *Norma Regulamentadora n. 6 (NR-6), Equipamento de Proteção Individual – EPI*. Brasília, 2001.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO - MTE. *Norma Regulamentadora n. 10 (NR-10), Segurança em instalações e serviços em eletricidade*. Brasília, 2004.
- NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. *NFPA 70E Standard for electrical requirement for employee workplace*, 2004.
- NEAL, T. E.; BINGHAM, A. H.; DOUGHT, R. L. *Protective clothing guidelines for electric arc exposure*. IEEE Transactions on Industry Applications. v. 33, n. 4, p. 1041-1054, jul./aug. 1997.
- SANTOS, D. G. N.; AMORIM, M. C. *Evolução das condições de segurança do trabalho no setor elétrico brasileiro: um estudo sobre os seis primeiros anos da “nova nr-10”*. Abracopel, Rio Grande do Norte, 2016.
- SOUZA, R. F.; CARRARA, H; FINOCCHIO, M. A. F. *Roupa de proteção contra queimaduras por arcos elétricos*. In: EXPOUT 2009, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, Brasil: 2009.