

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PAULO ROBERTO DOS SANTOS

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SOFTWARE PARA ESPECIFICAÇÃO DE
VESTIMENTA DE PROTEÇÃO CONTRA ARCOS ELÉTRICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017

PAULO ROBERTO DOS SANTOS

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SOFTWARE PARA ESPECIFICAÇÃO DE
VESTIMENTA DE PROTEÇÃO CONTRA ARCOS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica – DAELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Cornélio Procópio, para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Me. Marcos Antonio
Ferreira Finocchio.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Paulo Roberto dos Santos

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SOFTWARE PARA ESPECIFICAÇÃO DE VESTIMENTA DE PROTEÇÃO CONTRA ARCOS ELÉTRICOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 15:50hs do dia 29/11/2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Me(a). Marco Antonio Ferreira Finocchio - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Luiz Marcelo Chiesse da Silva - (Membro)

Prof(a). Me(a). Ângelo Feracin Neto - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Dedico este trabalho a toda a minha família, em especial a minha avó Josefa (*in memoriam*), e a todos os meus amigos, por sempre me apoiarem no decorrer deste curso.

AGRADECIMENTOS

A minha família pelo grande apoio e dedicação para realização deste sonho.

Ao meu orientador, o Prof. Me. Marco Antonio Ferreira Finocchio, pelos conselhos técnicos e pessoais, e pela grande orientação durante o decorrer do curso e no desenvolvimento deste trabalho. Meu sincero agradecimento.

A todos os professores do laboratório LABSIEE, pelo suporte prestado.

A todos os professores do Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da UTFPR - câmpus Cornélio Procópio.

Aos professores Ângelo Feracin Neto e Luiz Marcelo Chiesse da Silva, participantes da banca de avaliação.

Aos companheiros de curso, os alunos Cleno Ravazzi, Murilo Cinel, Lucas Boff, Fabian Amer, Mateus Eller e Alex Soares.

Aos amigos Prof. Dr. Adriano Borges e Luiz Minato. Obrigado pela amizade.

A todos os professores com quem já tive aula, em especial ao Prof. Dr. Vallim, por ser o meu mentor pessoal e profissional durante todo o período da graduação.

Ao Campus Cornélio Procópio, pela liberação do espaço, ferramentas e materiais necessários para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

RESUMO

SANTOS, Paulo Roberto dos. **Implementação de um software para especificação de vestimenta de proteção contra arcos elétricos**. 2017. 48 f. Monografia – Programa de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Este trabalho tem como objetivo avaliar e propor a utilização de métodos que permitam a correta especificação da vestimenta de proteção contra arcos elétricos. Sendo a energia incidente de um arco elétrico extremamente prejudicial à segurança das pessoas que trabalham diretamente com uma instalação elétrica e aos equipamentos, esta deve ser mensurada de acordo com as normas vigentes e os riscos devem ser controlados e minimizados, de modo que a integridade física das pessoas e instalações sejam preservadas. Assim, o presente trabalho propõe a aplicação de uma ferramenta gráfica para auxiliar na especificação da vestimenta de proteção contra a energia incidente liberada durante a ocorrência do arco em sistemas de baixa tensão, afim de realizar uma correta estimativa dos níveis de energia, contribuindo com a especificação adequada das roupas de proteção e elevação da segurança no trabalho.

Palavras-chave: Arco Elétrico. Energia Incidente. Vestimenta de Proteção. Segurança no Trabalho.

ABSTRACT

SANTOS, Paulo Roberto dos. **Implementation of software for the specification of protective clothing for arc-flash**. 2017. 48 f. Monografia – Programa de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

The objective of this work is to evaluate and propose the use of methods that allow the correct specification of protective clothing against arc-flashes. Since the incident energy of 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 physical integrity of people and facilities are preserved. Thus, the present work proposes the application of a graphical tool to assist in the specification of protective clothing against the incident energy released during the occurrence of the arc in low voltage systems, in order to make a correct estimate of the energy levels released, contributing to the adequate specification of the clothes and safety at work.

Keywords: Arc-flash. Incident Energy. Protection Clothing. Safety at Work.

LISTA DE SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
ATPV	Arc Thermal Performance Value
CCM	Centro de Comando de Motores
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
EPI	Equipamento de Proteção Individual
EUA	Estados Unidos da América
NFPA	National Fire Protection Association
NR	Norma Regulamentadora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	10
1.1.1 Objetivo Geral.....	10
1.1.2 Objetivos Específicos.....	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 ARCO ELÉTRICO.....	11
2.2 OS RISCOS RELATIVOS AO ARCO ELÉTRICO	12
2.3 VESTIMENTAS DE PROTEÇÃO CONTRA ARCOS ELÉTRICOS	14
3 NORMAS RELATIVAS A PROTEÇÃO CONTRA O ARCO ELÉTRICO	16
3.1 NORMAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS.....	16
3.2 NFPA 70E	17
3.3 IEEE 1584.....	21
4 METODOLOGIA	30
4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO	30
4.2 CÁLCULO PELO MÉTODO NFPA 70E	31
4.3 CÁLCULO PELO MÉTODO IEEE 1584	32
4.4 CONSIDERAÇÕES DA NFPA 70E X IEEE 1584	33
4.5 IMPLEMENTAÇÃO DA NORMA IEEE 1584 NA FERRAMENTA GRÁFICA	34
5 RESULTADOS	38
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	41
6.1 CONSIDERAÇÕES	41
6.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	42
REFERÊNCIAS.....	43
APÊNDICE A	45

1 INTRODUÇÃO

Em sistemas elétricos de baixa, média ou alta potência, há a ocorrência de um fenômeno indesejável decorrente de curtos-circuitos ou falhas elétricas. Este fenômeno é denominado arco elétrico. A ocorrência do arco elétrico está associado à falhas no sistema, em geral, mal funcionamento de chaves seccionadoras, má operação de equipamentos elétricos energizados, quedas de ferramentas em painéis, entre outros. Quando ocorre, o arco libera partículas de metais ionizadas, podendo conduzir correntes, provocando um deslocamento de ar com o surgimento de uma região de alta pressão extremamente prejudicial aos materiais do sistema elétrico e, claro, para o ser humano.

O trabalhador do setor elétrico é o mais exposto aos riscos, pois realiza atividades em pontos energizados sujeitos a ocorrência do arco elétrico. Caso haja um sinistro envolvendo o arco, a energia liberada pelo poderará causar a queima da roupa e graves queimaduras da pele, ou mesmo levar à morte.

No que diz respeito à segurança do trabalho e à melhores condições ao profissional com relação a uma instalação elétrica segura, deve-se conhecer os efeitos e possíveis causas do arco elétrico, de modo que o trabalhador possa fazer uso de uma vestimenta que minimize ou extinga os efeitos provenientes do arco.

Entretanto, no Brasil, não há um método específico para o dimensionamento da energia incidente do arco elétrico, afim de, com os dados do sistema elétrico em mãos, possa se fazer um estudo, onde delimita-se uma distância de segurança precisa para os efeitos destrutivos de um possível arco elétrico, e uma correta escolha de vestimenta de proteção, provendo segurança adequada às pessoas que estiverem envolvidas no raio de alcance do arco.

Este cenário, pode estar contribuindo com os elevados casos de sinistros envolvendo arcos elétricos (SANTOS; AMORIM, 2016). Esta não especificidade da norma pode levar ao sub ou superdimensionamento de vestimentas de proteção ou uso de vestimentas inadequadas, ocasionando grandes chances de fatalidade diante de um sistema elétrico energizado.

Com isso, o propósito deste trabalho é o estudo e implementação de normas e métodos internacionais para o cálculo da energia incidente, distância de segurança e especificação da vestimenta adequada, considerando as características elétricas mais relevantes do sistema elétrico.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos propostos neste trabalho são divididos em Objetivo Geral e Objetivos Específicos e são apresentados nas subseções a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

Implementar modelos matemáticos para especificação de vestimenta de proteção contra os efeitos térmicos do arco elétrico em sistemas de baixa tensão.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma pesquisa para a elaboração de uma revisão bibliográfica de modo a fundamentar teoricamente o trabalho proposto;
- Escolher dentre as normas de especificação de proteção contra arcos elétricos qual é mais precisa e que oferece um grau de segurança maior ao trabalhador eletricista;
- Implementar uma ferramenta para cálculo dos níveis de energia do arco elétrico e posterior especificação da vestimenta;
- Realizar simulações nos exemplos implementados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

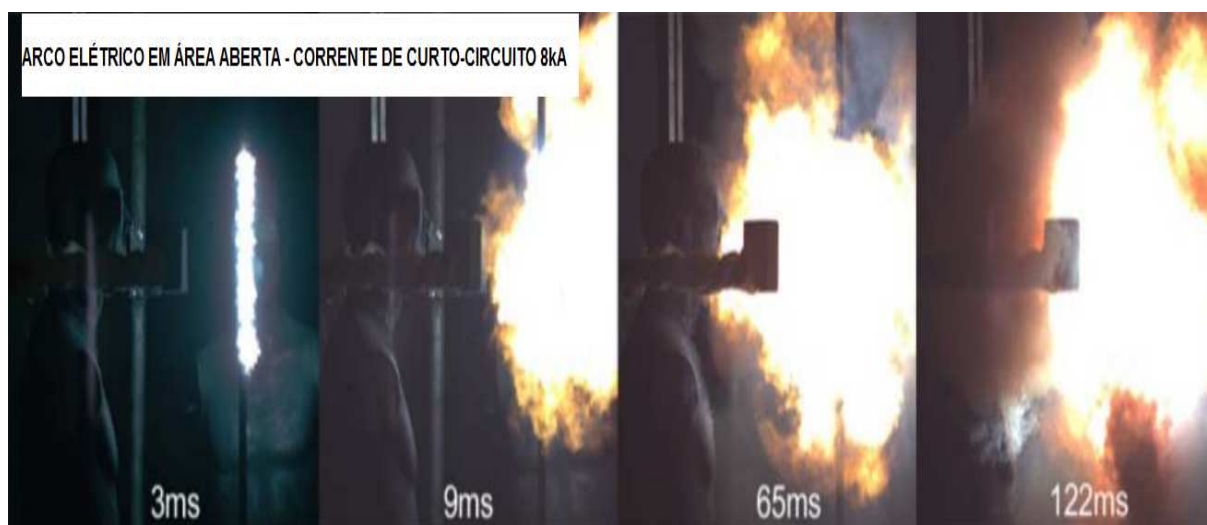
Esta seção tem por objetivo descrever as informações obtidas da literatura acerca das pesquisas referenciais do trabalho desenvolvido a fim de estabelecer uma relação clara da análise realizada com as bases teóricas que a sustenta.

2.1 ARCO ELÉTRICO

A definição de um arco elétrico está associada da ocorrência da passagem de uma grande quantidade de corrente elétrica por um meio anteriormente isolante, como exemplo o ar (LEE, 1982, p.1). Visto que o ar tem baixas propriedades condutoras de eletricidade, o fluxo da corrente do arco elétrico ocorre entre dois eletrodos por meio de gases superaquecidos e partículas do ar ionizado. A combinação de vapores ionizados e gases a altas temperaturas resulta em gases de plasma (CADICK; CAPELLI-SHELLPFEFFER; NEITZEL, 2006, p 1.8).

Na Figura 1 está representado a produção de nuvens de plasma no ponto de incidência do arco elétrico e seu aumento ao decorrer do tempo (HOAGLAND, 2013, p. 1182).

Figura 1 – Surgimento de nuvens de plasma na superfície do arco elétrico



Fonte: Adaptado de Hoagland (2013, p. 1182).

Para Kumpulainen, Dahl e Ma (2008, p. 1), o surgimento do arco se dá, de modo geral, por perdas de conexões do sistema elétrico, 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 arco elétrico é tipicamente de 1 s ou menos, todavia, nesse curto intervalo de tempo são produzidos intensos níveis de energia (NEAL; BINGHAM; DOUGHTY, 1997, p.1). De acordo com Ralph Lee (1982, p.2), no ponto de incidência de um arco a temperatura é extrema, em torno de 20.000 °C, o que representa uma temperatura de até quatro vezes maior que a superfície solar.

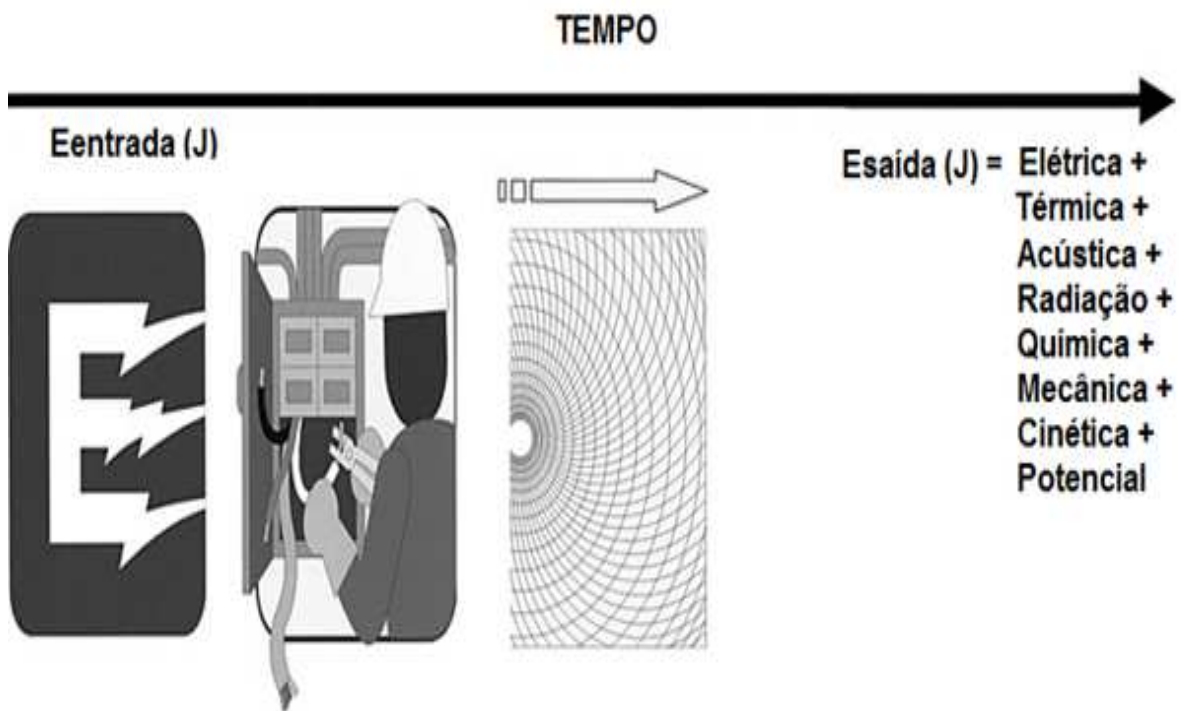
Quando ocorre, a alta temperatura e ondas de pressão no ponto de incidência do arco produzem expansões de gases e plasma, projetando materiais derretidos para fora da nuvem de gás com um alcance de até 3 m de distância do ponto de incidência, podendo causar sérios danos aos profissionais que atuam diretamente com o sistema energizado (CADICK; CAPELLI-SHELLPFEFFER; NEITZEL, 2006, p 1.8).

2.2 OS RISCOS RELATIVOS AO ARCO ELÉTRICO

Como citado anteriormente, a quantidade de energia dissipada por um arco elétrico pode ultrapassar 20.000 °C. Para Ralph Lee (1982, p. 2), essa característica de alta energia liberada em um curto intervalo de tempo, torna o arco elétrico um dos principais riscos envolvendo eletricidade, assim como o risco de choque elétrico. Os danos que o arco pode causar são drásticos, sejam eles materiais ocorridos na destruição total ou parcial de um painel elétrico, ou sejam eles nos danos ao trabalhador que, expostos a energia liberada pelo arco, podem sofrer graves queimaduras e até o óbito (INSTITUTE OF ELECTRICAL ELECTRONICS ENGINEERS, 2002, p. 64).

Na Figura 2 está ilustrado as etapas de transformação da energia elétrica durante a ocorrência de um arco elétrico (BOWEN et al., 2004, p. 59).

Figura 2 – Representação conceitual das transformações da energia elétrica durante um arco elétrico

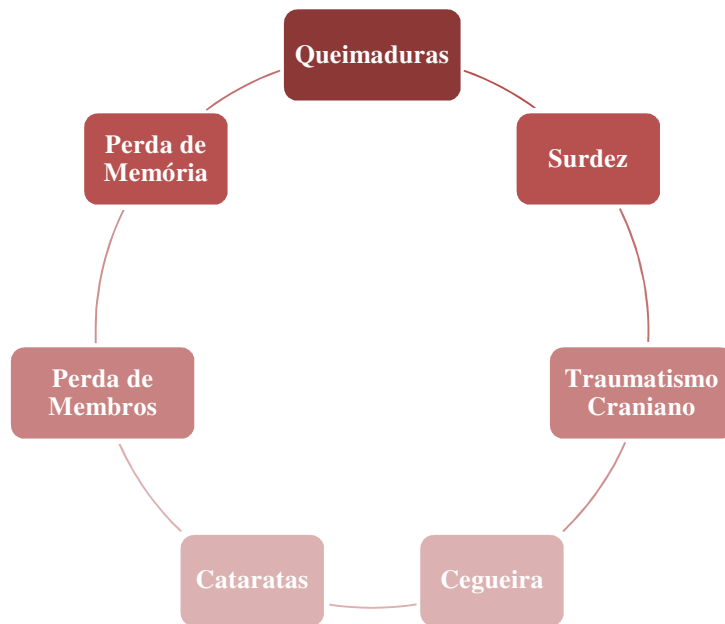


Fonte: Adaptado de Bowen et al. (2004, p. 59).

Quando ocorre o arco elétrico, ou seja, quando a corrente circula pelo ar, o primeiro risco eminente ao trabalhador é o choque elétrico. Com o tempo de duração de até 1 s, o efeito térmico na superfície do arco pode causar sérios danos a pele humana, tais como queimadura 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 desses gases, o efeito explosivo ocorre, ocasionando a projeção de materiais derretidos em direção do trabalhador, adicionadas as altas intensidades luminosas e sonoras (BOWEN et al., 2004, p. 65-66; JONES et al., 1997, p.319-320).

Em suma, para Bowen et al. (2004, p. 65), Kumpulainen e Dahl (2010, p. 1), Kumpulainen, Dahl e Ma (2008, p. 1-2) a Figura 3 corresponde aos riscos que a energia liberada pelo arco elétrico representa aos seres humanos.

Figura 3 – Riscos para os seres humanos quando expostos ao arco elétrico



Fonte: Adaptado de Bowen et al. (2004, p. 65).

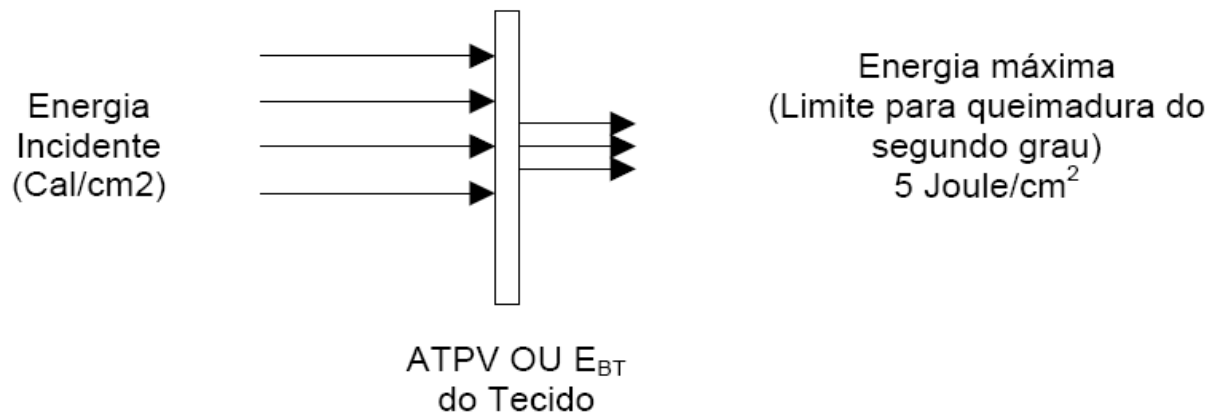
2.3 VESTIMENTAS DE PROTEÇÃO CONTRA ARCOS ELÉTRICOS

As pesquisas pioneiras desenvolvidas por Ralph Lee nos anos 80, contribuíram para o melhor entendimento e quantificação dos níveis de energia incidente do arco elétrico. Aliado a isso, pode-se classificar os riscos dos efeitos do arco para uma pessoa, e posterior desenvolvimento de vestimentas especiais de proteção contra arcos elétricos (NEAL et al., 1997, p. 1041).

Vestimentas de proteção são constituídas por tecidos especiais, que tem como objetivo neutralizar parcial ou totalmente os efeitos causados pelo arco, tais como queimaduras de segundo e terceiro grau. Em 1999, a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), definiu um indicador denominado *Arc Thermal Performance Value* (ATPV) para medir o desempenho desses tecidos contra arco elétrico. O indicador representa o valor máximo da energia incidente sobre o tecido que não resulta em energia no lado protegido (o corpo humano) superior ao valor que produz queimadura de segundo grau, isto é, que não ultrapasse 5 J/cm² (1,2 cal/cm²) e não entre em combustão (HOAGLAND, 2013, p. 1179; CADICK; CAPELLI-SHELLPFEFFER; NEITZEL, 2006, p 2.2-2.4).

Na Figura 4, tem-se uma representação da energia incidente de um arco sobre a vestimenta de proteção e como essa energia é reduzida no lado em contato com a pele do trabalhador (SOUZA; CARRARA; FINOCCHIO, 2009). Para a Figura 5, observa-se um trabalhador fazendo uso da vestimenta para proteção contra os agentes térmicos ocasionados pelo arco elétrico.

Figura 4 - Representação da energia incidente em uma vestimenta de proteção



Fonte: Roupas de proteção contra queimaduras por arcos elétricos (SOUZA; CARRARA; FINOCCHIO, 2009).

Figura 5 - Profissional paramentado com EPIs para proteção contra arco elétrico



Fonte: Equipamento de proteção individual (DEHN, 2017).

3 NORMAS RELATIVAS A PROTEÇÃO CONTRA O ARCO ELÉTRICO

Este capítulo aborda os pontos mais relevantes das normas relativas a proteção contra arcos elétricos, necessários para subsidiar o estudo de caso desenvolvido. A abordagem deste capítulo limita-se aos requisitos aplicáveis a sistemas elétricos de baixa tensão, visto que esta é a aplicação de interesse neste trabalho.

3.1 NORMAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS

As atividades envolvendo eletricidade estão cada vez mais regulamentadas. Há no Brasil e no exterior normas que abordam os riscos e proteção contra o arco elétrico com propriedade. Entretanto, quando se trata de especificar medidas de prevenção contra os efeitos térmicos devidos ao arco, levando em conta as características de um sistema elétrico, as normas da América do Norte são as melhores referências (LOBO; CABRAL, 2016, p. 52-55).

A legislação brasileira para segurança e saúde dos trabalhadores em eletricidade não possui métodos próprios para cálculo dos riscos do arco elétrico. 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 vestimentas de proteção contra os efeitos causados pelo arco elétrico 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, de acordo com os níveis de condutibilidade, influência magnética e inflamabilidade (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2001; MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2004). Isso é um grande problema, visto que não estabelecer critérios que levam em conta as características dos diferentes tipos de sistemas e instalações elétricas, pode ocasionar a escolha equivocada da vestimenta de proteção, 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, p. 52-54).

Nos Estados Unidos da América (EUA), as normas mais relevantes com relação a proteção contra os riscos oriundos de um arco elétrico são as seguintes (AMMERMAN; SEN; NELSON, 2009):

- IEEE Std 1584-2002, *IEEE Guide for performing arc-flash hazard calculations*;
- NFPA 70E, *Standard for electrical safety in the workplace, 2009 Edition*, NFPA (National Fire Protection Association).

A norma do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) - IEEE 1584 determina a distância de segurança para o risco do arco elétrico e a consequente energia incidente durante a realização de atividades nas proximidades de um sistema energizado. A metodologia desta norma baseia-se no cálculo da energia incidente por meio de equações obtidas por meio de análises estatísticas empíricas (CADICK; CAPELLI-SHELLPFEFFER; NEITZEL, 2006, p 3.53-3.55).

Com relação à norma da *National Fire Protection Association* (NFPA) NFPA 70E, esta também é fundamentada no cálculo da energia incidente e da determinação da distância segura de aproximação para especificação dos EPIs a serem utilizados pelos profissionais de eletricidade. No entanto, a distância de segurança é definida como sendo a distância à fonte de arco na qual a quantidade de energia de 1,2 cal/cm² incide sobre uma pessoa sem equipamento de proteção, provocando-lhe queimaduras de segundo grau (NEAL; BINGHAM; DOUGHTY, 1997, p.1; CADICK; CAPELLI-SHELLPFEFFER; NEITZEL, 2006, p 6.16-6.18).

3.2 NFPA 70E

O objetivo da NFPA 70E consiste em determinar os EPIs necessários para trabalhos executados a uma distância que apresente riscos de queimaduras em função do arco elétrico, baseado nos cálculo da energia incidente.

Caso a execução do trabalho seja realizada a uma distância segura de aproximação, o cálculo da energia incidente é dispensável. Visto que a distância segura de aproximação é definida como a distância da fonte do arco na qual uma energia de calor de 1,2 cal/cm² (5,0 J/cm²) incide sobre uma pessoa sem vestimenta de proteção, podendo causar queimadura de segundo grau (LOBO; CABRAL, 2016, p. 54).

A metodologia de cálculo da NFPA 70E para estimar os valores de energia incidente está baseada em três métodos, são eles:

- Método Teórico;

- Método Simplificado;
- Método Empírico.

O Método Teórico estima a energia incidente baseando-se em um valor teórico máximo, de acordo com os estudos realizados por Ralph Lee. Por esse método, aplicável para arcos elétricos ocorridos em ambiente aberto e tensão superior a 600V, a energia incidente é determinada pela seguinte Equação (3.1):

$$E = \frac{793I_{cc}Vt_A}{D^2} \quad (3.1)$$

onde:

E = Energia incidente, em cal/cm²;

I_{cc} = Corrente de curto-circuito, em kA;

V = Tensão do sistema, em kV;

t_A = Tempo de duração do arco, em segundos;

D = Distância de trabalho do ponto de arco elétrico, em polegadas.

Tratando-se de um modelo teórico, os valores de energia incidente calculados por esse método são elevados.

Nos casos de arcos ocorridos em ambiente aberto, a estimativa da energia incidente é dada pela Equação (3.2):

$$E_{MA} = 5271D_A^{-1,9593}t_A[0,0016I_{cc}^2 - 0,0076I_{cc} + 0,8938] \quad (3.2)$$

em que:

E_{MA} = Energia incidente máxima em ambiente aberto, em cal/cm²;

D_A = Distância de trabalho do ponto de arco elétrico, em polegadas;

t_A = Tempo de duração do arco, em segundos;

I_{cc} = Corrente de curto-circuito, em kA (entre 16 a 50 kA).

Por outro lado, para ambiente fechado, a estimativa da energia incidente deve ser calculada pela Equação (3.3).

$$E_{MB} = 1038,7D_B^{-1,4738}t_A[0,0093I_{cc}^2 - 0,3453I_{cc} + 5,9675] \quad (3.3)$$

em que:

E_{MB} = Energia incidente máxima em ambiente fechado, em cal/cm²;

D_B = Distância de trabalho do ponto de arco elétrico, em polegadas;

t_A = Tempo de duração do arco, em segundos;

I_{cc} = Corrente de curto-circuito, em kA (entre 16 a 50 kA).

Por sua vez, o Método Simplificado da NFPA 70E consiste na especificação do EPI adequado para proteção contra arco elétrico de acordo com o nível de tensão, o tempo para a proteção do circuito eliminar o arco e a corrente de curto-circuito. As categorias de risco consideradas para este método são as Categorias 2 e 4, não levando em consideração o valor da energia incidente.

Na Tabela 3.1 estão apresentados os valores de energia incidente para instalações de baixa tensão, adaptada da tabela D.9.1 da NFPA 70E.

Há na NFPA 70E outro grupo de tabelas para especificação do EPI a ser utilizado para proteção contra arcos elétricos. Nessas tabelas, a escolha do EPI é realizada de acordo com o tipo de equipamento, atividade que será executada, a corrente do curto-circuito e o tempo para eliminação do arco (CADICK; CAPELLI-SHELLPFEFFER; NEITZEL, 2006, p 3.57-3.61).

Por fim, tem-se o Método Empírico da NFPA 70E, que é baseado na IEEE 1854 e está descrito no item 3.3.

As etapas necessárias para especificação dos EPIs de acordo com essas tabelas estão de acordo com a Tabela 3.2.

Tabela 3.1 – Limites máximos da corrente de curto-circuito para vários níveis de tensão e tempo de abertura de disjuntores, para uso de EPIs nas categorias de risco 2 e 4 e arco elétrico em ambiente fechado.

TENSÃO (V)	TEMPO PARA ELIMINAÇÃO DO ARCO (s)	MÁX. CORRENTE DE CURTO- CIRCUITO TRIFÁSICA PARA USO DE EPI Cat. 2 (8 cal/cm²)	MÁX. CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA PARA USO DE EPI Cat. 4 (40 cal/cm²)
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 3.2 – Passos para determinação da vestimenta de proteção de acordo com a NFPA-70E.

Etapa	NFPA 70E
1	Informações necessárias: corrente de curto-circuito, tempo de interrupção do arco e descrição da tarefa a ser executada.
2	Consulta-se a tabela 130.7.(C) (9) para definir a categoria do risco.
3	Consulta-se a tabela 130.7.(C) (10) que define as vestimentas de proteção e os EPIs de acordo com a categoria de risco.
4	Consulta-se a tabela 130.7.(C) (11) que define as características das vestimentas de proteção de acordo com a categoria de risco.

3.3 IEEE 1584

A norma IEEE 1584 é um guia que fornece técnicas para determinação da distância segura para o risco de arco elétrico e energia incidente que o trabalhador possa estar exposto durante o desenvolvimento de atividades realizadas em um equipamento elétrico ou nas proximidades de um sistema energizado (AMMERMAN; SEN; NELSON, 2009).

Os modelos matemáticos estabelecidos na norma IEEE 1584 são baseados de análises estatísticas e ajustes de curvas com base em uma série de testes empíricos realizados em laboratório. Por meio desses ensaios, o grupo de trabalho da norma IEEE 1584 desenvolveu novos modelos para o cálculo da energia incidente em sistemas de alta e baixa tensão.

Para a aplicação desta norma, as instalações devem estar de acordo com as seguintes especificações:

- Sistema trifásico com tensão entre 208 V e 15 kV;
- Frequência 50 Hz e 60 Hz;
- Corrente de curto-circuito de 700 A a 106 kA;
- Espaçamento entre condutores de 13 mm a 152 mm.

As etapas necessárias para cálculo da energia incidente e distância de segurança estão de acordo com a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Etapas para a determinação da energia incidente e da distância segura de aproximação de acordo com a IEEE 1584.

Etapa	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 arco elétrico.
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 arco elétrico.

A primeira etapa é fundamental para a correta aplicação do método, pois são coletados os dados do sistema elétrico em estudo, tais como os diagramas unifilares, que devem estar o mais detalhado possível. Devem ser considerados também os circuitos de distribuição de baixa tensão e possíveis alimentadores alternativos.

Dos diagramas unifilares, são extraídos todos os dados necessários para o cálculo de curto-circuito. As fontes de energia como a concessionária, geradores auxiliares e motores com potência acima de 37 kW devem ser levadas em consideração, pois de acordo com o guia, motores com potência superiores a esta contribuem de maneira relevante para os valores de curto-circuito. No geral, os diagramas devem representar os transformadores, linhas de transmissão, circuitos de distribuição, sistemas de aterramento elétrico, reatores limitadores de correntes e outros equipamentos limitadores de corrente, correção ou estabilização de tensão, capacitores, chaves seccionadoras, disjuntores e Centro de Comando de Motores (CCMs). Quanto mais detalhado for o levantamento de dados do sistema elétrico, melhor será a

estimativa da energia incidente e distância de aproximação segura. A norma aponta que os equipamentos abaixo de 240 V e potências menores que 125 kVA, os mesmos não necessitam ser considerados.

Para a segunda etapa, necessita-se analisar todos os modos de operação do sistema elétrico. Conforme descrito na IEEE 1584, em sistemas radiais, há somente um modo de operação normal, entretanto existem outros sistemas mais complexos que possuem distintos modos de operação. Com relação aos CCMs, estes podem operar com um ou dois alimentadores ou geradores com possibilidade de utilização de sistemas de paralelismo com a concessionária de energia. Considera-se essencial a determinação da corrente de curto-circuito para o modo de operação com máxima e mínima corrente de curto-circuito possíveis (INSTITUTE OF ELECTRICAL ELECTRONICS ENGINEERS, 2002, p. 6).

Garantindo que os dados estejam de acordo com os limites de aceitação, o terceiro passo é calcular a corrente de curto-circuito (I_{cc}) no ponto onde se deseja encontrar o valor de energia incidente.

Com o devido valor de I_{cc} obtido, na quarta etapa determina-se a corrente do arco elétrico (I_a) para sistemas de baixa tensão (até 1 kV) por meio da Equação (3.4):

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{cc} + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588V(\lg I_{cc}) - \quad (3.4) \\ -0,00304G(\lg I_{cc})$$

onde:

\lg = Logaritmo na base 10;

I_a = Corrente do arco elétrico, em kA;

K = É $-0,153$ para o arco em ambiente aberto e $-0,097$ para arco em ambiente fechado;

I_{cc} = corrente de curto-circuito para uma falta trifásica, em kA;

V = tensão do sistema, em kV;

G = distância entre condutores, em mm.

A distância entre condutores (G) é determinada pela Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Fatores para equipamentos e classes de tensão.

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

Já para as faixas de tensões entre 1 kV e 15 kV, não há distinção entre as configurações em ambiente aberto e ambiente fechado, devendo ser aplicada a seguinte Equação (3.5):

$$lgI_a = 0,00402 + 0,983lgI_{cc} \quad (3.5)$$

em que:

lg = Logaritmo na base 10;

I_a = Corrente do arco elétrico, em kA;

I_{cc} = Corrente de curto-circuito para uma falta trifásica, em kA.

Para realizar-se a conversão do logaritmo, utiliza-se a equação (3.6).

$$I_a = 10^{lgI_a} \quad (3.6)$$

Com o objetivo de terminar um segundo tempo de duração do arco, a norma determina que deve ser calculada uma segunda corrente do arco elétrico, sendo 85% da I_a .

No quinto passo, necessita-se conhecer o tipo utilizado de dispositivo de proteção contra o arco elétrico, com o propósito de identificar o tempo de interrupção desse equipamento. Este valor é o próprio tempo de duração do arco.

Alguns dispositivos possuem valores de tempo de interrupção conforme Tabela 3.5. Caso outros dispositivos não se enquadrem nesta tabela, estes devem ter seus tempos informados pelo fabricante.

Tabela 3.5 – Tempo de abertura para disjuntores de potência.

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

Para determinar as tensões dos sistemas e a classe dos equipamentos, no sexto passo, deve-se documentar, para cada barramento, a tensão do sistema e o tipo de equipamento, conforme disposto na Tabela 3.6, para posterior identificação do espaçamento entre os barramentos.

Tabela 3.6 – Distância típica entre os barramentos.

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
CCMs e quadros elétricos de baixa tensão	25
Cabos	13
Outros	Não necessário

Na sétima etapa, tem-se a determinação do tipo de equipamento e distância típica de trabalho. A distância típica de trabalho para a próxima etapa do cálculo está demonstrada na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Tipo de equipamento e distância de trabalho típica.

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

De acordo com a IEEE 1584, estes valores representam 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 dessa distância, visto que, os maiores perigos com relação a danos nocivos nas pessoas são relacionados ao tronco e à cabeça.

Com os dados obtidos nas etapas anteriores, o oitavo passo consiste em calcular a energia incidente normalizada (E_n). Ela é determinada por valores padrões, tais como: tempo de duração do arco elétrico de 0,2 segundos e distância de trabalho de 610 mm. Na Equação (3.7) demonstra-se o cálculo necessário para que a energia incidente normalizada seja determinada:

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011G \quad (3.7)$$

em que:

\lg = Logaritmo na base 10;

E_n = Energia incidente normalizada (J/cm²) para tempo de 200 ms e distância de 610 mm;

K_1 = É -0,792 para ambiente aberto e -0,555 para ambiente fechado;

K_2 = É 0 para sistema isolado ou aterrado por alta resistência e -0,113 para sistema solidamente aterrado;

G = distância entre condutores, em mm.

Para conversão do logaritmo, utiliza-se a Equação (3.8).

$$E_n = 10^{\lg E_n} \quad (3.8)$$

Por fim, converte-se para energia incidente a partir da energia normalizada em cal/cm² pela Equação (3.9):

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t_A}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (3.9)$$

em que:

E = Logaritmo na base 10;

C_f = Fator de cálculo:

- 1,0 para tensão acima de 1 kV;
- 1,5 para tensão igual ou menor do que 1 kV;

E_n = Energia incidente normalizada;

t_A = Tempo do arco, em segundos;

D = distância do possível ponto do arco para uma pessoa (mm);

x = expoente de distância, de acordo com Tabela 3.4.

Finalmente, a última etapa consiste na determinação da distância segura de aproximação contra o arco elétrico. A norma NFPA 70E, bem como a IEEE 1584, definem a distância segura de aproximação como a distância da fonte do arco na qual uma energia de calor de 1,2 (cal/cm²), ou 5,0 (J/cm²), incide sobre uma pessoa sem equipamento de proteção, causando-lhe queimadura de segundo grau.

A distância segura de aproximação deve-se ser calculada pela Equação (3.10).

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t_A}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (3.10)$$

em que

D_B = Distância de aproximação do ponto do arco, em (mm);

C_f = Fator de cálculo

- 1,0 para tensão acima de 1 kV;
- 1,5 para tensão igual ou menor do que 1 kV;

E_n = Energia incidente normalizada;

E_B = Energia incidente (J/cm²) na distância de proteção;

t_A = Tempo do arco, em segundos;

D = Distância do possível ponto do arco para uma pessoa (mm);

x = Expoente de distância, de acordo com Tabela 3.4.

Deste modo, a NFPA 70E define que o indicador ATPV é dividido em cinco categorias de risco, de acordo com a energia incidente calculada. A Tabela 3.8 demonstra essas cinco categorias.

Tabela 3.8 – Características das roupas de proteção.

Categoria de risco ou ferimento	Descrição da vestimenta	Suportabilidade mínima do EPI contra arco elétrico [J/cm² (cal/cm²)]
0	Não fundível, materiais inflamáveis (por exemplo, algodão não tratado, lã, nylon, seda ou mistura destes materiais) 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)

Caso ocorra de os valores ultrapassarem os limites permitidos, sugere-se que o cálculo seja feito e melhorias nas instalações sejam executadas, a fim de diminuir o valor de energia incidente, de modo que o ATPV seja atendido, como especificado na norma (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, 2004).

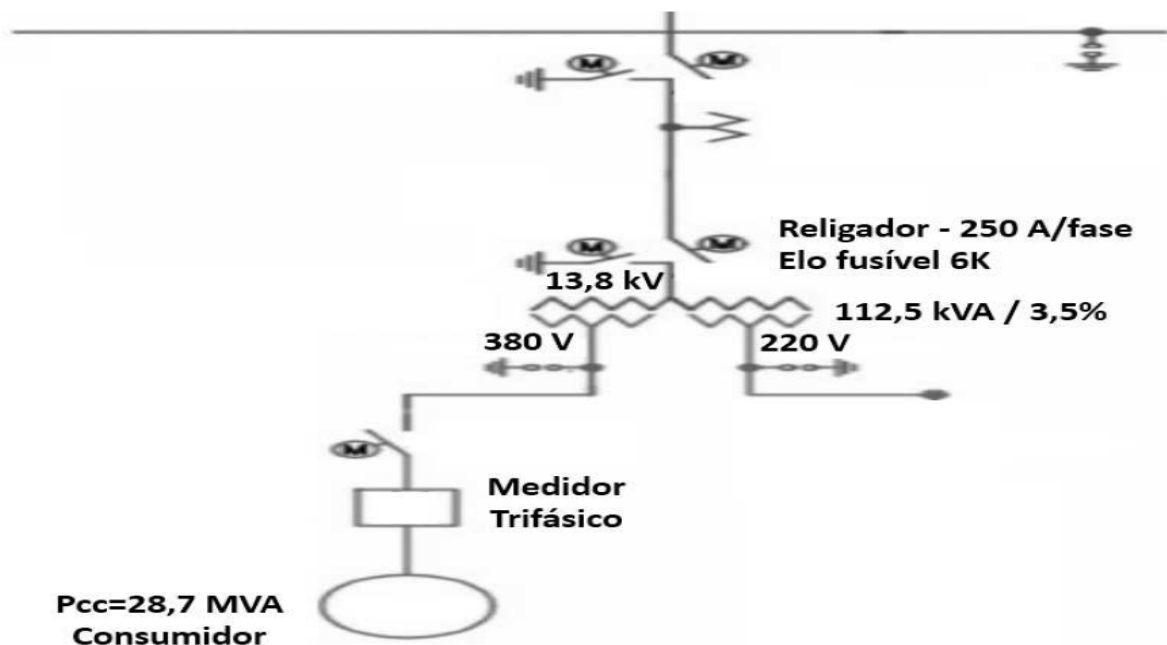
4 METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentados sistematicamente os procedimentos realizados durante a execução deste trabalho.

4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

A instalação elétrica utilizada como exemplo neste capítulo está representada no diagrama unifilar simplificado da Figura 6. Este circuito é típico de uma instalação de um medidor trifásico de energia elétrica em baixa tensão, em um consumidor localizado nas proximidades a um transformador abaixador de 13,8 kV para 380/220 V, como potência de 112,5 kVA e impedância do transformador de 3,5%, com proteção em seu lado primário por elos fusíveis do tipo 6K.

Figura 6 – Diagrama unifilar simplificado



Fonte: Adaptado de Lobo e Cabral (2016, p. 55).

A rede primária possui 1,4 km de extensão e tem proteção na saída da subestação da concessionária por um religador com ajuste de fase em 250 A. Na saída do circuito do

transformador, a potência de curto-circuito corresponde a 28,7 MVA, implicando em uma corrente de curto-circuito de 1,22 kA que, vista pelo primário do transformador, representa uma corrente de curto-circuito de 34 A, valor baixo para sensibilizar o religador da concessionária. Deste modo, a proteção do sistema é feita somente pelo elo fusível, que possui fusão em um intervalo de tempo máximo de 0,8 s para a corrente de 34 A, de acordo com os dados do fabricante da curva característica tempo x corrente.

Para a instalação do medidor trifásico de energia elétrica, a execução do trabalho é realizada no nível do solo com os condutores desenergizados. Após o término da instalação do equipamento, obtém-se a conexão com a rede elétrica secundária energizada (LOBO; CABRAL, 2016, p. 55-56).

4.2 CÁLCULO PELO MÉTODO NFPA 70E

Na aplicação da metodologia de cálculo, considera-se que, na realização do trabalho, o eletricitista esteja a 0,4 m (15,7 polegadas) de distância dos condutores, isto é, distante do ponto de incidência do arco.

Com isso, de acordo com estes dados e as informações do item 4.1, a estimativa da energia incidente de acordo com a NFPA 70E é dada pela Equação (4.1):

$$E_{MA} = 5271.17,7^{-1,9593} \cdot 0,8 \cdot [0,00161,22^2 - 0,00761,22 + 0,8938] \quad (4.1)$$

$$E_{MA} = 16,97 \text{ cal/cm}^2$$

Para a energia incidente calculada, pela tabela 130.7 (C) da NFPA 70E, há a necessidade de utilização de vestimentas e de EPIs da categoria de risco 3 (elevado), com o valor de ATPV de 25 cal/cm².

Para a distância mínima de aproximação segura, tem-se o valor calculado conforme Equação (4.2):

$$D_A = \left[\frac{1,2}{5271 \cdot 0,8 (0,0016 \cdot 1,22^2 - 0,0076 \cdot 1,22 + 0,8938)} \right]^{-1,9593} \quad (4.2)$$

$$D_A = 60,69'' \text{ ou } 1,54 \text{ m}$$

4.3 CÁLCULO PELO MÉTODO IEEE 1584

De acordo com a metodologia descrita no item 3.3, inicia-se o método da IEEE 1584 pelo cálculo da corrente de arco. Além de se levantar os dados do sistema elétrico, obtêm-se os valores típicos a partir das tabelas específicas.

Para a instalação de um painel de medição em baixa tensão, a distância típica entre os condutores deve ser de 40 mm, para uma distância de trabalho típica de 0,455 m. A norma estabelece também a utilização de coeficientes específicos, de acordo os dispositivos envolvidos, a instalação e o ambiente. Os coeficientes de cálculo de acordo com as características da instalação, são:

- Fator de distância X igual a 2,0;
- Fator K para ambiente aberto igual a -0,153;
- Fator K₂ para sistema aterrado igual a -0,113;
- Fator de cálculo C_f igual a 1,5.

Assim, com estes parâmetros, tem-se a corrente do arco elétrico de acordo com a Equação (4.3).

$$\begin{aligned} \lg I_a &= -0,153 + 0,662 \lg(1,22) + 0,0966 \cdot 0,38 + 0,000526 \cdot 40 + \\ &+ 0,5588 \cdot 0,38(\lg(1,22)) - 0,00304 \cdot 40(\lg(1,22)) \end{aligned} \quad (4.3)$$
$$I_a = 0,933 \text{ kA}$$

Posteriormente, executa-se o cálculo da energia incidente normalizada, conforme Equação (4.4):

$$E = 4,184 \cdot 1,5 \cdot 0,128 \cdot \left(\frac{0,8}{0,2}\right) \left(\frac{610^2}{455^2}\right) = 5,776 \text{ cal/cm}^2 \quad (4.4)$$

Para o valor de energia incidente calculado, existe a necessidade de utilização de EPIS de categoria de risco 1, com ATPV mínimo de 4 cal/cm².

Por sua vez, a distância segura de aproximação de acordo com a equação (4.5) é dada por:

$$D_B = \left[4,184 \cdot 1,5 \cdot 0,128 \cdot \left(\frac{0,8}{0,2} \right) \left(\frac{610^2}{5,0} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = 489 \text{ mm} \quad (4.5)$$

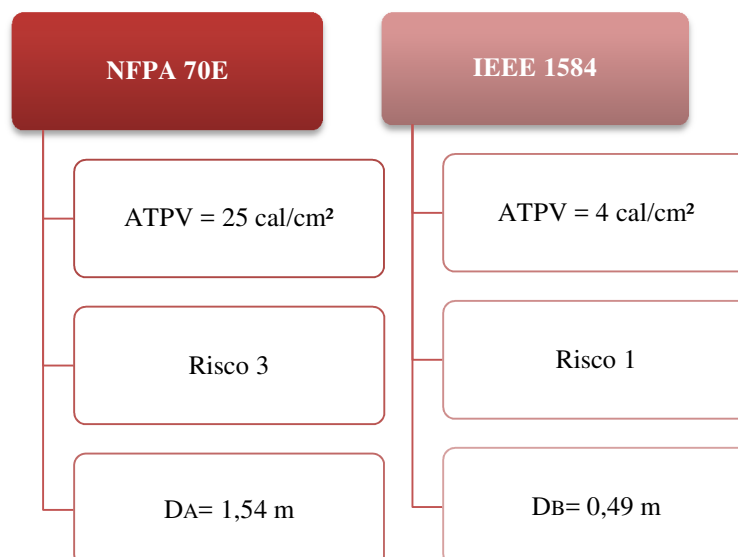
4.4 CONSIDERAÇÕES DA NFPA 70E X IEEE 1584

Com as aplicações da NFPA 70E e IEEE 1584, determinaram-se os principais parâmetros para a especificação da vestimenta de proteção contra os efeitos térmicos do arco elétrico.

Na NFPA 70E, a metodologia de cálculo é direta, entretanto os resultados calculados levam, em alguns casos, a superdimensionamentos das vestimentas, ocasionando problemas ocupacionais e ergonômicos, pois a gramatura das roupas de classe de risco 3 e 4 são maiores, limitando a mobilidade do trabalhador.

Por sua vez, a norma IEEE 1584 é mais detalhada, contendo mais etapas para estimativa da energia incidente, garantindo que o trabalhador use as vestimentas mais adequadas para o trabalho específico, conforme os resultados dos métodos representados na Figura 7.

Figura 7 – Comparação dos resultados dos métodos teórico e empírico



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que para a mesma instalação analisada, obtiveram-se dois resultados muito distintos de classes de risco e distância de segurança.

Assim, pelas características da IEEE 1584, esta foi adotada para ser a base de cálculo na implementação da ferramenta gráfica para especificação da vestimenta de proteção contra os efeitos do arco elétrico.

4.5 IMPLEMENTAÇÃO DA NORMA IEEE 1584 NA FERRAMENTA GRÁFICA

Primeiramente, para implementação do método de cálculo proposto pela IEEE 1584 na ferramenta gráfica, seguiram-se as seguintes etapas:

- Elaboração da interface gráfica com o usuário;
- Implementação do código para execução do método de cálculo.

Como a interface gráfica será a entrada de informações do sistema elétrico para que o código execute o método de cálculo, fez-se necessário estipular o maior número de dados possíveis para o programa. Deste modo, os dados solicitados para o usuário são:

- Tensão elétrica do sistema (kV);
- Corrente de curto-circuito (kA);
- Tempo de atuação da proteção (s);
- Local de trabalho (área aberta ou fechada);
- Tipo de equipamento;
- Tipo de aterramento do sistema;
- Distância entre os condutores (mm);
- Distância de trabalho típica (mm).

Definidas todas as entradas de dados, determinou-se que os valores dos resultados dos cálculos a serem exibidos foram:

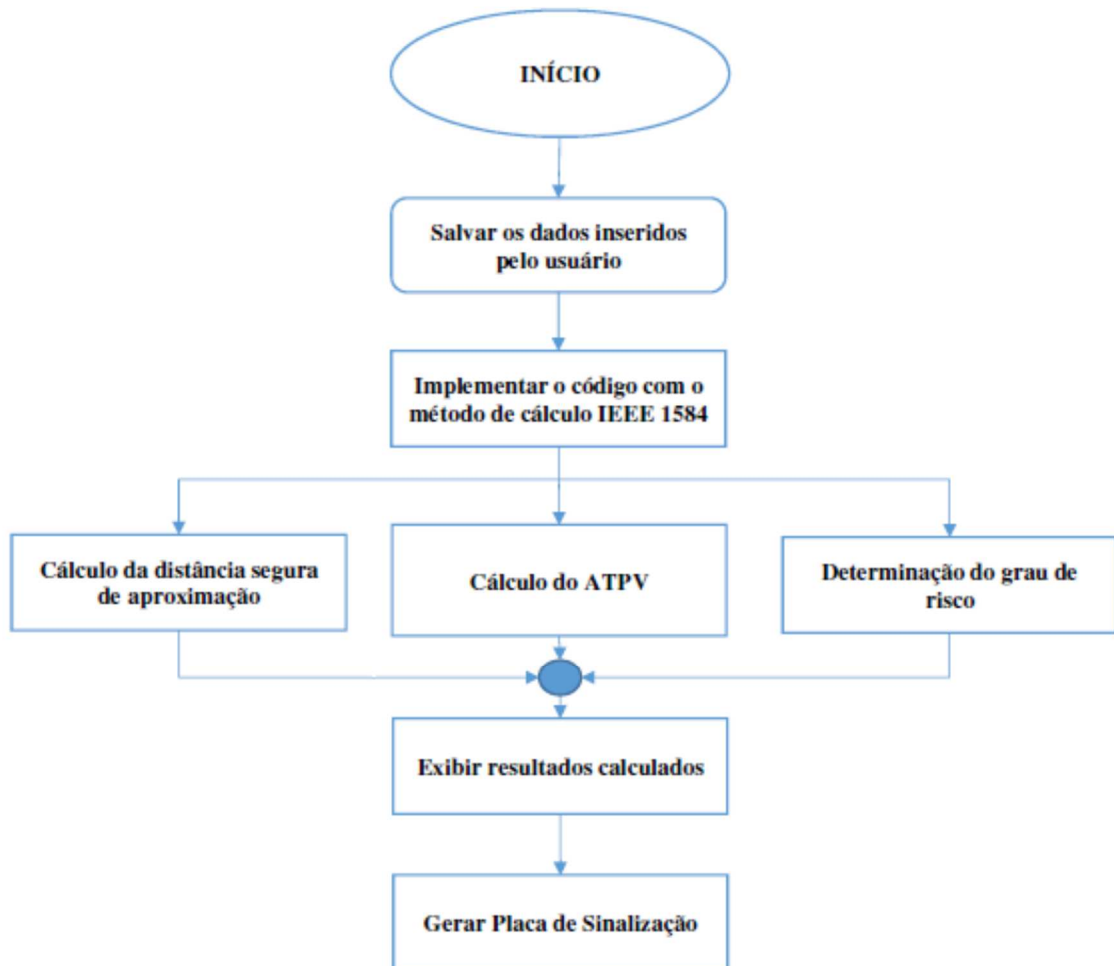
- ATPV;

- Grau de Risco;
- Distância Segura de Aproximação.

Os resultados dos cálculos serão inseridos em placa de sinalização para ser fixada no local de trabalho, a fim de alertar sobre o risco do arco elétrico, seus níveis de energia e distância de segurança.

Com as ideias centrais do sistema, elaborou-se um fluxograma do programa, com o intuito de facilitar o desenvolvimento do código. Deste modo, a lógica estrutural de programação baseou-se no fluxograma da Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma para elaboração do trabalho.



Fonte: Autoria própria

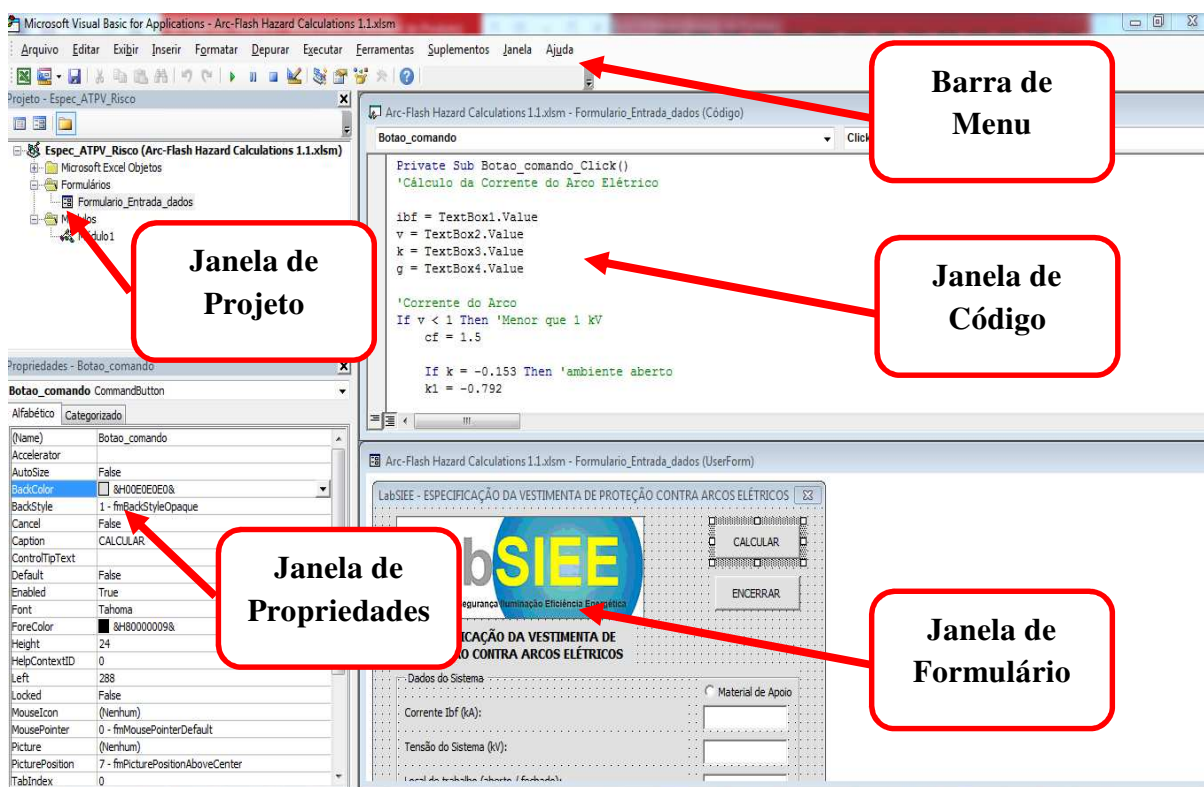
A ferramenta gráfica utilizada para implementação foi o *Visual Basic*, que é uma linguagem visual orientada a eventos e objetos que são exibidos na tela como ícones para serem

inseridos em uma plataforma de trabalho. Nesta linguagem de programação estão contidas inúmeras classes predefinidas, entretanto, permite-se que o programador crie classes com características específicas (UNIVERSIDADE DO PORTO, 2017).

Comparando-se com as linguagens tradicionais, o desenvolvimento da interface é de criação do próprio programa, isto é, o código que gera a interface está contido no programa. Todavia, no *Visual Basic* não há a necessidade de escrever linhas de código para criação da interface, pois recorre-se às classes de objetos existentes, tais como caixas de texto, botões e barra de menus (UNIVERSIDADE DO PORTO, 2017).

Na Figura 9 está ilustrado o visual do ambiente de desenvolvimento do *Visual Basic* implementado.

Figura 9 - Ambiente de desenvolvimento do *Visual Basic*.



Fonte: Autoria própria

No ambiente de programação do *software Visual Basic*, criou-se uma rotina de código para salvar os dados inseridos pelo usuário. O código desenvolvido está disposto no apêndice A. Posteriormente, as equações são executadas para determinação das variáveis de interesse, sendo o ATPV, Grau do Risco e Distância Segura de Aproximação. Com todas rotinas de cálculo executadas, os resultados são exibidos para o usuário.

Considerou-se importante adicionar um ícone na interface gráfica denominado “Material de Apoio”, contendo todas as etapas do método e seus valores padrões. Esse material pode ser acessado conforme necessidade do usuário.

Por fim, tem-se a geração de uma placa de identificação para ser fixada no local de trabalho, a fim de alertar sobre o risco do arco elétrico, seus níveis de energia e distância de segurança.

5 RESULTADOS

No ambiente de programação do Visual Basic, implementou-se o modelo matemático para cálculo da energia incidente e estimativa da distância de segurança. Por meio de uma interface gráfica, pode-se carregar os dados do sistema e obter os resultados calculados.

Deste modo, para validação da ferramenta desenvolvida, considerou-se a instalação de um medidor de energia elétrica em baixa tensão, em um consumidor localizado próximo a um transformador abaixador de 13,8 kV para 380/220 V e potência de 112,5 kVA. Os principais dados dessa instalação para estimativa da energia incidente do arco elétrico e distância segura de aproximação estão listados na Tabela 5.1 (LOBO; CABRAL, 2016).

Tabela 5.1 – Dados da instalação de um medidor de energia elétrica em baixa tensão.

Medidor de energia elétrica em baixa tensão	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

Fonte: Métodos de especificação de EPIs para proteção contra arcos elétricos (LOBO; CABRAL, 2016, p. 55-56).

Assim, para preenchimento dos dados na ferramenta de cálculo, são necessários os seguintes dados:

- Corrente de curto-circuito (kA);
- Tensão elétrica do sistema (kV);
- Local de trabalho (área aberta ou fechada);
- Distância entre os 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 inseridos, pressiona-se o botão de comando “CALCULAR” para obter os valores de ATPV, classe do risco e distância segura de aproximação, conforme exemplo da Figura 10.

Figura 10 – Resultados de cálculo do circuito da instalação do medidor de energia elétrica

The screenshot shows a software window titled "LabSIEE - ESPECIFICAÇÃO DA VESTIMENTA DE PROTEÇÃO CONTRA ARCOS ELÉTRIC...". The window contains the LabSIEE logo and the text "Laboratório de Segurança Iluminação Eficiência Energética". Below the logo, there are two buttons: "CALCULAR" and "ENCERRAR". The main area is titled "ESPECIFICAÇÃO DA VESTIMENTA DE PROTEÇÃO CONTRA ARCOS ELÉTRICOS" and is divided into two sections: "Dados do Sistema" and "Resultados".

Dados do Sistema

Parâmetro	Valor
Corrente Icc (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

APTV (cal/cm²):	5,76	RISCO:	1
DISTÂNCIA SEGURA DE APROXIMAÇÃO (mm):	489		

Por: Paulo Roberto dos Santos

Fonte: Autoria própria.

Os resultados exibidos estão de acordo com os cálculos realizados manualmente, conforme descrito no capítulo anterior, validando a efetividade da ferramenta de especificação de vestimenta.

Para auxílio da correta especificação da vestimenta, há uma função denominada “Material de Apoio”, que pode ser acessada para conferir todas as etapas do método e seus respectivos valores padronizados.

Por fim, é possível gerar a impressão da placa de sinalização, a fim de alertar sobre o risco do arco elétrico, seus níveis de energia e distância de segurança. Na Figura 11, tem-se o modelo do identificador proposto.

Figura 11 - Placa de sinalização

A placa de sinalização é retangular e dividida em seções. O topo é uma faixa vermelha com o texto "PERIGO" em branco e dois ícones de relâmpago amarelos em cantos. Abaixo, uma faixa preta contém o texto "RISCO DE ARCO E CHOQUE ELÉTRICO" e "NÃO SE APROXIME SEM O USO DO EPI" em branco. O corpo principal da placa é branco e contém campos de texto cinza para inserir dados: "ATPV" e "cal/cm²" em um campo, "RISCO" em outro; "DISTÂNCIA SEGURA" e "mm" em um campo; e "V_{nom}=", "V", "I_{cc}=", "kA" e "T_{interr.} =" e "s" em três campos separados. Na base, há o texto "Cálculos de acordo com a norma IEEE Std. 1584-2002." e o logotipo "LabSIEE".

Fonte: Autoria própria

Nota-se que a placa de sinalização contém as informações necessárias de segurança para os que trabalhadores utilizem a vestimenta adequada. Importante garantir que a placa seja fixada em local apropriado, deixando-a visível e em tamanho que facilite ao máximo a leitura e a compreensão dos dados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

6.1 CONSIDERAÇÕES

Este trabalho apresentou o estudo das principais características do arco elétrico e os principais riscos aos seres humanos. Com a pesquisa realizada, observaram-se que os níveis de energia incidentes de um arco elétrico são elevados, com alto potencial de destruição, tornando o arco elétrico uma das principais causas de acidentes do trabalho. Diante disso, organizações nacionais e internacionais estudam e desenvolvem técnicas para proteger os trabalhadores contra os efeitos do arco elétrico, propondo a utilização de vestimentas de proteção e distância de trabalho seguras.

Foram aplicadas duas metodologias de cálculo da energia incidente e distância segura de aproximação, para posterior aplicação do método em uma ferramenta gráfica para especificação da vestimenta de proteção. A primeira metodologia é a NFPA 70E, que é um método teórico limitado a sistemas de baixa tensão. A segunda metodologia é a IEEE 1584, que é um método empírico limitado a baixa tensão. Ambos os métodos foram aplicados a um exemplo teórico de um circuito de instalação de medidor de energia e seus resultados comparados. Das abordagens dos métodos teórico e empírico, observaram-se que os valores calculados aplicando o método teórico foram muito superiores que o método da IEEE 1584, implicando assim níveis elevados de energia incidente para uma mesma instalação analisada e, conseqüentemente, um superdimensionamento da vestimenta de proteção.

Pelo fato de ser uma metodologia mais elaborada, o método de cálculo implementado na ferramenta gráfica foi o IEEE 1584. Para este método empírico, as etapas dos cálculos foram desenvolvidas para cálculo da energia incidente do arco e a distância segura de aproximação, levando em conta o máximo de informações sobre os equipamentos de proteção, as características dos dispositivos de interrupção de arco e os dados construtivos próprios das instalações elétricas do local.

Obteve-se êxito na aplicação da linguagem orientada a objetos, visto que a elaboração da interface gráfica com o usuário, auxiliou na correta especificação da vestimenta, evitando erros em cálculos nas etapas do método e erros na especificação das vestimentas.

6.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

São propostas de continuidades deste trabalho:

- Implementar um método de cálculo para instalações de média e alta tensão, visto que o IEEE Std 1584-2002 limita a tensão em 15 kV;
- Estudar outros métodos para minimizar os efeitos causados por um arco elétrico.

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-SHELLPFEFFER, M. Catch the wave. **IEEE Industry Applications Magazine**. v. 10, n. 4, p. 59-67, jul./ago. 2004.

CADICK, John; CAPELLI-SHELLPFEFFER, M; NEITZEL, D. K. **Electrical safety handbook**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

DEHN INTERNATIONAL. **Personal protective equipment (PPE)**. Disponível em: <<https://www.dehn-international.com/en/personal-protective-equipment-ppe>>. Acesso em: 02 dez. 2017.

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-SHELLPFEFFER, 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 - CIGED**. 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. **Norma Regulamentadora n. 6 (NR-6), Equipamento de Proteção Individual – EPI**. Brasília, 2001.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **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. Disponível em: <<https://goo.gl/Bv5jTH>>. Acesso em: 02 dez. 2017.

SOUZA, R. F.; CARRARA, H; FINOCCHIO, M. A. F. Roupa de proteção contra queimaduras por arcos elétricos. In: **EXPO UTF 2009, UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**. Cornélio Procópio, Brasil: 2009.

UNIVERSIDADE DO PORTO. **Introdução à Programação e ao Visual Basic**. Disponível em: <<https://goo.gl/wgcR9t>>. Acesso em: 15 out. 2017.

APÊNDICE A

CÓDIGO IMPLEMENTADO PARA CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE, DISTÂNCIA DE SEGURANÇA E CLASSIFICAÇÃO DO RISCO CONTRA ARCOS ELÉTRICOS.

'Especificação da Vestimenta de Proteção Contra Arcos Elétricos

'LABSIEE - Laboratório de Segurança Iluminação e Eficiência Energética

'Paulo

'Última Atualização: 05 Dez 2017

Dim ibf As Double

Dim lgia As Double

Dim ia As Double

Dim k As Double 'Para corrente Ia: amb. aberto -0,153; fechado -0,097

Dim v As Double

Dim g As Double

Dim en As Double

Dim lgen As Double

Dim k1 As Double 'Para energia En:-0,792 amb. aberto; -0,555 amb. fechado

Dim k2 As Double '0 para sistema isolado/aterrado; -0,113 para solidamente aterrado

Dim cf As Double 'Fator de cálculo: para > 1kV -> 1,0; para < 1kV -> 1,5

Dim t As Double 'Tempo de atuação da proteção

Dim d As Double 'Distância típica de trabalho

Dim x As Double 'Fator x de cálculo

Dim aptv As Double

Dim risco As Double

Dim db As Double 'Distância segura calculada

```

Dim eb As Double 'energia incidente normalizada

Private Sub OptionButton1_Click()

Sheets("Etapas").Activate

End Sub

Private Sub Botao_comando_Click()

'Cálculo da Corrente do Arco Elétrico

ibf = TextBox1.Value

v = TextBox2.Value

k = TextBox3.Value

g = TextBox4.Value

'Corrente do Arco

If v < 1 Then 'Menor que 1 kV

    cf = 1.5

    If k = -0.153 Then 'ambiente aberto

        k1 = -0.792

        lgia = -0.153 + 0.662 * WorksheetFunction.Log10(ibf) + 0.0966 * v + 0.000526 * g + 0.5588 * v *
WorksheetFunction.Log10(ibf) - 0.00304 * g * WorksheetFunction.Log10(ibf)

        ia = (10 ^ lgia)

    ElseIf k = -0.097 Then 'ambiente fechado

        k1 = -0.555

        lgia = -0.097 + 0.662 * WorksheetFunction.Log10(ibf) + 0.0966 * v + 0.000526 * g + 0.5588 * v *
WorksheetFunction.Log10(ibf) - 0.00304 * g * WorksheetFunction.Log10(ibf)

        ia = (10 ^ lgia)

    End If

Else

    lgia = 0.00402 + 0.983 * WorksheetFunction.Log10(ibf) 'Para faixa de tensões 1 kV - 15 kV

    ia = (10 ^ lgia)

    cf = 1

```

```

End If

'TextBox5.Value = ia 'Exibe o valor calculado da corrente do arco, em kA

'Energia Incidente

'k1 = TextBox6.Value

k2 = TextBox7.Value

'cf = TextBox8.Value

t = TextBox24.Value

d = TextBox10.Value

x = TextBox11.Value

lgen = k1 + k2 + 1.081 * WorksheetFunction.Log10(ia) + 0.0011 * g

en = (10 ^ lgen) 'J/cm²

'Energia incidente normalizada (cal/cm²)

eb = 4.184 * cf * en * (t / 0.2) * (610 / d) ^ x

'Distância segura de aproximação (mm)

db = (4.184 * cf * en * (t / 0.2) * (610 ^ x / 5)) ^ (1 / x)

'Características das Roupas de Proteção

If eb > 3.99 Then

    If eb >= 40 Then

        risco = 4

    ElseIf eb > 25 Then

        risco = 3

    ElseIf eb > 8 Then

        risco = 2

    ElseIf eb >= 4 Then

        risco = 1

    End If

' ElseIf eb < 16.72 Then

```



```

'MsgBox "Não aplicável.", vbCritical, "Erro"

Else

risco = 0

MsgBox "RISCO 0: Verificar Tabela Características das Roupas de Proteção", vbCritical, "Erro"

End If

'End If

'TextBox13.Value = en

TextBox21.Value = Round(eb, 2)

TextBox22.Value = risco

TextBox23.Value = Round(db, 0) 'Distância segura

'TextBox17.Value = v * 100 'Tensão nominal

'TextBox18.Value = ibf * 1000 'Corrente Icc

'TextBox19.Value = t 'T interrupção

'TextBox25.Value = eb 'Exibe Energia Incidente Normalizada cal/cm2

End Sub

Private Sub UserForm_Initialize()

End Sub

Private Sub Frame1_Click()

End Sub

Private Sub ENCERRAR_Click()

End

End Sub

Private Sub Image1_Click()

End Sub

```