

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DIEGO SECCO DE QUADROS

**TRABALHO EM PAINÉIS ELÉTRICOS ENERGIZADOS:
O ESTUDO DE ENERGIA INCIDENTE BASEADO NAS
NORMAS NFPA 70E E IEEE 1584:2018**

Porto Alegre

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DIEGO SECCO DE QUADROS

**TRABALHO EM PAINÉIS ELÉTRICOS ENERGIZADOS:
O ESTUDO DE ENERGIA INCIDENTE BASEADO NAS
NORMAS NFPA 70E E IEEE 1584:2018**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. MSc. Igor Pasa Wiltuschnig

Porto Alegre

2019

DIEGO SECCO DE QUADROS

**TRABALHO EM PAINÉIS ELÉTRICOS ENERGIZADOS:
O ESTUDO DE ENERGIA INCIDENTE BASEADO NAS
NORMAS NFPA 70E E IEEE 1584:2018**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para Graduação em Engenharia Elétrica

Prof. MSc. Igor Pasa Wiltuschnig
Orientador - UFRGS

Aprovado em 11 de setembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich
UFRGS

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis
Loureiro
UFRGS

Agradecimentos

Primeiramente aos meus pais, João Carlos e Ariane, por todo incentivo, suporte e apoio incondicional fornecidos para minha formação profissional e acadêmica.

À minha noiva Rosane, pela compreensão, apoio e companheirismo em todos os momentos.

Ao engenheiro Eduardo pelos ensinamentos e colaboração técnica.

Ao professor e orientador MSc. Igor Pasa Wiltuschnig, pelos conselhos e orientação durante a elaboração deste trabalho.

Aos amigos e colegas que de alguma forma fizeram parte de minha formação.

"O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas serem o que são."

Aristóteles

Resumo

A energia incidente decorrente de arcos elétricos representa um dos maiores riscos ao executar serviços com eletricidade, principalmente em instalações elétricas de potência, e vem ganhando destaque nas principais normas sobre eletricidade nos últimos anos, que determinaram modelagem analítica e medidas de controle no sistema e para as pessoas de forma a amenizar os riscos envolvidos. Este trabalho descreve o fenômeno do arco elétrico, expondo suas características e riscos, analisa os principais métodos de cálculo para energia incidente segundo as normas IEEE 1584 e a NFPA 70E, apresentando os procedimentos e dispositivos de segurança para reduzi-la, sendo realizado um estudo de caso para uma subestação real, onde serão determinadas as vestimentas antichamas necessárias para mitigar os riscos de se trabalhar com os painéis energizados e serão propostas alterações de forma que se elimine ou reduza a necessidade das mesmas, sendo realizadas análises dos resultados, simulações e uma comparação entre as versões de 2002 e 2018 da norma IEEE 1584.

Palavras-chave: Energia Incidente. Arco Elétrico. Riscos. Eletricidade. Modelagem. Subestação. Vestimentas antichamas.

Abstract

The incident energy from electric arcs represents one of the greatest risks when performing electrical services, especially in power installations, and has been gaining prominence in key electricity standards in recent years, which have determined analytical modeling and control measures in the system and to people in order to mitigate the risks involved. This paper describes the electric arc phenomenon, exposing its characteristics and risks, analyzes the main calculation methods for incident energy according to IEEE 1584 and NFPA 70E standards, presenting the procedures and safety devices to reduce it, and a study of a case for a real substation, where the necessary flameproof clothing to mitigate the risks of working with energized panels will be determined and changes will be proposed in order to eliminate or reduce the need for them, where an analysis of the results and simulations are performed and a comparison between the 2002 and 2018 versions of the IEEE 1584 standard.

Keywords: Incident Energy. Electric Arc. Risks. Electricity. Modeling. Substation. Flameproof Clothing.

Lista de Figuras

Figura 1 – Incêndios e mortes por curto-circuito no Brasil em 2017, dividido por região.	14
Figura 2 – Ilustração dos componentes de um arco elétrico.	16
Figura 3 – Imagem de um arco ao ar livre.	19
Figura 4 – Imagem de um arco em ambiente enclausurado.	20
Figura 5 – Imagem de um arco em movimento.	21
Figura 6 – Imagem de um arco ejetado.	21
Figura 7 – Imagem de um arco rastreador.	22
Figura 8 – Comparação da energia incidente entre as configurações de eletrodo para painéis enclausurados e a norma IEEE 1584-2002.	25
Figura 9 – Comparação entre a corrente de arco reduzida em função da tensão nas versões de 2002 e 2018 da norma IEEE 1584.	26
Figura 10 – Diagrama de blocos para o método de cálculo de energia incidente. . .	28
Figura 11 – Diagrama de blocos para o método das categorias de EPI.	30
Figura 12 – Relação de tempo por temperatura para a tolerância da pele humana. .	31
Figura 13 – Percentual da superfície corporal para as partes do corpo humano. . .	32
Figura 14 – Exemplo de camisa antichamas, com indicação de categoria e ATPV. .	33
Figura 15 – Diagrama de blocos das etapas para o cálculo de energia incidente de acordo com a norma IEEE 1584.	39
Figura 16 – Princípio de funcionamento e foto de um relé detector de arco.	62
Figura 17 – Movimentação de disjuntor extraível com a porta fechada	63
Figura 18 – Sistema elétrico simplificado ao qual a subestação em análise pertence .	64
Figura 19 – Exemplo de topologia barra simples com disjuntor de interligação. . .	66
Figura 20 – Dados dos painéis em análise.	69
Figura 21 – Resultados obtidos no estudo de curto circuito trifásico de cada barramento.	70
Figura 22 – Valores da corrente de arco que flui pelo dispositivo de proteção, tempo de atuação e tempo de abertura das proteções.	71
Figura 23 – Valores da corrente de arco que flui pelo dispositivo de proteção, tempo de atuação e tempo de abertura das proteções considerando a corrente de arco reduzida.	72
Figura 24 – Resumo dos resultados do cálculo de energia incidente.	73
Figura 25 – Resultados obtidos com a utilização de relé de proteção contra arco elétrico.	74
Figura 26 – Comparação entre a energia incidente máxima em cada painel sem e com a utilização de relé de proteção contra arco elétrico.	75

Figura 27 – Resultados obtidos pela aplicação da norma IEEE 1584 versão de 2002.	76
Figura 28 – Comparação entre os resultados obtidos aplicando as metodologias de cálculo da versão de 2002 e 2018 da norma IEEE.	77

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Limitações dos métodos de cálculo.	28
Tabela 2 – Equipamentos de proteção necessários para cada categoria de EPI. . .	29
Tabela 3 – Exemplo de cada categoria de vestimenta antichamas.	34
Tabela 4 – Classe de equipamentos e distância mínima entre os condutores.	42
Tabela 5 – Configurações dos eletrodos.	43
Tabela 6 – Tipo de equipamento e distância de trabalho típica	44
Tabela 7 – Coeficientes para a determinação do fator de correção para o tamanho do invólucro.	51
Tabela 8 – Exemplo de cada categoria de vestimenta antichamas.	68

Lista de Abreviaturas e Siglas

ATPV	<i>Arc Thermal Performance Value</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCM	Centro de Controle de Motores
CDC	Centro de Distribuição de Cargas
EPI	Equipamento de Proteção Individual
HCB	Eletrodos Horizontais Enclausurados
HOA	Eletrodos Horizontais ao Ar Livre
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i>
NR	Norma Regulamentadora
PDU	Unidade de Distribuição de Energia
SI	Sistema Internacional
VCB	Eletrodos Verticais Enclausurados
VCBB	Eletrodos Verticais Enclausurados Terminados em uma Barreira Isolante
VOA	Eletrodos Verticais ao Ar Livre
UPS	Fonte de Alimentação Ininterrupta
WFR	<i>Wave form Recognition</i>
ZSI	<i>Zone Selective Interlocking</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	O Arco Elétrico	16
2.2	Tipos de Arco Elétrico	18
2.2.1	Arco ao Ar Livre	19
2.2.2	Arco em Ambiente Enclausurado	19
2.2.3	Arco em Movimento	20
2.2.4	Arco Ejetado	20
2.2.5	Arco Rastreador	21
2.3	A Norma Brasileira	22
2.4	IEEE 1584	24
2.5	Comparação entre as versões de 2002 e 2018 da norma IEEE 1584	24
2.6	NFPA 70E	26
2.6.1	Método 1 - o estudo de energia incidente	27
2.6.2	Método 2 - as categorias de EPI	28
2.7	A queimadura de terceiro grau	30
2.8	As Vestimentas de Proteção	31
3	METODOLOGIAS DE CÁLCULO	35
3.1	Método de Ralph Lee	35
3.1.1	Equações Básicas	35
3.1.2	Cálculo da energia incidente	36
3.2	Método de Doughty e Neal	36
3.3	Método da IEEE 1584:2018	38
3.3.1	Etapa 1: coleta de dados da instalação e do sistema	38
3.3.2	Etapa 2: Determinar os modos de operação do sistema	40
3.3.3	Etapa 3: Determinar a corrente de falta franca	40
3.3.4	Etapa 4: Determinar o espaçamento típico e tamanho do invólucro com base nas tensões do sistema e nas classes dos equipamentos	41
3.3.5	Etapa 5: Determinar a configuração dos eletrodos do equipamento	41
3.3.6	Etapa 6: Determinar a distância de trabalho	42
3.3.7	Etapa 7: Determinar a corrente do arco elétrico	44
3.3.7.1	Cálculo da corrente de arco elétrico para tensões entre 600 V e 15000 V	45
3.3.7.2	Cálculo da corrente de arco elétrico para tensões entre 208 V e 600 V	46
3.3.8	Etapa 8: Determinar a duração do arco elétrico	46

3.3.9	Etapa 9: Calcular a energia incidente	48
3.3.9.1	Determinação da Largura e Altura equivalentes	49
3.3.9.2	Determinação do tamanho equivalente do invólucro e fator de correção pelo tamanho do invólucro	50
3.3.9.3	Determinação da energia incidente	51
3.3.10	Etapa 10: Determinar a distância segura de aproximação	53
3.3.11	Fator de correção da corrente de arco	55
3.4	Método de Doan	56
4	MÉTODOS E DISPOSITIVOS PARA REDUÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE	58
4.1	Diminuição do tempo de eliminação da falta	58
4.2	Diminuição da magnitude da corrente de falta	59
4.3	Utilização de relés monitores de arco	59
4.3.1	Sensores de Luminosidade	60
4.3.2	Unidade de Processamento	60
4.3.3	Segurança em projeto, montagem, comissionamento, operação e manutenção	62
5	ESTUDO DE CASO	64
5.1	Características gerais da planta	66
5.2	Configuração dos eletrodos	67
5.3	Características dos painéis	67
5.4	Estudo de curto-circuito	68
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
6.1	Resultados Obtidos	71
6.2	Análise dos resultados sugestões para redução dos níveis de energia incidente	73
6.3	Resultado obtido com a aplicação da versão de 2002 da norma IEEE 1584 e comparação com o resultado da versão de 2018	75
7	CONCLUSÕES	78
	REFERÊNCIAS	80
	ANEXOS	83
	ANEXO A – UNIFILAR	84
	ANEXO B – TABELAS 1 A 6 DA NORMA IEEE-1584 (2018).	86

1 Introdução

Energia incidente é a quantidade de energia térmica impressa em uma superfície, a uma dada distância da fonte, gerada durante a ocorrência de um arco elétrico. A quantificação desta energia, geralmente em cal/cm^2 , dá-se através de um estudo e é fundamental para a determinação da proteção adequada para se trabalhar próximo a circuitos elétricos energizados.

Estudos sobre arcos elétricos e seus riscos ganharam relevância no início década de 80, tendo a primeira modelagem matemática consistente para energia incidente publicada por Lee (1982), em seu trabalho *The other electrical hazard: electric arc blast burns*, sendo abordados na norma NFPA 70E de 1995, que trouxe o conceito de limites de aproximação e arco e em 2002 foi publicada a norma IEEE 1584, que foi um grande marco para o estudo de energia incidente, definindo as principais grandezas de influência na corrente de arco e energia do arco utilizando métodos estatísticos e através de ajuste de curvas, tendo sua última revisão publicada em novembro de 2018. (MARDEGAN; PARISE, 2018a)

A norma brasileira que aborda arcos elétricos é a NR-10, formulada em 2004, que estipula alguns parâmetros de proteção e determina a obrigatoriedade do estudo de energia incidente ao exigir o provimento de vestimentas adequadas para o trabalho com eletricidade, segundo Mardegan e Parise (2018a). As metodologias de cálculo de energia incidente mais comumente utilizadas são as estipuladas nos padrões americanos NFPA 70E e IEEE 1584, que determinam um valor de performance para arcos térmicos, conhecido pela sigla ATPV, do termo em inglês *Arc Thermal Performance Value*, expresso em calorias por centímetro quadrado, para a proteção necessária que deve ser conferida pelo tecido ao trabalhador possivelmente exposto a um arco elétrico. (BATISTA, 2017)

Os acidentes de origem elétrica estão crescendo ano após ano no Brasil, havendo um aumento de 33,6% nos acidentes fatais e não fatais entre os anos de 2013 e 2017. No Rio Grande do Sul, houve uma relação de 3,3 acidentes fatais por milhão de habitantes em 2017, onde os estados que apresentaram a pior relação foram os da região nordeste, chegando a 9,63 acidentes fatais por milhão de habitantes no estado de Alagoas, porém, ao se considerar apenas os acidentes gerados por curto-circuito, que representam em média 35% dos acidentes de origem elétrica, a região sul se destaca por apresentar mais do que o dobro de mortes do que as outras regiões, conforme pode ser visto na Figura 1. (ABRACOPEL, 2018)

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar os conceitos de arco elétrico e energia incidente, suas metodologias de cálculo com base nas principais normas sobre o tema e os dispositivos de proteção existentes, para então fazer o estudo de caso com

Figura 1 – Incêndios e mortes por curto-circuito no Brasil em 2017, dividido por região.



Fonte: adaptado de Abracopel (2018).

base em uma subestação real, determinando os EPIs, equipamento de proteção individual, necessários para se trabalhar nela e propondo modificações para redução do nível de energia incidente da mesma, realizando simulações para comprovar sua eficácia.

Como metodologia, inicialmente será feita uma revisão bibliográfica sobre o tema, baseado em artigos acadêmicos, normas técnicas nacionais e internacionais e artigos de revistas e sites, possibilitando descrever o fenômeno, com seus riscos envolvidos, modelagem matemática e possibilidade de mitigação dos riscos. Para o cálculo de energia incidente é necessário determinar os parâmetros de curto-circuito de toda instalação, que pode ser feito com auxílio de software tendo-se os dados de cabos, motores, transformadores e outros componentes que fazem parte do sistema, obtendo assim a corrente de falta em todos seus pontos. Após determinar os níveis energia incidente, são verificadas formas para redução do tempo de atuação das proteções onde estes níveis são críticos, respeitando sua coordenação e seletividade, de forma a reduzir a magnitude da energia incidente, visto que esta é proporcional ao tempo de atuação das proteções.

A estrutura do trabalho é dividida da seguinte forma:

No capítulo 2 será apresentada a revisão bibliográfica, abordando os conceitos de arco elétrico e energia incidente, as principais normas sobre o tema, os riscos inerentes ao arco elétrico e também os EPIs que podem ser utilizados pelos trabalhadores, de forma a mitigar estes riscos.

O capítulo 3 trata das formas de cálculo de energia incidente baseado nos padrões NFPA 70E e IEEE 1584, apresentando a modelagem envolvida, com todo seu equacionamento.

No capítulo 4 serão apresentadas alguns métodos e dispositivos para a redução da energia incidente.

No capítulo 5 será feito o estudo de caso, baseado em uma subestação real de uma planta industrial, onde são descritas suas características, modos de operação e particularidades do sistema elétrico da planta.

No capítulo 6 serão apresentados os resultados obtidos, determinando o nível de energia incidente e o ATPV necessário para as vestimentas de proteção e avaliando possibilidades de alteração para que este nível seja reduzido.

O capítulo 7 traz conclusões gerais sobre o trabalho e seus resultados.

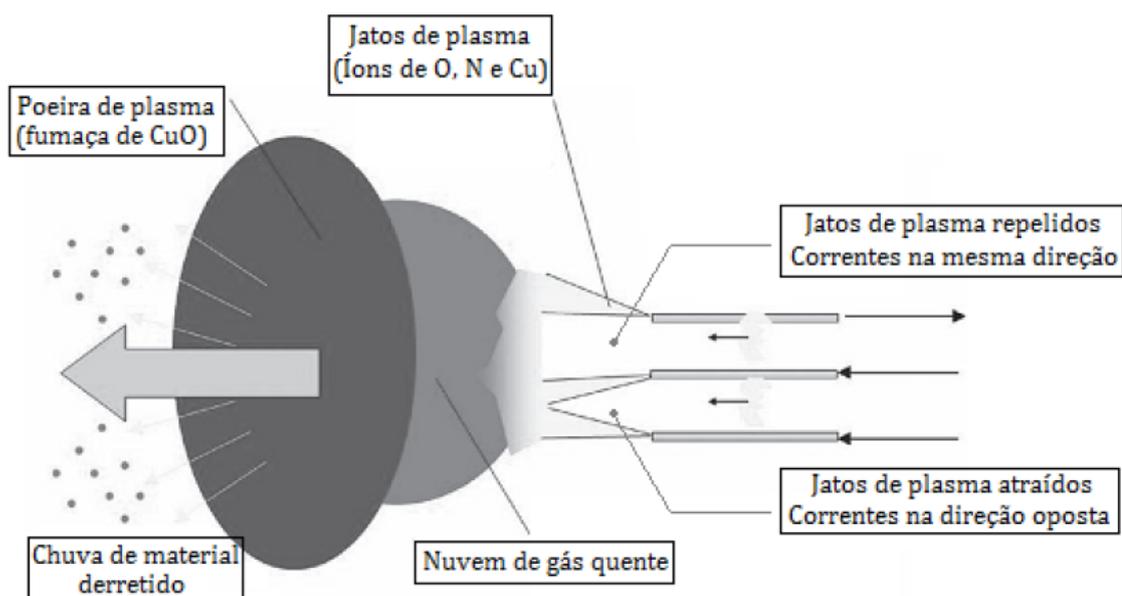
2 Revisão Bibliográfica

2.1 O Arco Elétrico

Arco elétrico é o resultado da ruptura dielétrica do ar ou outro meio isolante e é uma das maiores e mais intensas fonte de calor do planeta, podendo chegar à temperatura de 20000°C, que é quatro vezes maior do que a temperatura na superfície do sol, e causar queimaduras fatais a até 1,5 metros de distância e queimaduras graves a até 3 metros do local da ocorrência do arco. (LEE, 1982)

Além do risco de queimadura, as altas temperaturas produzidas pelos arcos elétricos causam a vaporização dos materiais próximos de onde ele ocorre, podendo causar a liberação de vapores tóxicos e a projeção de metal fundido, uma geração de luz muito intensa que pode causar cegueira e, associadas as altas temperaturas, o ressecamento do globo ocular, um estampido que pode exceder 160 decibéis no momento em que ocorre a ruptura do dielétrico, prejudicando temporariamente a audição e uma onda de pressão devido à expansão instantânea do ar e dos metais condutores próximos, gerada pelo grande aumento de temperatura em um espaço muito curto de tempo, podendo causar ferimentos por queda e colisão (LEE, 1987). A Figura 2 ilustra de modo simplificado o comportamento de um arco elétrico.

Figura 2 – Ilustração dos componentes de um arco elétrico.



Fonte: adaptado de Lang e Jones (2015).

Os arcos elétricos geralmente estão associados a curtos-circuitos, podendo ser entre fases ou fase-terra, sendo este último o mais comum, representando 79% das ocorrências segundo Kindermann (1992), e possuem grande potencial para evoluir para um curto-circuito trifásico, que se comporta de maneira caótica, variando rapidamente sua geometria e de forma irregular, devido à convecção, aos jatos de plasma e às forças eletromagnéticas, dificultando sua modelagem.

Após a ocorrência do arco elétrico, este é mantido sobre os vapores dos materiais que estão sendo consumidos, provocando uma queda de tensão na ordem de 30 a 40 V/cm, portanto, o comprimento do arco elétrico pode chegar a 2,5 cm para cada 100 V da fonte, antes que a impedância do circuito limite ou regule a corrente de falta. Como o trajeto do arco é por um meio com alta resistência, seu fator de potência é unitário. (QUEIROZ; SENGER, 2012a)

Em circuitos de baixa tensão, a queda de tensão entre 30 e 40 V/cm consome uma parcela substancial da tensão disponível, deixando somente a diferença entre a tensão da fonte e a tensão do arco para forçar a corrente de falta através da impedância total do sistema. Por esta razão ocorre, de certa forma, uma estabilização na corrente de falta em circuitos de até 480 V, onde o comprimento do arco é da ordem de 10 cm. (LEE, 1982)

Com o intuito de proteger as pessoas dos riscos envolvendo arcos elétricos, é realizado um estudo de energia incidente, que é definida na NFPA-70E (2018) como a quantidade de energia impressa em uma superfície, a certa distância da fonte, gerada durante um evento de arco elétrico. O estudo de energia incidente deve ser elaborado de forma integrada ao de curto-circuito e de seletividade, pois leva em consideração a corrente de falta franca, que é a corrente de um curto-circuito que assume impedância zero no ponto da falta, e o tempo de atuação das proteções.

As formas mais comuns para a redução da energia incidente são a redução do tempo para eliminação da falta, redução da magnitude da corrente de falta, evitar o escalonamento de um arco monofásico para um trifásico e a utilização de relés detectores de arco elétrico. (MARDEGAN; PARISE, 2018a)

O risco de queimadura é aumentado substancialmente pela ignição das vestimentas do trabalhador, por isto, vestimentas para proteção contra agentes térmicos devem ser utilizadas nas atividades sujeitas a elevada energia incidente por arco elétrico, que, segundo Queiroz e Senger (2012a), em geral consistem em:

- Trabalho em circuitos de potência energizados com tensão superior a 120 V;
- Inserção e remoção de gavetas, contadores e disjuntores com a porta do painel aberta;
- Operação de contadores, disjuntores, chaves seccionadoras, gavetas e chaves-fusíveis com a porta do painel aberta;

- Trabalho com circuito energizado para pesquisa de defeitos, inclusive durante a execução de medições, como por exemplo, utilizando um multímetro;
- Instalação do conjunto de aterramento temporário após o teste de tensão;
- Remoção de coberturas aparafusadas que exponham partes energizadas;
- Operação da manopla da chave comutadora do transformador de corrente que alimenta os amperímetros;
- Abertura de coberturas com dobradiças que exponham barramentos ou partes energizadas;
- Abertura de compartimentos de transformadores de potencial;
- Atividades de termografia com a porta do painel aberta.

Devido à gama extremamente ampla de calor gerado por arcos elétricos, o uso de vestimenta antichama sozinho não garante proteção absoluta contra queimaduras na pele. Os principais fatores que podem afetar a quantidade de energia térmica dissipada são (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017):

- Tipo de arco;
- Corrente de falta;
- Tempo de duração do arco;
- Distância do arco.

2.2 Tipos de Arco Elétrico

Segundo Golovkov, Schau e Burdge (2017), existem 5 tipos de arco elétrico: arco ao ar livre, arco em ambiente enclausurado, arco em movimento, arco ejetado e arco rastreador. Esta classificação baseia-se em vários fatores, como a configuração geométrica dos eletrodos, a forma do arco, se o arco ocorre em compartimento fechado ou ao ar livre e se a dissipação de calor predominante é radiante ou convectiva, arco estacionário ou móvel, a tensão nominal de instalação elétrica, e se faz contato com partes energizadas ou de descarga de tensão.

2.2.1 Arco ao Ar Livre

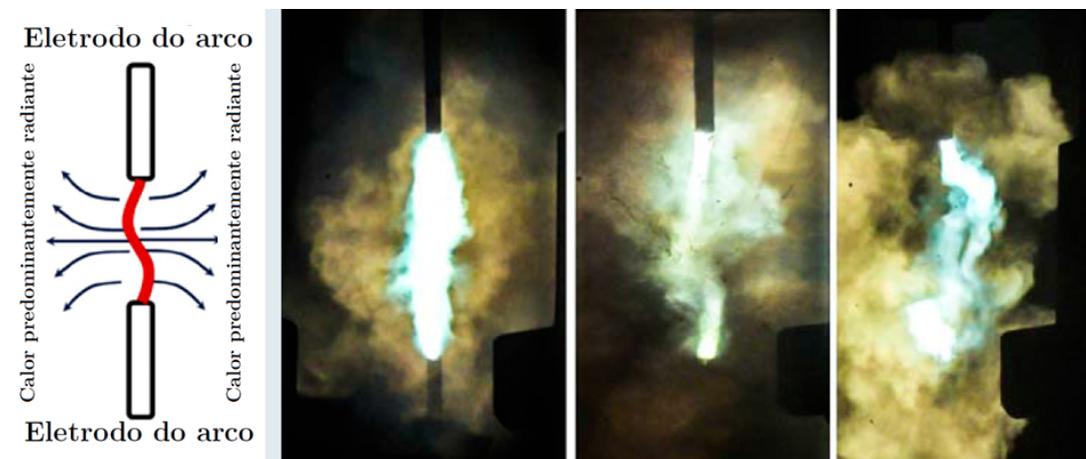
O arco ao ar livre ocorre em média ou alta tensão, sem enclausuramento ao redor do arco e a geometria linear do eletrodo não gera interação eletromagnética entre a corrente fluindo nos eletrodos e a corrente no plasma do arco elétrico, o que forçaria o canal de plasma para fora da lacuna entre os condutores.

O arco ao ar livre é estável e irá durar até que o dispositivo de proteção interrompa a falta. O formato do canal de plasma pode ser descrito como um cilindro. A energia térmica é dissipada igualmente em todas as direções predominantemente através da luz irradiada.

A maioria dos métodos de teste para equipamentos e vestimentas de proteção de proteção utilizam o arco ao ar livre.

A Figura 3 mostra um arco ao ar livre e indica sua propagação e calor predominante. Também é possível visualizar a vaporização dos materiais próximos e a condução de corrente pelo metal vaporizado, alterando o caminho do arco, que inicialmente é uma linha reta e posteriormente percorre um caminho mais disperso.

Figura 3 – Imagem de um arco ao ar livre.



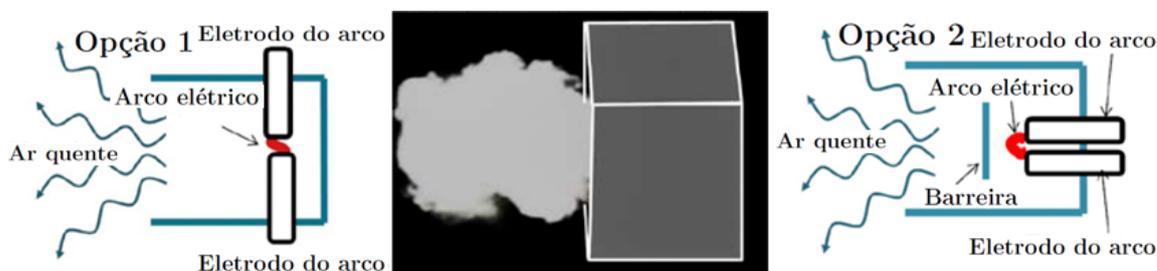
Fonte: adaptado de Golovkov, Schau e Burdge (2017).

2.2.2 Arco em Ambiente Enclausurado

Este tipo de arco ocorre em baixa tensão, é estável e a energia térmica é dissipada através da luz irradiada e principalmente como calor convectivo do ar muito quente que é emitido da caixa e é concentrado em uma direção através da porta que está aberta ou quebrada. Os eletrodos do arco podem estar alinhados ou paralelos com um pequeno espaço entre eles, conforme pode ser observado na Figura 4.

O arco em ambiente enclausurado é o tipo mais comum em ambiente industrial e costuma ocorrer em painéis, centro de controle de motores (CCM), equipamentos de controle, caixa de fusível, comutadores e medidores elétricos.

Figura 4 – Imagem de um arco em ambiente enclausurado.



Fonte: adaptado de Golovkov, Schau e Burdge (2017).

2.2.3 Arco em Movimento

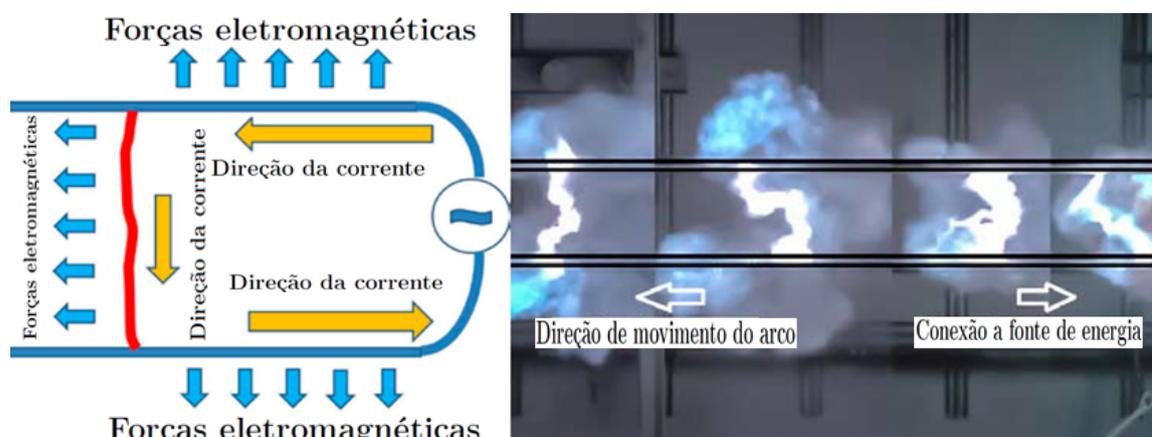
O arco em movimento ocorre em média ou alta tensão e ao ar livre, se propagando entre dois condutores em paralelo, a corrente do arco flui através do canal de plasma ionizado e interage eletromagneticamente com as correntes de falta fluindo no condutor, o que força o canal de plasma a se mover ao longo do condutor na direção oposta à fonte de energia, conforme pode ser observado na Figura 5.

Este tipo de arco pode iniciar com um descarga ou quebra de isolamento em linhas de transmissão ou barramentos de subestações, a dissipação de energia térmica é igual em todas as direções e se comporta de forma semelhante ao arco ao ar livre, exceto pelo fato da fonte de luz irradiada estar se movendo a uma velocidade que pode superar os 160 km/h, o que potencialmente reduz o tempo de exposição quando um trabalhador está ao lado da linha (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).

2.2.4 Arco Ejetado

O arco ejetado ocorre em média ou alta tensão e é formado nas pontas de condutores ou eletrodos paralelos. Um exemplo de formação de arco ejetado é quando o arco móvel atinge o final de longos condutores paralelos. Como em um arco móvel, a corrente do arco ejetado flui através do canal de plasma ionizado e interage eletromagneticamente com as correntes de falta fluindo nos condutores, forçando o canal de plasma do arco para fora do espaço entre os condutores, alongando o canal e mudando sua forma para quase um círculo, conforme pode ser observado na Figura 5. O arco ejetado é alongado na direção de uma continuação imaginária de eletrodos de arco paralelo e a correspondente dissipação da energia térmica é geralmente direcional.

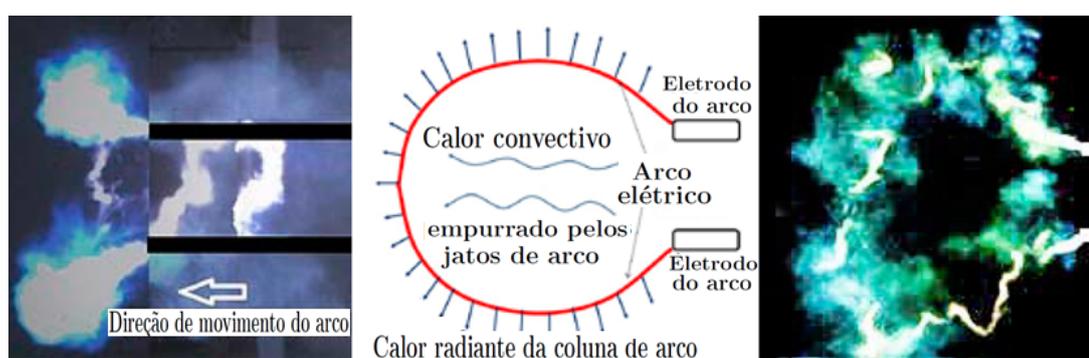
Figura 5 – Imagem de um arco em movimento.



Fonte: adaptado de Golovkov, Schau e Burdge (2017).

Tanto o componente de energia radiante do canal de plasma quanto o componente de calor convectivo reforçado pelos jatos de arco das pontas de eletrodo são fortes, podendo incendiar roupas a 2,1 metros de distância, o que faz desse tipo de arco o mais perigoso por submeter uma grande área do corpo a temperaturas extremamente altas, embora não seja o mais comum (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).

Figura 6 – Imagem de um arco ejetado.



Fonte: adaptado de Golovkov, Schau e Burdge (2017).

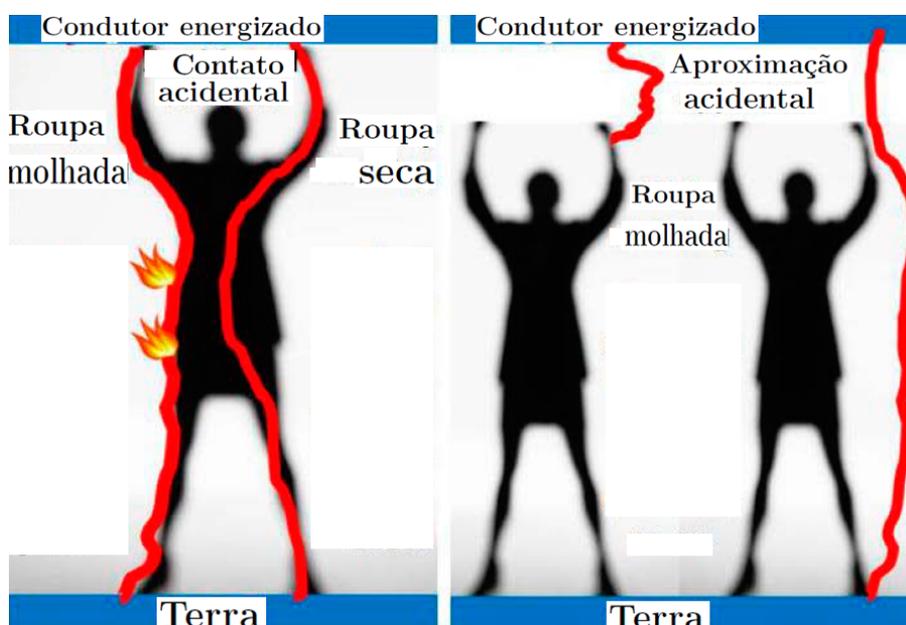
2.2.5 Arco Rastreador

O arco rastreador pode ocorrer na superfície da pele do trabalhador, sob suas roupas, como resultado da aproximação ou do contato direto ou indireto com uma parte energizada, apresentando também o risco de eletrocussão, além dos riscos do próprio arco elétrico. Neste tipo de arco, a corrente elétrica flui através do ar, formando o arco elétrico até o corpo do trabalhador, e deste até o ponto de terra, fluindo pela superfície do corpo e

causando a ignição das roupas, caso este esteja molhado, ou pelo seu interior causando choque elétrico, caso o corpo e as roupas estejam secas. O evento do arco começa como uma descarga ou como um arco elétrico, e irá se manter como um arco elétrico pelo ar ionizado (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).

A Figura 7 exemplifica, na imagem da esquerda, o percurso superficial da corrente elétrica no corpo se a vítima estiver com as roupas molhadas e o percurso por dentro do corpo caso a vítima esteja seca. A imagem da esquerda ilustra que mesmo sem o contato direto com o condutor energizado, a corrente elétrica pode encontrar um caminho para o corpo da vítima com as roupas molhadas, através de um arco elétrico.

Figura 7 – Imagem de um arco rastreador.



Fonte: adaptado de Golovkov, Schau e Burdge (2017).

2.3 A Norma Brasileira

No Brasil, a principal norma que trata sobre os requisitos mínimos de segurança em trabalhos envolvendo eletricidade é a Norma Regulamentadora número 10, ou simplesmente NR-10, que entrou em vigor em 1978 e teve sua primeira revisão em 1983, onde nestas duas primeiras versões, estava focada na mitigação dos riscos de choque elétrico, sendo que nesta época os primeiros estudos sobre arco elétrico ainda estavam sendo elaborados mundialmente. (QUEIROZ; SENGER, 2012a)

Em 2004 houve uma nova revisão da NR-10, que definiu as diretrizes básicas para a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos destinados a garantir a

segurança e a saúde dos trabalhadores, impondo novas regras para todos os indivíduos que interagem direta ou indiretamente em instalações elétricas e serviços com eletricidade. Porém, a NR-10 não aborda a proteção a arco elétrico diretamente, apesar de o assunto estar previsto no conteúdo programático de seu treinamento básico, seus riscos são tratados de maneira implícita nos demais itens da norma, como o item 10.3.9.a, por exemplo:

10.3.9 O memorial descritivo do projeto deve conter, no mínimo, os seguintes itens de segurança:

a) especificação das características relativas à proteção contra choques elétricos, queimaduras e outros riscos adicionais. (MTPS, 2016)

Portanto, por ser considerado um agente térmico e ter a queimadura como principal risco, o arco elétrico deve ser estudado e ter suas consequências mitigadas e descritas nessa etapa do memorial. (QUEIROZ; SENGER, 2012a)

No item 10.12.1, citado abaixo, os riscos envolvendo arco elétrico e seus cenários acidentais possíveis devem ser considerados para elaboração do plano de emergência.

10.12.1 As ações de emergência que envolvam as instalações ou serviços com eletricidade devem constar do plano de emergência da empresa. (MTPS, 2016)

E, por fim, para atender o item 10.2.9.2, é necessário o estudo de energia incidente para determinar a vestimenta adequada com relação à inflamabilidade, que apesar de não estabelecer metodologia para seus cálculos, o item 10.1.2 menciona a utilização das normas internacionais cabíveis, onde, segundo Queiroz e Senger (2012a), as mais relevantes e utilizadas sobre o tema são os padrões norte-americanos IEEE 1584 e a NFPA 70E. Abaixo estão citados os itens 10.2.9.2 e 10.1.2 da NR-10.

10.2.9.2 As vestimentas de trabalho devem ser adequadas às atividades, devendo contemplar a condutibilidade, inflamabilidade e influências eletromagnéticas. (MTPS, 2016)

10.1.2 Esta NR se aplica às fases de geração, transmissão, distribuição e consumo, incluindo as etapas de projeto, construção, montagem, operação, manutenção das instalações elétricas e quaisquer trabalhos realizados nas suas proximidades, observando-se as normas técnicas oficiais estabelecidas pelos órgãos competentes e, na ausência ou omissão destas, as normas internacionais cabíveis. (MTPS, 2016)

Porém, de acordo com (MARDEGAN; PARISE, 2018a), uma diferença relevante do ponto de vista jurídico entre a NFPA 70E e a NR-10 é que na NFPA 70E, caso ocorra um acidente onde todas as exigências tenham sido atendidas e os requisitos cumpridos, entende-se que houve uma fatalidade, já que muitas das informações sobre arcos elétricos são obtidas de forma empírica e também de forma estatística, já a NR-10 não considera esta possibilidade.

2.4 IEEE 1584

A norma IEEE 1584, denominada *Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*, ou Guia para Executar Cálculos de Risco de Energia Incidente, em português, teve sua primeira publicação em 2002 e foi um grande marco, pois os métodos propostos por Lee (1982) conduziam em valores de energia incidente muito altos, resultando em vestimentas desconfortáveis e que limitavam o trabalhador. Devido à natureza instável do arco, utilizou-se de métodos estatísticos para obter as equações das grandezas que influenciam a corrente e a energia do arco, através de ajuste de curva (MARDEGAN; PARISE, 2018a).

Tendo sua última revisão publicada em novembro de 2018, a norma IEEE 1584 é um guia que fornece técnicas para determinação da distância segura para o risco de arco elétrico e energia incidente durante o desenvolvimento de atividades realizadas em um equipamento elétrico ou nas proximidades de um sistema energizado e é aplicável em sistemas que possuam as seguintes características (IEEE-1584, 2018):

- Tensão de linha trifásica entre 208 V e 15000 V;
- Frequência de 50 Hz a 60 Hz;
- Corrente de falta, em valor eficaz simétrico:
 - entre 208 V e 600 V: de 500 A a 106000 A;
 - entre 601 V e 15000 V: de 200 A a 65000 A.
- Espaçamento entre condutores:
 - entre 208 V e 600 V: de 6,35 mm a 76,2 mm;
 - entre 601 V e 15000 V: de 19,05 mm a 254 mm.
- Distância de trabalho maior ou igual a 305 mm.

2.5 Comparação entre as versões de 2002 e 2018 da norma IEEE 1584

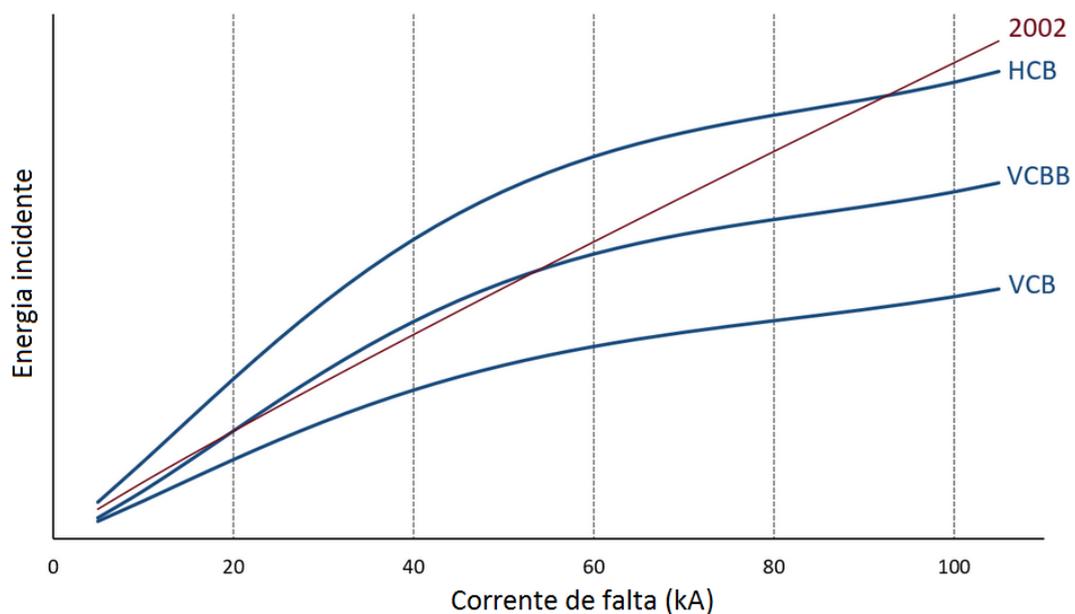
A revisão de 2018 da norma IEEE 1584 trouxe diversas mudanças em relação a revisão original, publicada em 2002 e que permaneceu quase inalterada, recebendo apenas pequenos ajustes em 2004 e 2011. Depois de analisar mais de 1800 testes, o grupo de trabalho da norma IEEE 1584 construiu um novo modelo de arco voltaico. As fórmulas derivadas empiricamente no novo modelo são significativamente mais precisas, embora igualmente mais complexas do que as de seu antecessor.

A forma de cálculo, que era linearizada através de uma equação para baixa tensão e outra para média tensão, foi substituída por um método de interpolação para nível de tensão desejado, utilizando as equações geradas pelos testes realizados em 600 V, 2700 V e 14300 V.

Foram incluídos novos fatores que influenciam na energia incidente, como a posição dos eletrodos onde seria possível a ocorrência de arco elétrico e a tamanho do invólucro, através da aplicação um fator de correção com base na tensão do sistema, na configuração do eletrodo, na altura do invólucro, na largura do invólucro e na profundidade do invólucro. Já o aterramento do sistema não é mais considerado com base em novos resultados de testes onde este não mostrou impacto significativo.

Para painéis enclausurados, as posições dos eletrodos onde seria possível a ocorrência de arco elétrico são: eletrodos verticais enclausurados (VCB), eletrodos verticais enclausurados terminados em uma barreira isolante (VCBB) ou eletrodos horizontais enclausurados (HCB). Uma comparação entre a energia incidente em função da corrente de falta, resultante da aplicação das equações destas configurações de eletrodo e a equação da norma IEEE 1584-2002 pode ser observada na Figura 8.

Figura 8 – Comparação da energia incidente entre as configurações de eletrodo para painéis enclausurados e a norma IEEE 1584-2002.

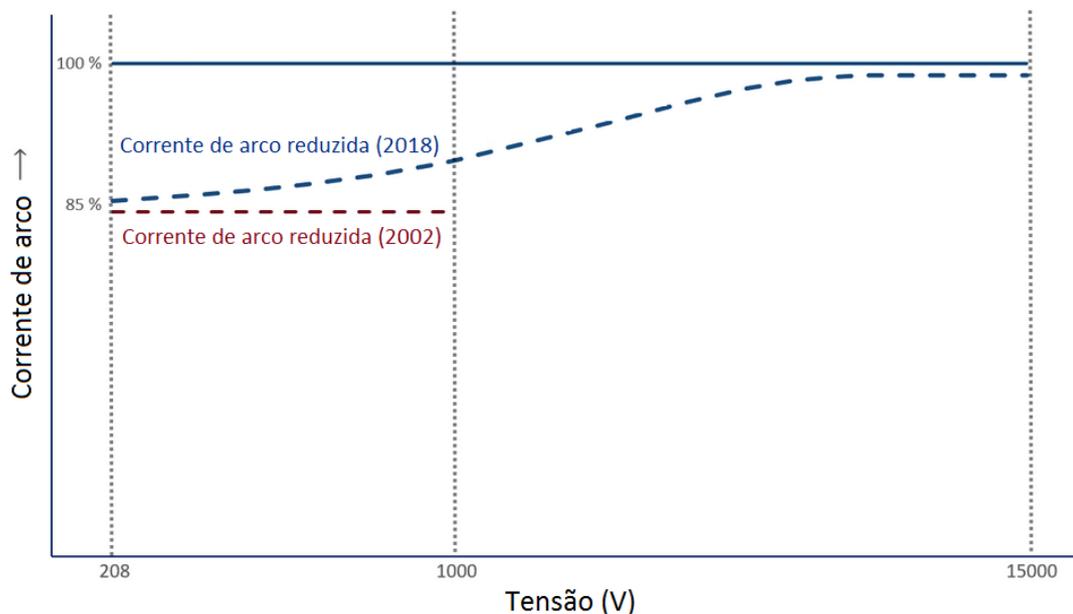


Fonte: adaptado de Easy Power (2019).

A nova forma de cálculo continua considerando as correntes de arco reduzidas e sua capacidade de aumentar o tempo de atuação das proteções, mas, o que antes era uma redução fixa de 15% aplicada apenas em sistemas de baixa tensão, foi revisada para uma

redução que varia com base na tensão e é aplicada para toda a faixa de aplicação da norma, conforme pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 – Comparação entre a corrente de arco reduzida em função da tensão nas versões de 2002 e 2018 da norma IEEE 1584.



Fonte: adaptado de Easy Power (2019).

Na versão de 2002, havia uma recomendação explícita de que em equipamentos abaixo de 240 V alimentados por um transformador de menos de 125 kVA não era necessário realizar o estudo de energia incidente. A norma revisada indica que a sustentabilidade pode ocorrer, mas é menos provável em 240 V ou menos quando a corrente de falta franca é menor que 2000 A. (IEEE-1584, 2018)

2.6 NFPA 70E

A norma NFPA 70E, intitulada *Standard for Electrical Safety in the Workplace* ou, em português, Padrão para Segurança Elétrica no Local de Trabalho, teve sua primeira edição publicada em 1979, visando estabelecer práticas de segurança para a proteção dos trabalhadores envolvidos em serviços com eletricidade. Na sua quinta edição, em 1995, foi incluído pela primeira vez o conceito de arco elétrico e limite de aproximação, na sua sexta edição, em 2000, foram incluídos os EPIs para proteção contra arco elétrico e na sua sétima edição, em 2004, o método de cálculo para energia incidente da norma IEEE 1584 foi aceito e incluso (MARDEGAN; PARISE, 2018a). A última revisão deste padrão é a de 2018 e introduziu fatores humanos, como o erro humano, na avaliação dos riscos.

A NFPA 70E dispõe que o arco elétrico pode existir quando condutores energizados ou partes de um circuito são expostos, ou então quando estão em um local fechado mas há alguém interagindo com o equipamento, dispõe ainda que sob condições normais de funcionamento, os equipamentos instalados em ambientes fechados, que tenham sido corretamente instalados e mantidos, não são suscetíveis de causar um arco elétrico.

A norma também dispõe que uma análise do risco de arco elétrico deve ser realizada para determinar o limite de aproximação seguro, a energia incidente a uma determinada distância de trabalho e os EPIs que os trabalhadores devem utilizar (QUEIROZ; SENGER, 2012b), e oferece duas opções de métodos para seleção da vestimenta adequada e demais EPIs que devem ser usados ao executar uma atividade dentro de uma região com risco de arco elétrico: o estudo de energia incidente ou as categorias de EPI.

2.6.1 Método 1 - o estudo de energia incidente

O estudo de energia incidente ao qual o trabalhador estará exposto, expresso em calorias por centímetro quadrado, cal/cm^2 , deve ser calculado conforme os métodos dispostos no anexo D e formalmente documentado pelo proprietário do equipamento elétrico. Este método é baseado na distância em entre a face e a região torácica do trabalhador e o possível ponto de origem do arco, de acordo com o trabalho que será realizado, onde as vestimentas antichamas que devem ser utilizadas serão determinadas pelo nível de energia incidente calculado, e os tipos de EPI necessários conforme constam na tabela 130.5(G), que se dividem em dois níveis, um entre $1,2 \text{ cal}/\text{cm}^2$ e $12 \text{ cal}/\text{cm}^2$ e outro acima de $12 \text{ cal}/\text{cm}^2$.

O anexo D da NFPA 70E sugere, de maneira resumida, quatro metodologias para o cálculo de energia incidente propostas por: Lee (1982), em *The other electrical hazard: electric arc blast burns*, Doughty, Neal e Floyd (2000), em *Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600-V power distribution systems*, IEEE-1584 (2018), na norma IEEE 1584 *Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations* e Doan (2010), em *Arc Flash Calculations for Exposures to DC Systems*. Cabe ressaltar que os anexos da NFPA 70E não fazem parte das exigências da norma e constam apenas em caráter informativo.

Cada metodologia possui suas limitações e a escolha de qual utilizar deve ser tomada com base nas características do circuito que está sendo analisado. A Tabela 1 mostra as limitações de cada método e a Figura 10 apresenta o diagrama de blocos para a metodologia de cálculo de energia incidente.

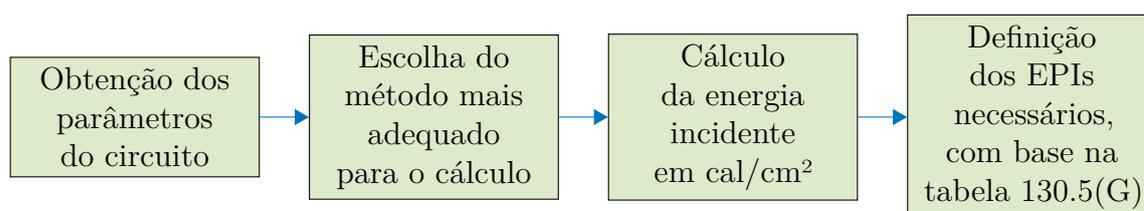
Segundo a NFPA 70E, análise de energia incidente deve ser atualizada sempre que houver mudança no sistema elétrico que possa alterar o resultado da análise ou revisada em intervalos que não excedam 5 anos.

Tabela 1 – Limitações dos métodos de cálculo.

Autor/Fonte	Limitações/Parâmetros
Ralph Lee	Calcula a energia incidente para arcos em sistemas trifásicos em ambiente aberto para instalações acima de 600 V. Torna-se mais conservador conforme a tensão aumenta.
Doughty	Calcula a energia incidente para arcos em sistemas trifásicos com tensão nominal igual ou inferior a 600 V. Aplica-se para correntes de curto-circuito entre 16 kA e 50 kA.
IEEE 1584	Calcula a energia incidente e a distância segura de aproximação para instalações com as seguintes características: tensão entre 208 V e 15.000 V, sistema trifásico, frequência de 50 Hz a 60 Hz, corrente de curto-circuito de 700 A a 106 kA, espaçamento entre condutores de 13 mm a 152 m.
Doan	Calcula a energia incidente para sistemas em corrente contínua de até 1 kV.

Fonte: adaptado de NFPA-70E (2018).

Figura 10 – Diagrama de blocos para o método de cálculo de energia incidente.



2.6.2 Método 2 - as categorias de EPI

O método das categorias de EPI é baseado na aplicação das tabelas 130.7(C)(15)(a), para corrente alternada (CA) e 130.7(C)(15)(b), para corrente contínua (CC), disponíveis na norma, onde a categoria da proteção contra arco elétrico necessária é determinada baseando-se em alguns parâmetros do circuito, como tensão máxima de falta, tempo máximo de atuação das proteções e distância mínima de trabalho.

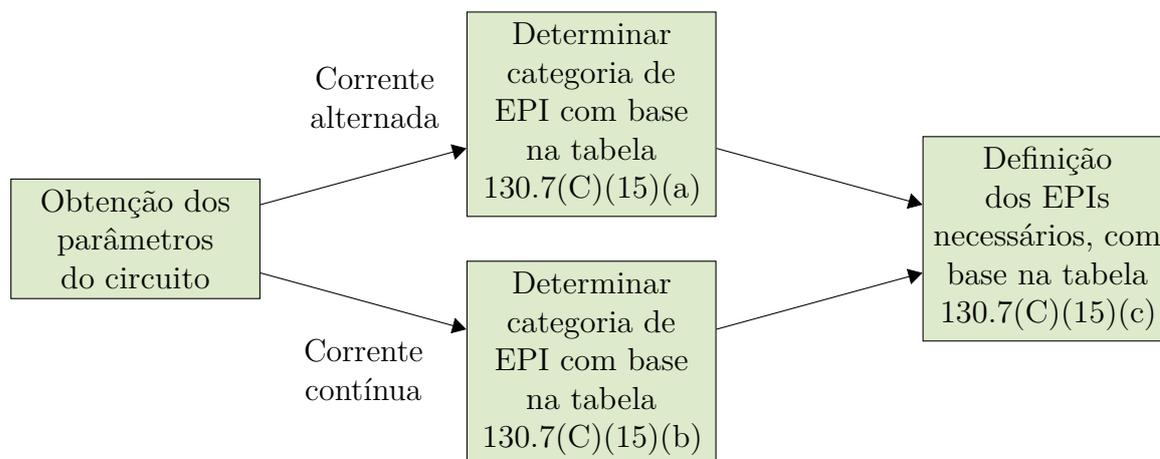
As categorias de EPI são divididas em quatro, numeradas de 1 a 4, e após a determinação da categoria de EPI do circuito pelas tabelas 130.7(C)(15)(a) ou 130.7(C)(15)(b), a tabela 130.7(C)(15)(c) deve ser consultada para verificar a vestimenta antichamas e os EPIs necessários para a realização do trabalho. A Tabela 2 cita os equipamentos de proteção e a energia incidente em cal/cm² que a roupa antichamas de cada categoria deve suportar e a Figura 11 apresenta o diagrama de blocos para aplicação do método das categorias de EPIs.

Tabela 2 – Equipamentos de proteção necessários para cada categoria de EPI.

Categoria de EPI	EPI
1	<p>Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 4 cal/cm² (16,75J/cm²) Camisas e calças compridas resistentes a arco ou macacão resistente a arco Protetor facial resistente a arco ou capuz carrasco resistente a arco Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário</p> <p>Equipamento de proteção Capacete, óculos de segurança e luvas de couro Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo) Sapato de segurança em couro, quando necessário</p>
2	<p>Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 8 cal/cm² (33,5J/cm²) Camisas e calças compridas resistentes a arco ou macacão resistente a arco Protetor facial resistente a arco ou capuz carrasco resistente a arco e balaclava resistente a arco Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário</p> <p>Equipamento de proteção Capacete, óculos de segurança e luvas de couro Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo) Sapato de segurança em couro</p>
3	<p>Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 25 cal/cm² (104,7J/cm²) Camisas de manga comprida resistente a arco, quando requerida Calças compridas resistentes a arco, quando requerida Macacão resistente a arco, quando requerido Jaqueta resistente a arco elétrico, quando requerida Capuz carrasco resistente a arco Luvas resistentes a arco Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário</p> <p>Equipamento de proteção Capacete e óculos de segurança Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo) Sapato de segurança em couro</p>
4	<p>Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 40 cal/cm² (167,5J/cm²) Camisas de manga comprida resistente a arco, quando requerida Calças compridas resistentes a arco, quando requerida Macacão resistente a arco, quando requerido Jaqueta resistente a arco elétrico, quando requerida Capuz carrasco resistente a arco Luvas resistentes a arco Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário</p> <p>Equipamento de proteção Capacete e óculos de segurança Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo) Sapato de segurança em couro</p>

Fonte: adaptado de NFPA-70E (2018).

Figura 11 – Diagrama de blocos para o método das categorias de EPI.



2.7 A queimadura de terceiro grau

Embora o arco elétrico possua diversos riscos, aqueles associados à fonte de calor com potencial para causar queimaduras de terceiro grau são os mais perigosos, por originarem a maior parte dos óbitos, já que as células da pele morrem mais rapidamente de acordo com a intensidade da temperatura incidente sobre esta.

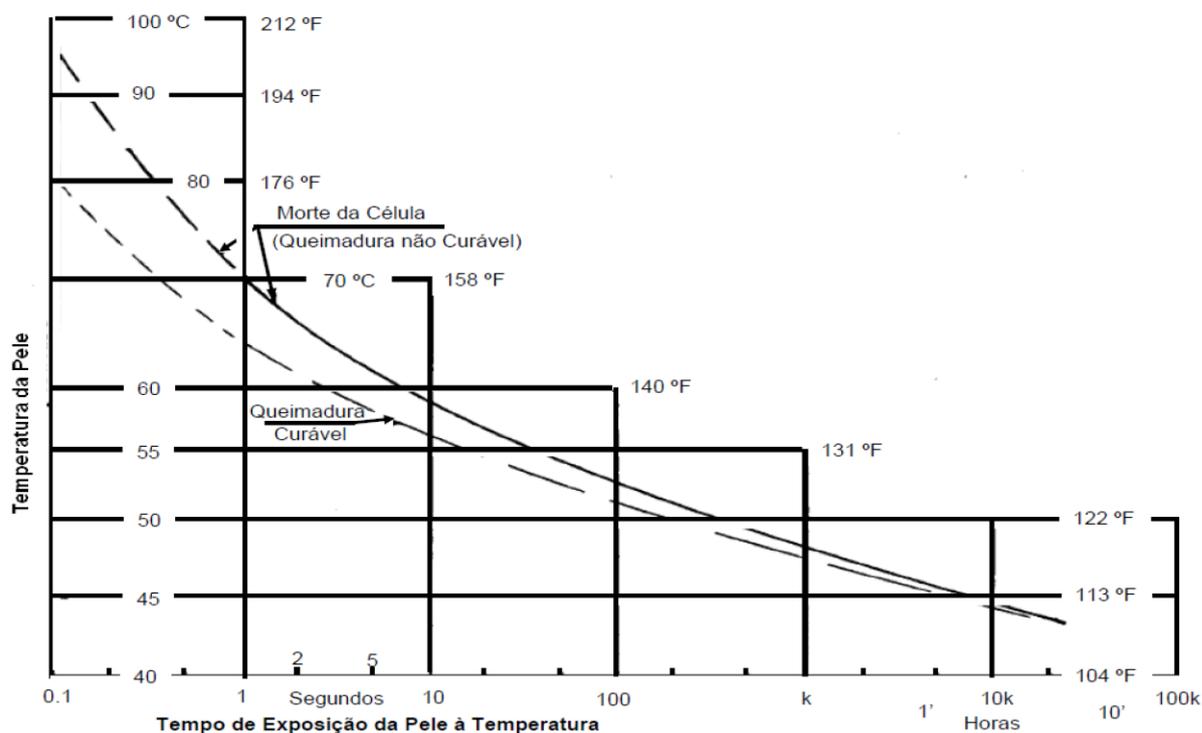
Se a temperatura da pele humana atingir 70°C por apenas um segundo, já é o suficiente para causar a destruição total da célula, resultando em uma queimadura incurável. Conforme a temperatura aumenta, o tempo necessário para a morte da célula diminui, chegando a apenas 0,1 segundos na temperatura de 96°C. A figura 12 mostra um gráfico com a relação entre a temperatura da pele e o tempo de tolerância para que ocorra uma queimadura curável ou não curável. (LEE, 1982)

Para avaliação das queimaduras, devem ser consideradas a profundidade, a extensão, a localização, a idade da vítima, a existência de doenças prévias, a concomitância de condições agravantes e a inalação de fumaça (VALE, 2005). Destaca-se que os acidentes envolvendo arco elétrico podem levar uma vasta área do corpo humano à queimaduras de segundo e terceiro graus se medidas de proteção adequadas não forem aplicadas (RESENDE, 2016).

Em adultos, uma queimadura é considerada grave quando mais de 5% da superfície do corpo da vítima sofreu uma queimadura de terceiro grau (GARMEL, 2012). A Figura 13 mostra o percentual da área total de cada parte do corpo humano, baseado na Regra dos Nove de Wallace, e é válida para pessoas acima de 10 anos de idade.

A proteção contra arco elétrico é sempre baseada no nível de energia incidente que atinge a face ou o corpo de um trabalhador a uma determinada distância, e não na energia incidente que atinge suas mãos ou braços. O nível do dano depende da porcentagem da

Figura 12 – Relação de tempo por temperatura para a tolerância da pele humana.



Fonte: adaptado de Lee (1982).

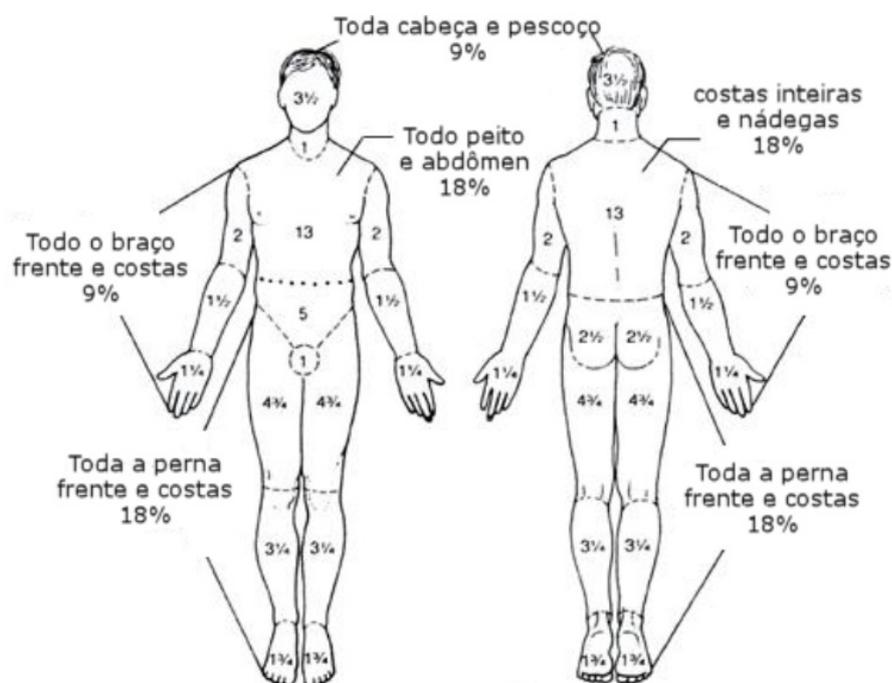
pele do corpo de uma pessoa que sofre uma queimadura. A cabeça e o corpo representam a maior parte da superfície do corpo humano, por isso queimaduras nessas áreas são mais graves do que aquelas ocorridas nas extremidades do corpo. (IEEE-1584, 2018)

2.8 As Vestimentas de Proteção

As vestimentas de proteção contra arco elétrico tem o objetivo de evitar que os trabalhadores sofram queimadura de terceiro grau, onde seu grau de desempenho é medido pelo indicador ATPV, que é definido na norma ASTM F 1959-06 como a energia incidente sobre um material ou um sistema de multicamadas que resulta em uma probabilidade de 50% de transferência de calor por meio de um espécime testado e que poderá causar uma queimadura de segundo grau na pele humana, baseado na curva de Stoll, que é a curva utilizada para prever o aparecimento de uma queimadura de segundo grau (QUEIROZ; SENGER, 2012b).

As normas norte americanas para confecção e teste das vestimentas antichamas estão dispostas na tabela 130.7(C)(14) da NFPA 70E.

Figura 13 – Percentual da superfície corporal para as partes do corpo humano.



Fonte: adaptado de Pinheiro (2018).

No Brasil, a norma que regulamenta a confecção e teste das vestimentas antichamas ABNT NBR IEC 61482, que se trata de uma tradução da norma IEC 61482, publicada em 2009. Esta norma se divide em duas partes, onde a primeira aborda os métodos de ensaio, que por sua vez também se divide em duas, sendo uma para cada um dos dois métodos de ensaio, e a segunda parte trata dos requisitos gerais dos materiais dos quais são feitas as vestimentas de proteção.

A norma ABNT NBR IEC 61482-1-1 especifica os métodos de ensaio para medir o desempenho térmico de materiais destinados para a utilização em vestuário, resistentes ao calor e à chama para trabalhadores expostos aos efeitos térmicos de arcos elétricos e a função de artigos de vestuário utilizando estes materiais, detalhando os procedimentos e cuidados que devem ser seguidos na execução dos ensaios e a interpretação dos resultados, indicando todo equacionamento que deve ser aplicado até se chegar a um valor em ATPV para a vestimenta de proteção. O tipo de arco utilizado para os testes é o arco ao ar livre (ABNT, 2017a).

A norma ABNT NBR IEC 61482-2 determina os requisitos para que um material possa ser utilizado na confecção de vestimentas de proteção, como resistência ao rasgo, à tração e ao estouro do tecido de malha da camada interna, estabilidade dimensional após lavagem (ABNT, 2017b).

As vestimentas de proteção contra arco elétrico são desconfortáveis e podem dificultar a realização de atividades manuais, além de limitar a troca de ar entre o meio externo e o interno à vestimenta, causando uma sensação de calor incômoda no interior das mesmas (QUEIROZ, 2011). Portanto, deve-se evitar o sobredimensionamento das vestimentas.

Em Lee (1982), foi demonstrado que se uma pessoa ficar sujeita a até uma queimadura de segundo grau por arco elétrico, ela não morreria, e que para nunca exceder uma queimadura de segundo grau, a energia incidente máxima onde o profissional atua deve ser menor do que $1,2 \text{ cal/cm}^2$, portanto, este valor é considerado o nível básico de exposição tolerável sem a utilização de vestimentas com categorias específicas para resistir a energia resultante de um arco elétrico.

Por outro lado, nenhum EPI é capaz de fornecer proteção acima de 40 cal/cm^2 , portanto, para trabalhos em painéis com energia incidente que excedam este valor o mesmo deve ser desenergizado. (QUEIROZ; SENGER, 2012b)

A Figura 14 mostra um exemplo de camisa antichamas e a Tabela 3 mostra exemplos de vestimentas antichama de cada uma das 4 categorias.

Figura 14 – Exemplo de camisa antichamas, com indicação de categoria e ATPV.



Fonte: adaptado de CA EPIs (2018).

Tabela 3 – Exemplo de cada categoria de vestimenta antichamas.

Descrição	Imagem demonstrativa	Descrição	Imagem demonstrativa
Categoria 1		Categoria 2	
Categoria 3		Categoria 4	

Fonte – adaptado de Lally (2018).

3 Metodologias de Cálculo

Baseado no anexo D da NFPA 70E, serão descritas as quatro metodologias para o cálculo de energia incidente sugeridas, com seu equacionamento e modelagem, com as grandezas convertidas para o sistema internacional, SI, quando for necessário. A metodologia da IEEE 1584 será baseada na própria norma devido ao seu maior detalhamento.

3.1 Método de Ralph Lee

Em (LEE, 1982), são definidas as equações básicas para o cálculo da distância mínima de segurança do arco elétrico, e que também serão utilizadas posteriormente nos outros métodos.

3.1.1 Equações Básicas

A corrente de falta franca trifásica nos terminais de um transformador é dada pela Equação (3.1).

$$I_{SC} = [(MVA_{Base} \times 10^6) \div (1,732 \times V)] \times (100 \div \%Z) \quad (3.1)$$

Onde I_{SC} é a corrente de falta franca trifásica em ampéres, MVA_{Base} é a potência aparente do sistema base em MVA, V é a tensão de linha em volts e $\%Z$ é a impedância percentual do transformador, baseado na potência aparente do sistema base.

O valor típico para uma máxima potência de um arco trifásico (P), expresso em MW, pode ser calculado usando a Equação (3.2).

$$P = 1,732 \times V \times I_{SC} \times 10^{-6} \times 0,707^2 \quad (3.2)$$

A distância mínima do arco elétrico é calculada de acordo com a Equação (3.3) ou com a Equação (3.4).

$$D_C = \sqrt{(2461,93 \times MVA_{bf} \times t)} \quad (3.3)$$

$$D_C = \sqrt{(49238,6 \times MVA \times t)} \quad (3.4)$$

Onde D_C é a distância em centímetros entre a pessoa e a fonte do arco para ocorra apenas queimaduras curáveis, onde a temperatura da pele fique abaixo de 80°C, MVA_{bf}

é a potência aparente da falta franca no ponto envolvido em MVA, MVA é a potência aparente do transformador em MVA, sendo que para transformadores com menos de 0,75 MVA sua potência deve ser multiplicada por 1,25, e t é o tempo de exposição ao arco em segundos.

3.1.2 Cálculo da energia incidente

Utilizado para estimar valores de energia incidente produzidos por um curto-circuito trifásico em ambiente aberto para tensões superiores a 600 V, o método de Ralph Lee requer os seguintes parâmetros:

- Corrente máxima de curto-circuito trifásico;
- Tensão de linha do sistema;
- Tempo total para atuação da proteção à montante do ponto de origem do arco elétrico para a condição de máxima corrente de curto-circuito;
- Distância do trabalhador a partir do ponto de origem do arco até o ponto em que a tarefa será executada. Se o tempo para atuação do dispositivo de proteção for superior a dois segundos, deve-se considerar por quanto tempo a pessoa irá permanecer no local em que ocorreu o arco elétrico. É provável que uma pessoa exposta a um arco elétrico se afaste rapidamente se for fisicamente possível. Dessa forma, dois segundos é o tempo máximo razoável para realização dos cálculos. Trabalhadores que estiverem executando atividades no interior de painéis, por exemplo, necessitarão de mais tempo para se afastarem do ponto de origem do arco. Essa situação deve ser analisada previamente.

Assim, a energia incidente pode ser calculada pela Equação (3.5).

$$E = \frac{5116,12 \times F \times V \times t_A}{D^2} \quad (3.5)$$

Onde E é a energia incidente, em cal/cm², F é a corrente de falta franca, em kA, V é a tensão de linha em kV, t_A é o tempo de duração do arco, em segundos e D é a distância de trabalho do ponto de arco elétrico, em centímetros.

3.2 Método de Doughty e Neal

O método de cálculo proposto por Doughty, Neal e Floyd (2000) pode ser utilizado para estimar a energia incidente em sistemas trifásicos com tensão nominal igual ou inferior a 600V. Os resultados das equações deste método podem não representar o pior caso em

todas as situações e é essencial que elas sejam utilizadas apenas dentro das limitações indicadas nas definições das variáveis mostradas abaixo das equações.

Os parâmetros necessários para os cálculos são:

- Corrente máxima de curto-circuito e a corrente de falta mínima capaz de autossustentar um arco elétrico. Para sistemas de 480 V, é aceito pela indústria que o valor mínimo da corrente de curto-circuito capaz de autossustentar um arco elétrico seja equivalente a 38% da corrente de curto-circuito máxima. A exposição a níveis maiores de energia incidente pode ocorrer em níveis menores de curto-circuito, pois o dispositivo de sobrecorrente pode demorar mais tempo para ser sensibilizado e abrir o circuito envolvido na falta;
- Tempo total para atuação da proteção à montante do ponto de origem do arco elétrico para as condições de máxima corrente de curto-circuito e para a corrente de curto-circuito mínima capaz de autossustentar um arco elétrico;
- Distância do trabalhador a partir do ponto de origem do arco até o ponto em que a tarefa será executada.

As distâncias típicas de trabalho utilizadas para os cálculos de energia incidente são:

- Quadros de distribuição e centro de controle de motores de baixa tensão (com tensão igual ou inferior à 600 V) – 455 mm;
- Painéis de distribuição de baixa tensão (com tensão igual ou inferior a 600 V) – 610 mm;
- Painel de distribuição de média tensão (acima de 600 V) – 910 mm.

Para calcular a energia incidente decorrente de um arco ao ar livre deve ser aplicada a Equação (3.6).

$$E_{MA} = 32740,4 \times D_A^{-1,9593} \times t_A \times [0,0016F^2 - 0,0076F + 0,8938] \quad (3.6)$$

Onde E_{MA} é energia incidente máxima em ambiente aberto, em cal/cm², D_A é a distância de trabalho do ponto de arco elétrico, em centímetros, para distância mínima de 45,72 centímetros, t_A é o tempo de duração do arco, em segundos, e F é a corrente de curto-circuito, em kA (na faixa de 16 kA a 50 kA).

Para arco ocorrido em ambiente fechado, definido como o ambiente de uma caixa cúbica aberta em apenas um lado e que possua menos de 50,8 centímetros em cada lado, deve ser aplicada a Equação (3.7) para estimativa de energia incidente. Geralmente, se enquadram nestes critérios os arcos elétricos ocorridos no interior de painéis, CCM ou outro tipo de compartimento.

$$E_{MB} = 4103,31 \times D_B^{-1,4738} \times t_A \times [0,0093F^2 - 0,3453F + 5,9675] \quad (3.7)$$

Em que E_{MB} é a energia incidente máxima em ambiente fechado, em cal/cm², D_B é a distância de trabalho do ponto de arco elétrico, em centímetros, para distância mínima de 45,72 centímetros, t_A é o tempo de duração do arco, em segundos, e F é a corrente de curto-circuito, em kA (na faixa de 16 kA a 50 kA).

3.3 Método da IEEE 1584:2018

Os cálculos estabelecidos na norma IEEE 1584, revisão de 2018, empregam modelos baseados em análise estatística e ajuste de curvas com base em uma série de ensaios realizados.

A modelagem para o cálculo de energia incidente pode ser dividida em duas partes, dependendo da tensão medida no circuito aberto, sendo uma para tensões entre 208 V e 600 V e outra para tensões entre 600 V e 15000 V.

Arcos sustentáveis são possíveis, mas menos prováveis em sistemas trifásicos operando a 240 V nominais ou menos com uma corrente de curto-circuito inferior a 2000 A.

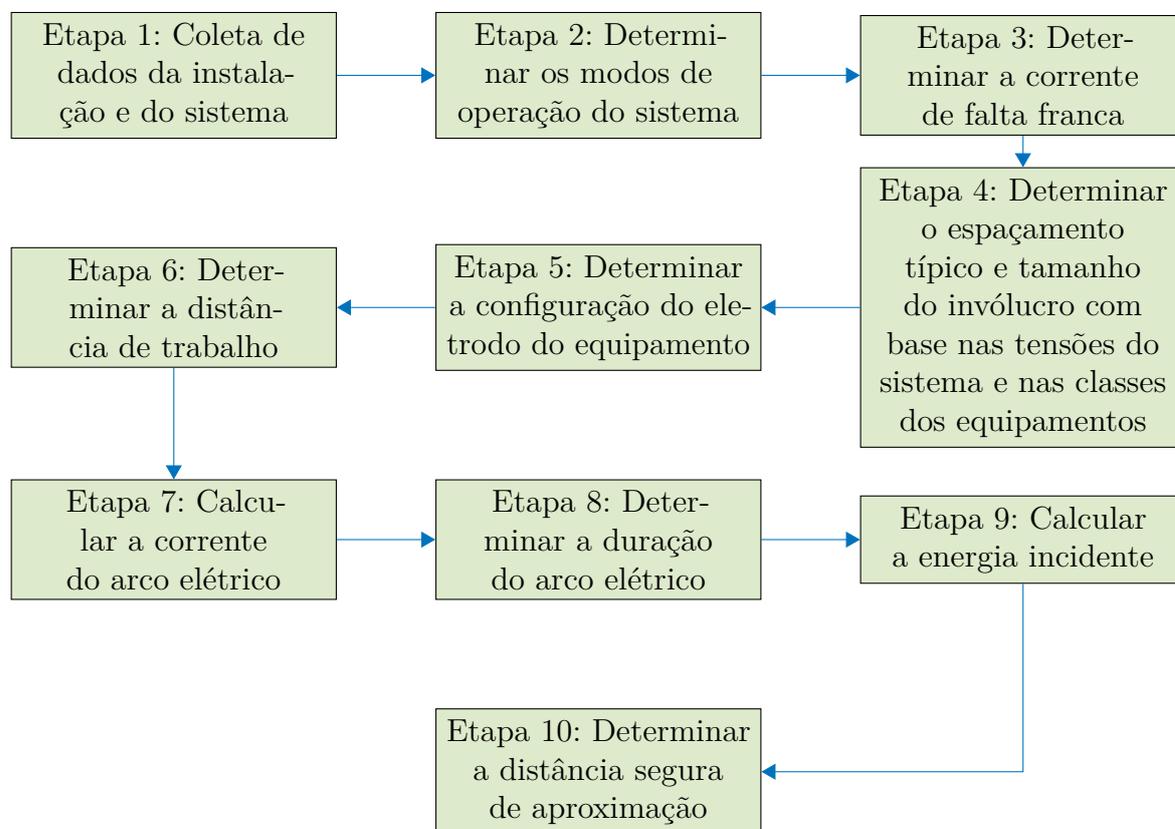
De acordo com a norma IEEE-1584 (2018), o processo de análise da energia incidente pode ser dividido em 10 etapas, conforme Figura 15.

3.3.1 Etapa 1: coleta de dados da instalação e do sistema

O estudo inicia com a coleta de dados do sistema elétrico que será analisado, como os diagramas unifilares atualizados e demais dados necessários para os estudos de curto-circuito e coordenação de seletividade das proteções, devendo ser considerados os circuitos de distribuição e controle de baixa tensão e possíveis alimentadores alternativos.

Devem ser coletadas as informações necessárias para realizar os cálculos de energia incidente em equipamentos elétricos que provavelmente exigirão exame, ajuste, manutenção ou manutenção enquanto estiverem energizados. Isso pode incluir equipamentos como painéis de baixa e média tensão, conectores de média tensão, partidas de motor, centros de controle de motores (CCMs), painéis de distribuição, também chamados de centro de distribuição de cargas (CDCs), interruptores e disjuntores montados separadamente,

Figura 15 – Diagrama de blocos das etapas para o cálculo de energia incidente de acordo com a norma IEEE 1584.



inversores CA e CC, unidades de distribuição de energia (PDUs), fontes de alimentação ininterruptas (UPS), chaves de transferência, painéis de controle industrial, gabinetes para tomadas de medidores, etc.

Após a coleta dos diagramas unifilares, devem ser providenciados todos os dados necessários para o cálculo de curto-circuito. O estudo deve considerar todas as fontes de energia, incluindo a concessionária, geradores auxiliares e motores.

Dados das placas de identificação de transformadores, geradores, motores grandes e painéis de distribuição, também são relevantes e normalmente incluem faixas de tensão/tensão ou configurações de emftap dos transformadores, potência ativa ou reativa, corrente nominal e de partida, impedância ou dados de reatância transiente/subtransiente, entre outros. Informações sobre os condutores e cabos utilizados no sistema, incluindo seus percursos e métodos de fixação, e as características dos dispositivos de proteção, como curvas de tempo-corrente, também devem ser coletadas.

Determine quais dispositivos de proteção serão utilizados para os cálculos. O modo de operação, a construção do equipamento, a disposição e as características dos dispositivos de proteção, como sobrecorrente temporizada, por exemplo, em uma montagem podem

afetar a consideração de qual dispositivo é selecionado para calcular a duração do arco. O julgamento de engenharia por uma pessoa qualificada com habilidades e conhecimento do equipamento elétrico é necessário para a determinação do dispositivo de proteção selecionado para esses cálculos.

3.3.2 Etapa 2: Determinar os modos de operação do sistema

De acordo com a IEEE 1584, uma instalação elétrica pode ter vários modos de operação, portanto é importante determinar a corrente de curto-circuito disponível para os modos de operação que fornecem as correntes máxima e mínima de curto-circuito disponíveis.

Um sistema de energia complexo pode ter vários modos de operação, como por exemplo:

- Um ou mais alimentadores em operação;
- Disjuntor de interligação de barra secundária de subestação de interface com a concessionária aberto ou fechado;
- Subestação com um ou dois alimentadores principais;
- Subestação com dois transformadores com laço secundário aberto ou fechado;
- CCMs com um ou dois alimentadores (com ambos ou apenas um alimentador energizado);
- Geradores com possibilidade para operar em paralelo com a concessionária de energia, operando ou em espera.

É necessário considerar os modos reais de operação com base nos planos operacionais do local, seja em manutenção, operação normal ou sob condições especiais. Devem ser executados os cálculos de energia incidente para todos os modos de operação no sistema de potência para determinar o maior resultado de limite de energia incidente e arco elétrico para cada possível localização de arco.

3.3.3 Etapa 3: Determinar a corrente de falta franca

Para esta etapa, a IEEE 1584 recomenda que todas as informações referentes ao diagrama unifilar e os dados coletados dos equipamentos sejam inseridos em um programa de computador para cálculo e análise de curto-circuito. Há programas comerciais que possibilitam a inclusão de milhares de barras para execução dos cálculos e que permitem um fácil chaveamento entre os modos de operação.

Os valores da corrente de curto-circuito devem ser determinados, principalmente, nos pontos da instalação onde os trabalhadores desenvolvam suas atividades laborais.

Tanto as maiores quanto as menores correntes de curto-circuito podem resultar no maior valor de energia incidente e devem ser consideradas. Correntes de falta mais altas podem resultar em tempos de disparo mais curtos para dispositivos de proteção de sobrecorrente, resultando em uma energia incidente menor. Correntes de falta mais altas sem uma diminuição no tempo de abertura do dispositivo de proteção de sobrecorrente resultam em uma energia incidente maior. Correntes de falta mais baixas podem resultar em um tempo de abertura mais longo para o dispositivo de proteção de sobrecorrente, aumentando assim a energia incidente. Em caso de dúvida sobre a corrente de falha real, pode ser necessário estabelecer uma faixa possível de níveis de corrente de falta e calcular os tempos de disparo do dispositivo de proteção de sobrecorrente e os níveis de energia incidente do arco elétrico em um intervalo em vez de um conjunto específico de condições.

3.3.4 Etapa 4: Determinar o espaçamento típico e tamanho do invólucro com base nas tensões do sistema e nas classes dos equipamentos

Para cada equipamento que faz parte do estudo, a tensão do sistema e a classe de equipamento podem ser usadas para estabelecer os espaçamentos típicos entre os condutores ou barramentos, como mostrado na Tabela 4, já que estes podem ser difíceis medir ou obtê-los do fabricante. Medições reais dos espaçamentos no equipamento instalado podem ser usadas, se disponíveis, mas pode ser difícil estabelecer um único valor, pois as folgas podem variar em diferentes locais do equipamento. Os valores de espaçamento fornecidos na Tabela 4 foram obtidos com base nos espaçamentos utilizados nos testes de energia incidente em laboratório e não nos testes reais do equipamento, mas podem aproximar as falhas do condutor no equipamento real.

A Tabela 4 também fornece informações sobre os tamanhos dos invólucros usados para cada classe de tensão, que foram usados para derivar o fator de correção de energia incidente do tamanho do invólucro.

3.3.5 Etapa 5: Determinar a configuração dos eletrodos do equipamento

O arranjo dos condutores e do gabinete do equipamento que mais se assemelha à configuração real do eletrodo precisa ser identificado. Cada tipo de equipamento, como painéis, quadros de controle e centros de controle de motores, pode conter condutores organizados de maneira semelhante às configurações dos eletrodos de configuração apresentadas na Tabela 5. Os locais dentro de um equipamento podem conter arranjos condutores semelhantes a mais de uma configuração de eletrodo.

Tabela 4 – Classe de equipamentos e distância mínima entre os condutores.

Classe do equipamento	Distância típica entre condutores (mm)	Tamanho do invólucro (A x L x P)
Painel de distribuição de 15kV	152	1143 mm x 762 mm x 762 mm
CCM de 15kV	152	914,4 mm x 914,4 mm x 914,4 mm
Painel de distribuição de 5kV	104	914,4 mm x 914,4 mm x 914,4 mm
Painel de distribuição de 5kV	104	1143 mm x 762 mm x 762 mm
CCM de 5kV	104	660,4 mm x 660,4 mm x 660,4 mm
Painel de distribuição de baixa tensão	32	508 mm x 508 mm x 508 mm
CCMs e painéis de distribuição rasos de baixa tensão	25	355,6 mm x 304,8 mm x $\leq 203,2$ mm
CCMs e painéis de distribuição profundos de baixa tensão	25	355,6 mm x 304,8 mm x $> 203,2$ mm
Caixa de junção de cabos	13	355,6 mm x 304,8 mm x $\leq 203,2$ mm ou 355,6 mm x 304,8 mm x $> 203,2$ mm

Fonte: adaptado de IEEE-1584 (2018).

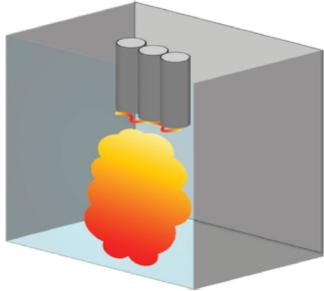
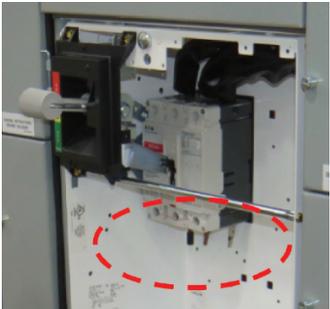
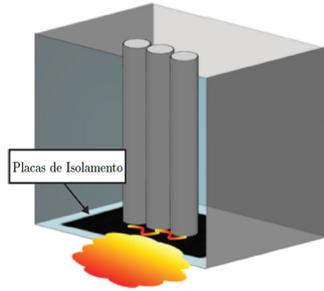
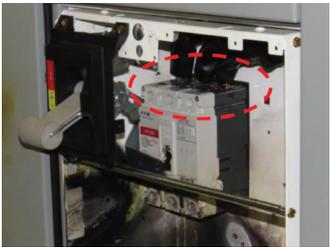
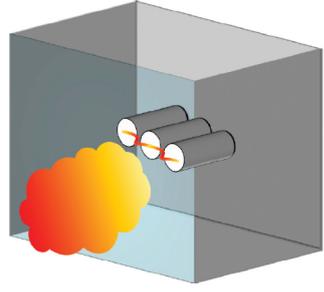
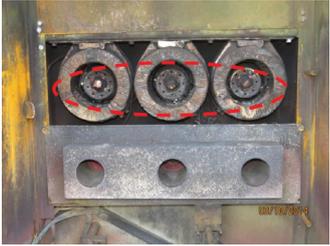
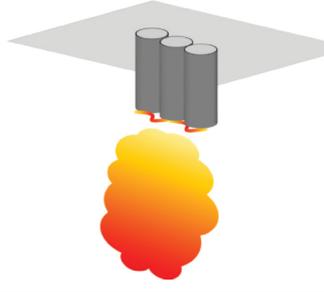
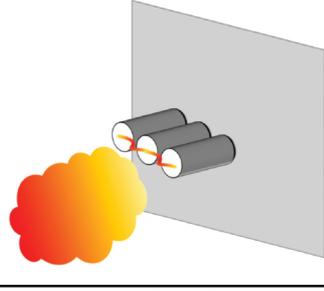
A norma aborda cinco configurações diferentes para os eletrodos: eletrodos verticais enclausurados (VCB), eletrodos verticais enclausurados terminados em uma barreira isolante (VCBB), eletrodos horizontais enclausurados (HCB), eletrodos verticais ao ar livre (VOA) e eletrodos horizontais ao ar livre (HOA).

A Tabela 5 fornece alguns exemplos de como os arranjos de condutores de equipamentos podem ser classificados com base em sua semelhança com as configurações dos eletrodos. Dependendo da tarefa que está sendo executada, e também da presença, ou não, de componentes removíveis, um local pode mudar sua classificação de configuração de eletrodo (por exemplo, gabinete de disjuntor de metal de média tensão sem o disjuntor dentro do cubículo).

3.3.6 Etapa 6: Determinar a distância de trabalho

De acordo com a IEEE 1584, a proteção contra arco elétrico é sempre baseada no nível de energia incidente que atinge a face ou o corpo de um trabalhador a uma determinada distância, e não na energia incidente que atinge suas mãos ou braços. O nível do dano depende da porcentagem da pele do corpo de uma pessoa que sofre uma queimadura. A cabeça e o corpo representam a maior parte da superfície do corpo humano, por isso queimaduras nessas áreas são mais graves do que aquelas ocorridas nas extremidades do corpo. A Tabela 6, apresenta as distâncias de trabalho típicas de acordo com os tipos de equipamentos.

Tabela 5 – Configurações dos eletrodos.

Configuração dos eletrodos	Desenho	Exemplo
VCB		
VCBB		
HCB		
VOA		
HOA		

Fonte – adaptado de IEEE-1584 (2018).

Tabela 6 – Tipo de equipamento e distância de trabalho típica

Tipo de equipamento	Distância de trabalho típica (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

Fonte: adaptado de IEEE-1584 (2018).

A distância de trabalho típica é a soma da distância entre o trabalhador e a parte frontal do equipamento com a distância entre a parte frontal e a fonte de origem do arco, localizada dentro do equipamento.

3.3.7 Etapa 7: Determinar a corrente do arco elétrico

A corrente de arco depende principalmente da corrente de falta franca, bem como de outros fatores, como o espaçamento entre os condutores, a configuração dos eletrodos ou condutores e a tensão do sistema. A corrente de falta franca através de cada dispositivo de proteção é encontrada no estudo de curto-circuito, examinando-se as contribuições e a impedância de cada circuito. As contribuições de corrente de curto-circuito através de cada circuito conectado à localização da falta precisam ser classificadas como provenientes de fontes energizantes ou não energizantes ou de fontes temporárias de corrente, como motores de indução. A corrente de arco total em um determinado local é calculada com base na corrente de falta franca total disponível naquele local e será menor do que esta, devido a impedância do arco. Presume-se que a distribuição da corrente de arco entre múltiplas fontes seja igual à distribuição da corrente de falta franca entre as fontes.

A corrente de arco elétrico no ponto de interesse e a porção dessa corrente passando pelo primeiro dispositivo de proteção a montante devem ser encontradas nesta etapa. A parte da corrente de arco que flui através do dispositivo de proteção de sobrecorrente determina a duração que deve ser usada no cálculo de energia incidente com a corrente de arco total do barramento. No caso de locais sendo energizados por múltiplos alimentadores, é necessário determinar a porção da corrente total do arco passando através de cada dispositivo de proteção para determinar o tempo de abertura de cada dispositivo.

A modelagem para cálculos de corrente de arco é dividida em duas partes, dependendo da tensão de circuito aberto do sistema, sendo uma para tensões entre 600 V e 15000 V e outra para tensões entre 208 V e 600 V.

3.3.7.1 Cálculo da corrente de arco elétrico para tensões entre 600 V e 15000 V

Para calcular a corrente de arco elétrico em sistemas que operam com tensões entre 600 V e 15000 V deve ser utilizadas as Equações (3.8) e (3.9), aplicando os coeficientes fornecidos pela norma (IEEE-1584, 2018), na Tabela 1, página 23, que consta no Anexo B, para encontrar valores intermediários (V_{oc}) em 600 V, 2700 V e 14300 V.

$$I_{arcV_{oc}} = 10^{k1+k2 \times (\log_{10} I_{bf}) + k3 \times (\log_{10} G)} \times C1 \quad (3.8)$$

$$C1 = (k4 \times I_{bf}^6 + k5 \times I_{bf}^5 + k6 \times I_{bf}^4 + k7 \times I_{bf}^3 + k8 \times I_{bf}^2 + k9 \times I_{bf} + k10) \quad (3.9)$$

Onde $I_{arcV_{oc}}$ é a corrente de arco eficaz média para cada uma das três tensões de circuito aberto (V_{oc}) calculadas, em kA, I_{bf} é a corrente de falta franca eficaz para uma falta trifásica simétrica, em kA, G é a distância entre condutores, em mm, $C1$ é uma variável auxiliar, e $k1$ até $k10$ são os coeficientes fornecidos pela Tabela 1 da norma (IEEE-1584, 2018), que consta no Anexo B.

Para determinar a corrente de arco final para uma tensão específica, devem ser usadas as equações de interpolação abaixo:

$$I_{arc1} = \frac{I_{arc2700} - I_{arc600}}{2,1} \times (V_{oc} - 2,7) + I_{arc2700} \quad (3.10)$$

$$I_{arc2} = \frac{I_{arc14300} - I_{arc2700}}{11,6} \times (V_{oc} - 14,3) + I_{arc14300} \quad (3.11)$$

$$I_{arc3} = \frac{I_{arc1} \times (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{I_{arc2} \times (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (3.12)$$

Onde I_{arc1} é o primeiro termo da interpolação da corrente de arco entre 600 V e 2700 V, em kA, I_{arc2} é o segundo termo da interpolação usado quando a tensão de circuito aberto é maior do que 2700 V, em kA, I_{arc3} é o terceiro termo da interpolação usado quando a tensão de circuito aberto é menor do que 2700 V, em kA, e V_{oc} é a tensão de circuito aberto, em kV.

Quando a tensão de circuito aberto é maior do que 600 V e menor do que 2700 V, tem-se:

$$I_{arc} = I_{arc3} \quad (3.13)$$

E quando a tensão de circuito aberto é maior do que 2700 V, tem-se:

$$I_{arc} = I_{arc2} \quad (3.14)$$

O tempo de duração do arco pode ser determinado usando I_{arc} , que por sua vez é utilizado para determinar a energia incidente e a distância segura de aproximação contra arco elétrico.

3.3.7.2 Cálculo da corrente de arco elétrico para tensões entre 208 V e 600 V

Em sistemas que operam com tensões entre 208 V e 600 V, é necessário aplicar a Equação (3.8) para encontrar o valor intermediário apenas para a tensão de 600 V, onde então é aplicada a Equação (3.15) para encontrar o valor final.

$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{0,6}{V_{oc}}\right)^2 \times \left[\frac{1}{I_{arc600}^2} - \left(\frac{0,6^2 - (V_{oc})^2}{0,6^2 \times I_{bf}^2}\right) \right]}} \quad (3.15)$$

Onde V_{oc} é a tensão de circuito aberto, em kV, I_{bf} é a corrente de falta franca eficaz para uma falta trifásica simétrica, em kA, I_{arc} é a corrente de arco final eficaz para a tensão especificada, em kA, e I_{arc600} é a corrente de arco eficaz com a tensão de circuito aberto de 600 V, encontrada usando a Equação (3.8), em kA.

3.3.8 Etapa 8: Determinar a duração do arco elétrico

A duração do arco é definida como o tempo que a fonte de energização a montante da corrente de arco leva para parar de fornecer corrente ou energia para a falta de arco. Normalmente, o tempo de atuação dos dispositivos de proteção de sobre corrente depende da magnitude e/ou direção da corrente de arco que passa pelo equipamento de detecção de corrente. Quando várias fontes estão presentes, a duração do arco depende do tempo que o último dispositivo de proteção leva para interromper a corrente do arco. Em circunstâncias especiais, a duração do arco não depende totalmente da abertura do dispositivo de proteção ou do tempo de desarme, mas também do tempo que a energia armazenada leva para ser descarregada através do arco. Exemplos desta condição incluem, mas não estão limitados a, falhas perto dos terminais do gerador no lado da linha do disjuntor do gerador.

A duração do arco é mais comumente dependente do tempo de operação de um dispositivo de proteção de sobre corrente temporizado. O tempo de operação dos relés de falta à terra normalmente não é considerado para a duração do arco, uma vez que uma falta de arco pode ou não envolver a terra. Outros tipos de dispositivos de proteção com tempos de operação definidos, como relés diferenciais, relés de detecção de luz de arco voltaico, dispositivos de detecção de pressão, etc., devem ser considerados para determinar seu tempo

de operação. Se existirem configurações de dispositivos de proteção que afetem o tempo de operação dos dispositivos de proteção, como os esquemas de intertravamento seletivos de zonas, eles também precisam ser considerados. Todas as fontes de atraso potencial devem ser consideradas, incluindo o tempo de operação do relé de proteção, tempo total de corte dos disjuntores ou tempo de operação dos contadores, atrasos introduzidos por dispositivos intermediários, como relés de bloqueio ou auxiliares, atrasos relacionados a tempos de processamento ou redes de comunicação e outros fatores apropriados.

Para dispositivos de proteção de sobre corrente em série, ou em locais onde mais de um tipo de dispositivo de proteção pode eliminar a falta de arco, os tempos de operação devem ser comparados para determinar qual operará primeiro. Quando a curva de tempo-corrente de um fabricante mostra uma faixa, ou intervalo, o tempo mais longo para o valor de corrente de arco calculado deve ser usado.

Se o tempo total de atuação do dispositivo de proteção for maior que dois segundos, deve ser considerado quanto tempo uma pessoa provavelmente permanecerá no local do arco voltaico. É provável que uma pessoa exposta a um arco elétrico se afaste rapidamente se for fisicamente possível, e 2 segundos normalmente é uma suposição razoável para a duração do arco no cálculo de energia incidente. No entanto, isso também depende da tarefa específica e pode haver circunstâncias em que a saída de uma pessoa pode ser bloqueada, devendo ser considerado um tempo maior.

Para fusíveis, as curvas de tempo/corrente dos fabricantes podem incluir o tempo de fusão e de interrupção. Neste caso, deve-se adotar o tempo de interrupção. Caso o fabricante forneça somente a média do tempo de fusão, deve-se somar 10% e mais um adicional de 0,004 segundos no tempo de fusão, para determinar o tempo total de fusão. Se o tempo total de interrupção da corrente de falta de arco é menor que 0,01 segundo, então 0,01 segundo deve ser usado para o tempo.

Para disjuntores de baixa tensão com relés integrados, as curvas de tempo-corrente do fabricante incluem tanto o tempo de abertura do dispositivo quanto o tempo de compensação na maioria dos casos. Se as curvas mostrarem apenas o tempo de operação da unidade de disparo, um tempo de operação do disjuntor (normalmente 0,05 segundos ou três ciclos) deve ser adicionado.

Para fusíveis ou disjuntores limitadores de corrente, se a corrente de arco é maior que o limite de corrente, obtido das curvas de pico de passagem, use a recomendação do fabricante sobre o tempo total de interrupção e corrente de arco efetiva.

Em sistemas que operam com relé de proteção, o tempo de interrupção do disjuntor deve ser adicionado ao tempo de operação do relé juntamente com atrasos de tempo adicionais. O tempo de interrupção é a soma do tempo de abertura do disjuntor e do tempo de arco.

3.3.9 Etapa 9: Calcular a energia incidente

Quando um modelo do sistema elétrico é desenvolvido, a compartimentalização do equipamento e a localização da falta precisam ser consideradas. A falha de arco pode ocorrer no lado da linha, no lado do barramento e no lado da carga dos dispositivos de proteção localizados em diferentes compartimentos. Ao avaliar a energia incidente em um local de falta por arco no sistema, o tempo de interrupção do dispositivo de proteção a montante do ponto da falha deve ser considerado. Um dispositivo de proteção de sobrecorrente “principal” integral pode ser considerado no cálculo se for adequadamente isolado do barramento para evitar o escalonamento para uma falta no lado da linha. Quando o dispositivo integral de proteção de sobrecorrente principal não estiver adequadamente isolado do barramento, o dispositivo de proteção a montante deve ser considerado como protetor do barramento principal e do barramento.

A contribuição da corrente de arco dos motores precisa ser considerada pelo seu impacto no tempo de operação do dispositivo de proteção e seu efeito na corrente total de corrente e na energia incidente.

Considerações semelhantes podem ser necessárias para sistemas com várias origens. Fluxos de corrente de arco de múltiplas fontes fazem com que dispositivos de proteção em múltiplas fontes operem sequencialmente, causando variação nos fluxos de corrente de arco, duração de arco e energia incidente.

As equações para o cálculo de energia incidente foram normalizadas para invólucros com dimensões de $508 \times 508 \times 508$ mm. Portanto para calcular a energia incidente para outros tamanhos de invólucros deve ser aplicado um fator de correção para o tamanho do invólucro.

Um conjunto de valores de altura e largura equivalentes é determinado com base na tensão do sistema, na configuração do eletrodo, na altura do compartimento e na largura. A profundidade não é considerada a menos que a largura e a altura sejam menores que 508 mm e que a tensão do sistema seja menor que 600 V. A profundidade é usada para classificar o tipo de invólucro como “Típico” ou “Raso”.

O tipo de invólucro, altura equivalente e largura são usados para determinar um parâmetro de tamanho de invólucro equivalente, que determina o valor do fator de correção do tamanho do invólucro.

Valores de energia incidente intermediários nas tensões de 600 V, 2700 V e 14300 V devem ser calculados, para então serem usados na interpolação do valor de energia incidente final em uma tensão específica desejada.

3.3.9.1 Determinação da Largura e Altura equivalentes

Invólucros com áreas de abertura maiores que $1244,6 \times 1244,6$ mm podem ser encontrados no equipamento real, mas se a largura ou a altura (ou ambas) exceder $1244,6$ mm, esta deve ser tratada como se medisse $1244,6$ mm para a aplicação desta modelagem de cálculo.

O invólucro é classificado como “Raso” quando as seguintes condições são atendidas:

- A tensão do sistema é menor do que 600 V em tensão alternada;
- Tanto a altura como a largura são inferiores a 508 mm;
- A profundidade do gabinete é menor ou igual a $203,2$ mm.

Se alguma dessas condições não for atendida, o gabinete será classificado "Típico".

Uma vez classificado o tipo de gabinete, a altura equivalente H_{eq} e a largura equivalente L_{eq} precisam ser determinadas pela comparação de seus valores com intervalos específicos para cada uma das três configurações de eletrodos em ambientes enclausurados.

A largura equivalente deve ser determinada pela Equação (3.16) se o invólucro for do tipo "Raso" ou possuir largura entre 508 e $660,4$ mm para qualquer configuração de eletrodo.

$$L_{eq} = 0,03937 \times L \quad (3.16)$$

Onde L_{eq} é a largura equivalente do invólucro e L é a largura real do invólucro, em mm.

A altura equivalente deve ser determinada pela Equação (3.17) se o invólucro for do tipo "Raso", possuir altura entre 508 e $660,4$ mm para qualquer configuração de eletrodo ou possuir altura entre $660,4$ e $1244,6$ mm seus eletrodos forem do tipo VCB.

$$H_{eq} = 0,03937 \times H \quad (3.17)$$

Onde H_{eq} é a altura equivalente do invólucro e H é a altura real do invólucro, em mm.

Para invólucros do tipo “Típico”, mas que possuem largura menor do que 508 mm, deve ser atribuída a constante 20 para a largura equivalente L_{eq} , para qualquer configuração de eletrodo. O mesmo acontece com a altura, se for do tipo "Típico" e possuir altura menor do que 508 mm, deve ser atribuída a constante 20 para a altura equivalente H_{eq} . Se a

altura for maior do que 1244,6 mm e os eletrodos forem da configuração VCB de ser atribuída a constante 49 para a H_{eq} .

Para largura maior do que 660,4 mm a largura equivalente L_{eq} é determinada usando a Equação (3.18) para qualquer configuração de eletrodo.

$$L_{eq} = \left(660,4 + (L - 660,4) \times \left(\frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right) \times 25,4^{-1} \quad (3.18)$$

Onde L_{eq} é a largura equivalente do invólucro, L é a largura real do invólucro, em mm, para largura entre 660,4 e 1244,6 mm, ou 1244,6 mm se a largura real for maior do que 1244,6 mm, V_{oc} é a tensão de circuito aberto do sistema, em kV, A é uma constante igual a 4 para VCB e 10 para VCBB e HCB, e B é uma constante igual a 20 para VCB, 24 para VCBB e 22 para HCB.

Para altura maior do que 660,4 mm a altura equivalente H_{eq} é determinada usando a Equação (3.19) para as configurações de eletrodo VCBB e HCB.

$$H_{eq} = \left(660,4 + (H - 660,4) \times \left(\frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right) \times 25,4^{-1} \quad (3.19)$$

Onde H_{eq} é a altura equivalente do invólucro, H é a altura real do invólucro, em mm, para altura entre 660,4 e 1244,6 mm, ou 1244,6 mm se a altura real for maior do que 1244,6 mm, V_{oc} é a tensão de circuito aberto do sistema, em kV, A é uma constante igual a 4 para VCB e 10 para VCBB e HCB, e B é uma constante igual a 20 para VCB, 24 para VCBB e 22 para HCB.

A Tabela 6 da norma IEEE 1584, contida no Anexo B, fornece em síntese as diretrizes para determinar a altura e a largura equivalentes do gabinete (H_{eq} e L_{eq}) para diferentes intervalos de dimensões de invólucro e configurações de eletrodo, mencionadas acima.

3.3.9.2 Determinação do tamanho equivalente do invólucro e fator de correção pelo tamanho do invólucro

Obtêm-se do tamanho equivalente do invólucro através da média aritmética entre a altura equivalente do invólucro e a largura equivalente do invólucro, através da Equação (3.20)

$$ESS = \frac{H_{eq} + L_{eq}}{2} \quad (3.20)$$

Onde ESS é o tamanho equivalente do invólucro, H_{eq} é a altura equivalente do invólucro e L_{eq} é a largura equivalente do invólucro.

O fator de correção para o tamanho do invólucro é obtido através da Equação (3.21) para invólucro do tipo "Típico" e pela Equação (3.22) para invólucro do tipo "Raso".

$$CF = b1 \times ESS^2 + b2 \times ESS + b3 \quad (3.21)$$

$$CF = \frac{1}{b1 \times ESS^2 + b2 \times ESS + b3} \quad (3.22)$$

Onde CF é o fator de correção para o tamanho do invólucro, $b1$, $b2$ e $b3$ são coeficientes fornecidos pela Tabela 7 e ESS é o tamanho equivalente do invólucro.

A Tabela 7 fornece os coeficientes $b1$ a $b3$ para os tipos de gabinete "Típico" e "Raso".

Tabela 7 – Coeficientes para a determinação do fator de correção para o tamanho do invólucro.

Tipo de invólucro	Configuração do eletrodo	$b1$	$b2$	$b3$
Típico	VCB	-0,000302	0,03441	0,4325
	VCBB	-0,0002976	0,032	0,479
	HCB	-0,0001923	0,01935	0,6899
Raso	VCB	0,002222	-0,02556	0,6222
	VCBB	-0,002778	0,1194	-0,2778
	HCB	-0,0005556	0,03722	0,4778

Fonte: adaptado de IEEE-1584 (2018).

3.3.9.3 Determinação da energia incidente

Para calcular a energia incidente em uma tensão específica, primeiro devem ser determinados os valores intermediários para os níveis de tensão de 600 V, 2700 V e 14300 V, e então usar equações de interpolação para se obter os valores finais estimados.

Os valores intermediários de energia incidente são determinados através das equações a seguir:

$$E_{600} = \frac{12,552}{50} \times T \times 10^{k1+k2 \times (\log_{10} G) + \frac{k3 \times I_{arc600}}{C^2} + C3 + k13 \times (\log_{10} I_{arc600})} \quad (3.23)$$

$$E_{2700} = \frac{12,552}{50} \times T \times 10^{k1+k2 \times (\log_{10} G) + \frac{k3 \times I_{arc2700}}{C^2} + C3 + k13 \times (\log_{10} I_{arc2700})} \quad (3.24)$$

$$E_{14300} = \frac{12,552}{50} \times T \times 10^{k1+k2 \times (\log_{10} G) + \frac{k3 \times I_{arc14300}}{C^2} + C3 + k13 \times (\log_{10} I_{arc14300})} \quad (3.25)$$

$$E_{\leq 600} = \frac{12,552}{50} \times T \times 10^{k1+k2 \times (\log_{10} G) + \frac{k3 \times I_{arc600}}{C2} + C3 + k13 \times (\log_{10} I_{arc})} \quad (3.26)$$

$$C2 = k4 \times I_{bf}^7 + k5 \times I_{bf}^6 + k6 \times I_{bf}^5 + k7 \times I_{bf}^4 + k8 \times I_{bf}^3 + k9 \times I_{bf}^2 + k10 \times I_{bf} \quad (3.27)$$

$$C3 = k11 \times (\log_{10} I_{bf}) + k12 \times (\log_{10} D) + \log_{10} \frac{1}{CF} \quad (3.28)$$

Onde E_{600} é a energia incidente quando a tensão de circuito aberto (V_{oc}) é de 600 V, em J/cm², E_{2700} é a energia incidente quando a tensão de circuito aberto (V_{oc}) é de 2700 V, em J/cm², E_{14300} é a energia incidente quando a tensão de circuito aberto (V_{oc}) é de 14300 V, em J/cm², $E_{\leq 600}$ é a energia incidente quando a tensão de circuito aberto (V_{oc}) é ≤ 600 V, em J/cm², T é a duração do arco, em ms, G é o espaçamento entre os condutores, em mm, I_{arc600} é a corrente de arco eficaz com a tensão de circuito aberto de 600 V, em kA, $I_{arc2700}$ é a corrente de arco eficaz com a tensão de circuito aberto de 2700 V, em kA, $I_{arc14300}$ é a corrente de arco eficaz com a tensão de circuito aberto de 14300 V, em kA, I_{arc} é a corrente de arco eficaz com a tensão de circuito aberto ≤ 600 V, em kA, I_{bf} é a corrente de falta franca eficaz para uma falta trifásica simétrica, em kA, D é a distância de trabalho do ponto de arco elétrico, em mm, CF é o fator de correção para o tamanho do invólucro, sendo $CF = 1$ para as configurações VOA e HOA dos eletrodos, $C2$ e $C3$ são variáveis auxiliares e $k1$ até $k13$ são coeficientes fornecidos nas Tabelas 3, 4 e 5 da norma (IEEE-1584, 2018), que consta no Anexo B, conforme cada nível de tensão.

Para interpolar o valor final de energia incidente para a tensão desejada devem ser aplicadas as equações a seguir:

$$E_1 = \frac{E_{2700} - E_{600}}{2,1} \times (V_{oc} - 2,7) + E_{2700} \quad (3.29)$$

$$E_2 = \frac{E_{14300} - E_{2700}}{11,6} \times (V_{oc} - 14,3) + E_{14300} \quad (3.30)$$

$$E_3 = \frac{E_1 \times (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{E_2 \times (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (3.31)$$

Onde E_1 é o primeiro termo da interpolação da energia incidente entre 600 V e 2700 V, em J/cm², E_2 é o segundo termo da interpolação usado quando a tensão de circuito

aberto é maior do que 2700 V, em J/cm², E_3 é o terceiro termo da interpolação usado quando a tensão de circuito aberto é menor do que 2700 V, em J/cm², e V_{oc} é a tensão de circuito aberto, em kV.

Quando a tensão de circuito aberto é maior do que 600 V e menor do que 2700 V, tem-se:

$$E = E_3 \quad (3.32)$$

Quando a tensão de circuito aberto é maior do que 2700 V, tem-se:

$$E = E_2 \quad (3.33)$$

E quando a tensão de circuito aberto é menor do que 600 V, tem-se:

$$E = E_{\leq 600} \quad (3.34)$$

A energia incidente em cal/cm² é obtida pela divisão de E por 4,184, já que 1 cal é igual a 4,184 J.

3.3.10 Etapa 10: Determinar a distância segura de aproximação

A distância segura de aproximação é a distância de um possível arco elétrico onde a energia incidente é de 5 J/cm² ou 1,2 cal/cm². Para calcular a distância segura de aproximação devem ser inicialmente determinados os valores intermediários através das equações a seguir:

$$DSA_{600} = 10^{\frac{k1+k2 \times (\log_{10} G) + \frac{k3 \times I_{arc600}}{C^2} + C4 + k13 \times (\log_{10} I_{arc600})}{-k12}} \quad (3.35)$$

$$DSA_{2700} = 10^{\frac{k1+k2 \times (\log_{10} G) + \frac{k3 \times I_{arc2700}}{C^2} + C4 + k13 \times (\log_{10} I_{arc2700})}{-k12}} \quad (3.36)$$

$$DSA_{14300} = 10^{\frac{k1+k2 \times (\log_{10} G) + \frac{k3 \times I_{arc14300}}{C^2} + C4 + k13 \times (\log_{10} I_{arc14300})}{-k12}} \quad (3.37)$$

$$DSA_{\leq 600} = 10^{\frac{k1+k2 \times (\log_{10} G) + \frac{k3 \times I_{arc600}}{C^2} + C4 + k13 \times (\log_{10} I_{arc})}{-k12}} \quad (3.38)$$

$$C4 = k11 \times (\log_{10} I_{bf}) + \log_{10} \frac{1}{CF} - \log_{10} \frac{20}{T} \quad (3.39)$$

Onde DSA_{600} é a distância segura de aproximação quando a tensão de circuito aberto (V_{oc}) é de 600 V, em mm, DSA_{2700} é a distância segura de aproximação quando a tensão de circuito aberto (V_{oc}) é de 2700 V, em mm, DSA_{14300} é a distância segura de aproximação quando a tensão de circuito aberto (V_{oc}) é de 14300 V, em mm, $DSA_{\leq 600}$ é a distância segura de aproximação quando a tensão de circuito aberto (V_{oc}) é ≤ 600 V, em mm, T é a duração do arco, em ms, G é o espaçamento entre os condutores, em mm, I_{arc600} é a corrente de arco eficaz com a tensão de circuito aberto de 600 V, em kA, $I_{arc2700}$ é a corrente de arco eficaz com a tensão de circuito aberto de 2700 V, em kA, $I_{arc14300}$ é a corrente de arco eficaz com a tensão de circuito aberto de 14300 V, em kA, I_{arc} é a corrente de arco eficaz com a tensão de circuito aberto ≤ 600 V, em kA, I_{bf} é a corrente de falta franca eficaz para uma falta trifásica simétrica, em kA, CF é o fator de correção para o tamanho do invólucro, sendo $CF = 1$ para as configurações VOA e HOA dos eletrodos, $C2$ e $C4$ são variáveis auxiliares, e $k1$ até $k13$ são coeficientes fornecidos nas Tabelas 3, 4 e 5 da norma IEEE-1584 (2018), que consta no Anexo B, conforme cada nível de tensão.

Para interpolar o valor final de distância segura de aproximação para a tensão desejada devem ser aplicadas as equações a seguir:

$$DSA_1 = \frac{DSA_{2700} - DSA_{600}}{2,1} \times (V_{oc} - 2,7) + DSA_{2700} \quad (3.40)$$

$$DSA_2 = \frac{DSA_{14300} - DSA_{2700}}{11,6} \times (V_{oc} - 14,3) + DSA_{14300} \quad (3.41)$$

$$DSA_3 = \frac{DSA_1 \times (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{DSA_2 \times (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (3.42)$$

Onde DSA_1 é o primeiro termo da interpolação da distância segura de aproximação entre 600 V e 2700 V, em mm, DSA_2 é o segundo termo da interpolação usado quando a tensão de circuito aberto é maior do que 2700 V, em mm, DSA_3 é o terceiro termo da interpolação usado quando a tensão de circuito aberto é menor do que 2700 V, em mm, e V_{oc} é a tensão de circuito aberto, em kV.

Quando a tensão de circuito aberto é maior do que 600 V e menor do que 2700 V, tem-se:

$$DSA = DSA_3 \quad (3.43)$$

Quando a tensão de circuito aberto é maior do que 2700 V, tem-se:

$$DSA = DSA_2 \quad (3.44)$$

E quando a tensão de circuito aberto é menor do que 600 V, tem-se:

$$DSA = DSA_{\leq 600} \quad (3.45)$$

Recomenda-se calcular um segundo conjunto de valores de duração de arco, energia incidente e limite de arco voltaico baseados na corrente de arco reduzida I_{arcmin} para considerar o efeito de variação de corrente de arco na operação de dispositivos de proteção. A energia incidente final ou o limite de arco voltaico é o maior dos dois valores calculados.

3.3.11 Fator de correção da corrente de arco

Recomenda-se calcular um segundo conjunto de valores de duração de arco, energia incidente e distância segura de aproximação baseados na corrente de arco reduzida I_{arcmin} para considerar o efeito de variação de corrente de arco na operação de dispositivos de proteção. A energia incidente final ou a distância segura de aproximação é o maior dos dois valores calculados. A variação da corrente de arco é aplicável a todas as tensões de circuito aberto do sistema dentro do intervalo válido do modelo (208 V a 15000 V), mas espera-se que tenha o maior impacto entre 208 V e 600 V.

Para determinar um limite inferior do valor da média eficaz da corrente de arco, deve ser utilizada a Equação (3.46) e para encontrar o fator de correção da variação de corrente de arco deve ser utilizada a Equação (3.47).

$$I_{arcmin} = I_{arcVoc} \times (1 - 0,5 \times VarCf) \quad (3.46)$$

Onde I_{arcmin} é uma segunda corrente de arco eficaz, reduzida com base no fator de correção da variação de corrente de arco, em kA, I_{arcVoc} é a corrente de arco eficaz média para cada uma das três tensões de circuito aberto (Voc) calculadas, em kA, e $VarCf$ é o fator de correção da variação de corrente de arco, definido pelas equações abaixo.

$$VarCf = k1 \times Voc^6 + k2 \times Voc^5 + k3 \times Voc^4 + C5 \quad (3.47)$$

$$C5 = k4 \times Voc^3 + k5 \times Voc^2 + k6 \times Voc + k7 \quad (3.48)$$

Onde $VarCf$ é o fator de correção da variação de corrente de arco, Voc é a tensão de circuito aberto, em kV, $C5$ é uma variável auxiliar, e $k1$ até $k7$ são os coeficientes fornecidos na Tabela 2 da norma IEEE-1584 (2018), que consta no Anexo B.

Para tensão de circuito aberto entre 600 V e 15000 V, o fator de correção é aplicado nos valores intermediários médios das corrente de arco, que são I_{arc600} , $I_{arc2700}$ e $I_{arc14300}$, onde o valor final I_{arc} herda o fator de correção.

Para tensão de circuito aberto entre 208 V e 600 V o fator de correção é aplicado apenas ao valor final da corrente de arco I_{arc} , sendo usado o valor original de I_{arc600} para o cálculo da segunda energia incidente e distância segura de aproximação para tensão abaixo de 600 V, pelas Equações (3.26) e (3.38), respectivamente.

3.4 Método de Doan

Usado para o cálculo de energia incidente em sistemas de corrente contínua, o método apresentado por Doan (2010) é chamado de método da máxima potência e é baseado no conceito de que a máxima potência possível em um arco em corrente contínua ocorrerá quando a tensão do arco for a metade da tensão do sistema.

Testes complementares demonstraram que essa metodologia de cálculo é altamente conservativa na estimativa da energia incidente. Este método é aplicável para sistemas de corrente contínua com tensão nominal de até 1.000 V em corrente contínua.

As equações utilizadas para determinar a corrente do arco e a energia incidente através deste método são as Equações (3.49) e (3.50), respectivamente.

$$I_{arc} = 0,5 \times I_{bf} \quad (3.49)$$

$$IE_m = 0,01 \times V_{sys} \times I_{arc} \times \frac{T_{arc}}{D^2} \quad (3.50)$$

Onde I_{arc} é a corrente do arco, em ampéres, I_{bf} é a corrente de falta franca, em ampéres, IE_m é a energia incidente estimada em um arco elétrico por corrente contínua para máxima potência, em cal/cm², V_{sys} é a tensão do sistema, em volts, T_{arc} é o tempo de duração do arco, em segundos, e D é a distância de trabalho do ponto de arco elétrico, em cm.

Caso a probabilidade de ocorrência de um arco seja no interior de um painel, este método considera prudente a utilização de equipamentos de proteção além dos indicados na tabela 130.7(C)(15)(b) da NFPA-70E (2018).

Para baterias, a corrente de falta franca dependerá do caminho da falta. Uma aproximação conservativa para determinar a corrente de falta franca que uma bateria

forneceria a uma temperatura de 25°C consiste em assumir que a máxima corrente de falta disponível é 10 vezes a corrente nominal da bateria fornecida durante 1 minuto.

Assim, percebe-se que há metodologias distintas para o cálculo de energia incidente, onde algumas faixas de aplicação se sobrepõe, sendo que a metodologia da norma IEEE-1584 (2018) é a mais atual e sua faixa de aplicação atende a maior parte das subestações industriais abrigadas, sendo, portanto, geralmente priorizado o seu uso.

4 Métodos e Dispositivos para Redução da Energia Incidente

A NFPA-70E (2018) indica que as medidas de controle para redução do risco devem obedecer preferencialmente a seguinte hierarquia: eliminação, substituição, controles de engenharia, procedimentos de trabalho, medidas administrativas e, por último, a utilização de EPI. Esta hierarquia está estampada em sua capa da versão de 2018, e é baseada no OHSAS 18001:2007, que é o padrão internacional que estabelece requisitos relacionados à Gestão da Segurança e Saúde Ocupacional. A NR-10 indica que medidas de proteção coletiva como melhor opção em detrimento ao uso de EPI. Portanto, deve ser priorizada a mitigação dos riscos associados à energia incidente atuando em sua fonte, sendo a proteção ao trabalhador com a utilização da vestimenta antichama a medida menos eficiente.

De acordo com Mardegan e Parise (2018b), as medidas mais comuns para redução da energia incidente são as seguintes:

- Diminuição do tempo de eliminação da falta;
- Diminuição da magnitude da corrente de falta;
- Utilização de relés monitores de arco;
- Evitar o escalonamento de um arco monofásico para um arco trifásico;
- Segurança em projeto, montagem, comissionamento, operação e manutenção.

4.1 Diminuição do tempo de eliminação da falta

Para a diminuição do tempo de eliminação da falta pode ser necessário o acréscimo ou substituição de equipamentos e sua aplicação depende da concepção elétrica do sistema, do tipo de aterramento, dos equipamentos existentes na planta e do valor da energia incidente.

Uma maneira de reduzir o tempo de falta é a aplicação de técnicas de seletividade cronológica, através do ajuste do tempo dos disparadores de baixa tensão abaixo da corrente de arco, utilização de disparadores com faixa de ajuste de corrente de tempo mais baixa, substituição de relés eletromecânicos por digitais, utilização de relés digitais com ajustes otimizados e a mudança de grupo de ajustes.

Outra opção é a utilização de técnica de seletividade lógica, que consiste em intertravar a atuação dos relés, onde a atuação do relé mais próximo à falta bloqueia a

atuação dos relés a montante e abre o disjuntor, eliminando a falta. Na baixa tensão, a seletividade lógica é conhecida como ZSI, *Zone Selective Interlocking*, e alguns modelos de disjuntores permitem o emprego desta técnica quando o mesmo está equipado com esta ferramenta.

Ainda pode-se reduzir o tempo de eliminação de falta com a utilização de relés com tempo definido para proteção de terra, relés diferenciais de barra ou disjuntores com menor tempo de interrupção (MARDEGAN; PARISE, 2018b).

4.2 Diminuição da magnitude da corrente de falta

A magnitude da corrente de falta por arco elétrico pode ser reduzida com a utilização de resistores de aterramento de alto valor na baixa tensão e de baixo valor em média tensão.

A utilização de disjuntores de baixa tensão equipados com WFR, *Wave Form Recognition*, ou, em português, reconhecimento da forma de onda, é uma excelente alternativa para cargas terminais, pois os mesmos atuam em um tempo muito rápido, não permitindo o crescimento da corrente de falta. Ao contrário do disjuntor ZSI, o WFR não faz comunicação com o disjuntor à montante, portanto, esta função é utilizada para disjuntores mais próximos da carga (MARDEGAN; PARISE, 2018b).

Outras possibilidades para redução das correntes de curto-circuito são a instalação de reatores de limitação, que são inseridos em série com o circuito e implicam em uma impedância a mais para o circuito durante a falta, porém, aumentando a queda de tensão no circuito em questão, a instalação de transformadores de alta impedância, que também aumenta a impedância do circuito durante a falta, mas aumentam as perdas no transformador, e a redução da potência e aumento da quantidade dos transformadores, segregando as cargas em mais painéis e barramentos, porém, isto eleva o custo da subestação. Todavia, estas ações alteram aspectos construtivos da subestação e são mais facilmente implementadas quando a subestação ainda está na fase de projeto (RESENDE, 2016).

4.3 Utilização de relés monitores de arco

Os relés sensores de arco são construídos com microprocessadores, com o objetivo de reduzir o tempo de eliminação da falta, onde a unidade de processamento processa os sinais recebidos e atua em tempos que variam de 2 a 5 ms para saída de estado sólido digitais e de 7 a 15 ms para saída a relés, normalmente são fotossensíveis e atuam quando a intensidade luminosa aumenta acima de um valor predeterminado, podendo também ser ajustado para atuar por luz e corrente alguns modelos (MARDEGAN; PARISE, 2018b).

4.3.1 Sensores de Luminosidade

Os tipos de sensores de luminosidade mais comuns são os sensores pontuais, os sensores de fibra ótica e os sensores de lapela.

Os sensores pontuais são fototransistores que transmitem as informações referentes à luminosidade detectada no interior do painel através de sinais elétricos para as entradas do relé. Este tipo de sensor possui um ponto focal, o que reduz a possibilidade do sensor atuar indevidamente devido a alguma luminosidade externa (QUEIROZ, 2011). Normalmente, são utilizados três sensores por compartimento, um para o barramento, um para o dispositivo de interrupção e outro para o cabo. Este tipo de sensor possui alta sensibilidade e sua faixa de captação pode abranger 4 m e possuir função de supervisão de integridade (MARDEGAN; PARISE, 2018b).

O sensor de fibra ótica realiza a detecção de luz através de toda a sua superfície, possuindo a vantagem de poder cobrir uma área extensa de um painel através de um enlace único. Porém, dada à extensão da fibra ótica, ela pode vir a sofrer danos devido a dobras e pressões, podendo inviabilizar sua utilização em alguns equipamentos. Para que a fibra ótica detecte a luz apenas em pontos definidos, a mesma deve ficar coberta em toda sua extensão, sendo exposta somente na área onde é desejada a detecção (QUEIROZ, 2011).

O sensor de lapela, é um acessório do relé de arco e o operador da subestação que trabalha a exposto aos riscos do arco elétrico é quem deve utilizá-lo, ficando o sensor em sua roupa, com a outra extremidade conectada ao relé (MARDEGAN; PARISE, 2018b).

A escolha do tipo de sensor adequado para a instalação depende da aplicação, o enlace utilizando os sensores de fibra ótica é menos custoso do que a utilização de sensores pontuais quando a instalação envolve painéis e CCM com múltiplos compartimentos. Já o sensor pontual possui uma fácil instalação em painéis existentes e podem fornecer o local exato de onde ocorreu a falta, já que são instalados individualmente em cada compartimento (QUEIROZ, 2011).

4.3.2 Unidade de Processamento

De acordo com Queiroz (2011), os sensores luminosos podem ser conectados e transferir informações para três tipos de dispositivos distintos, uma unidade de detecção de arco, um sistema dedicado exclusivamente para a proteção contra arco elétrico ou relés de proteção numéricos com detecção de arco integrada.

As unidades de detecção de arco representam a solução mais simples e econômica porque utilizam apenas o critério da luz emitida pelo arco elétrico para prover proteção para a instalação. Essa unidade é responsável por processar os sinais emitidos pelos sensores e, por meio dos seus contatos de saída, comandar a abertura do disjuntor do circuito envolvido na falta. A sensibilidade do relé à luz pode ser ajustada manualmente

ou automaticamente, onde esta última ajusta continuamente sua sensibilidade de modo que a luz proveniente da abertura da porta de um compartimento, por exemplo, não seja identificada como originada por um arco elétrico e cause um desarme indevido.

O sistema para proteção contra arco elétrico difere-se das unidades de detecção de arco por possuir recursos de operação e seletividade, tornando o sistema de proteção contra arco elétrico mais abrangente e versátil. O comando de desarme pode ser emitido somente com a detecção de luz ou incorporar junto à detecção de luz a função de sobrecorrente, porém, isto gera um atraso de aproximadamente 2 ms no tempo de funcionamento do relé. A seletividade pode ser conseguida pela divisão da operação por zonas e da transferência do sinal de trip entre as unidades de detecção de arco.

Os relés de proteção numéricos podem possuir o recurso para detecção de arco, sendo dotados de entradas opcionais para os sensores luminosos que pode ser combinada ainda com elementos para detecção de sobrecorrente de fase e neutro, que possuem um sistema de filtragem distinto das funções utilizadas normalmente para correntes de curto-circuito, onde é utilizada uma taxa de amostragem de 16 amostras por ciclo, que são comparadas com valores previamente ajustados e, no caso de duas amostras possuírem valores superiores a estes, o relé emite um sinal de função atuada, que é tratado posteriormente pela lógica estabelecida no relé. As informações provenientes dos sensores luminosos e da função de sobrecorrente instantânea de alta velocidade passam por uma lógica *AND* para que o relé só emita o sinal de trip quando realmente ocorrer um arco elétrico no interior do painel.

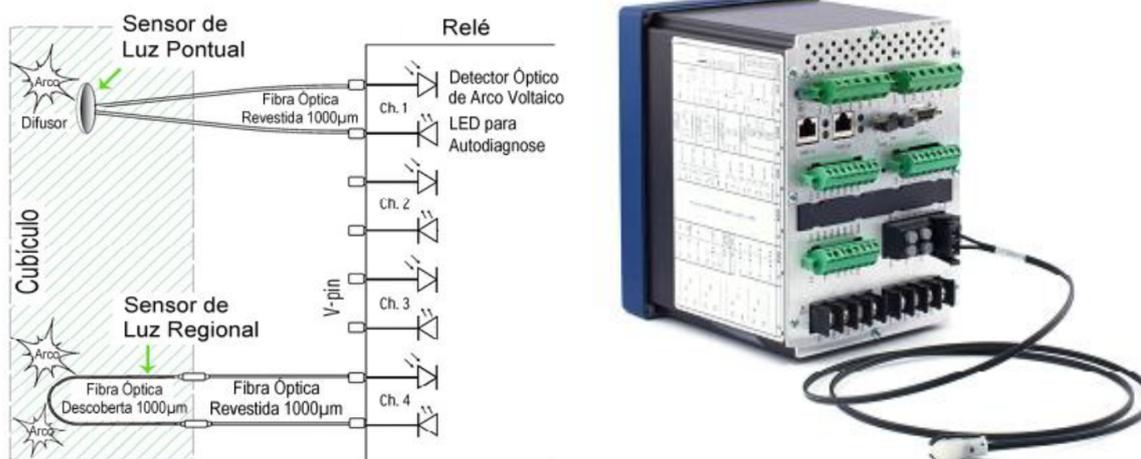
Outro recurso disponível nos relés digitais é a oscilografia, que permite identificar, por meio de gráficos, o comportamento do sistema elétrico durante a ocorrência de um curto-circuito. A oscilografia também pode detectar o comportamento da luz emitida por um arco elétrico. Uma alternativa para proteção contra arco elétrico é utilizar sensores que combinam a detecção de luz e som, ao invés de luz e corrente, tornando a instalação mais simples. A diferença entre a velocidade da luz e do som gera um atraso de tempo único, suficiente para diferenciar um evento de arco elétrico de outras fontes de luz e som. Para isso, é utilizado um sensor capaz de detectar a luz e o som simultaneamente e o tempo requerido para o sensor detectar o arco elétrico e emitir o sinal de desligamento é de aproximadamente 1 ms.

Outra forma de prover maior segurança contra os efeitos do arco elétrico é configurar, no relé de proteção digital, grupos de ajustes para manutenção e manobras em equipamentos elétricos. Por meio do acionamento de um botão ou chave local, por meio de comunicação remota ou utilizando a IHM do próprio relé, é possível selecionar um grupo de ajustes configurado somente com a proteção de sobrecorrente instantânea, eliminando qualquer atraso intencional, fazendo com que o disjuntor atue no menor tempo possível e evite que a energia incidente liberada atinja valores muito elevados. Embora esta seja uma solução de baixo custo, esse grupo de ajustes compromete a coordenação e seletividade do sistema

de proteção, pois inibe o recurso de temporização, devendo ser utilizado apenas enquanto os trabalhadores realizarem manutenções ou manobras próximas a instalações energizadas.

A Figura 16 mostra o esquema de funcionamento da proteção contra arco elétrico com a utilização de sensores pontuais e regionais, de fibra ótica, e uma foto de um relé detector de arco com sensor pontual conectado.

Figura 16 – Princípio de funcionamento e foto de um relé detector de arco.



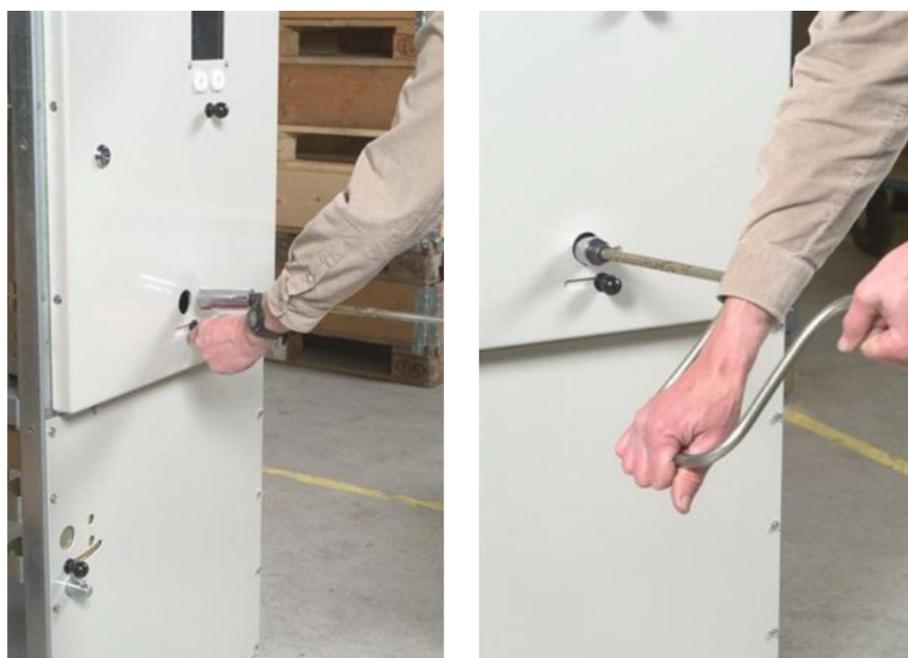
Fonte: adaptado de Resende (2016).

4.3.3 Segurança em projeto, montagem, comissionamento, operação e manutenção

A implementação das etapas anteriores exige que estas técnicas sejam implementadas preferencialmente na etapa de projeto, onde se idealizam estas técnicas, sendo estas implementadas na etapa de montagem, testando-se sua eficácia na etapa de comissionamento, na etapa de operação treinam-se as pessoas e uma correta manutenção mantém esses sistemas em condições operacionais (MARDEGAN; PARISE, 2018b).

Um exemplo deste tipo de medida de segurança é o uso de portas frontais fechadas ou de barreira de interposição, que oferece uma proteção mecânica para a redução dos impactos térmicos e físicos, gerados pela ocorrência de um arco, como exemplificado na Figura 17.

Figura 17 – Movimentação de disjuntor extraível com a porta fechada

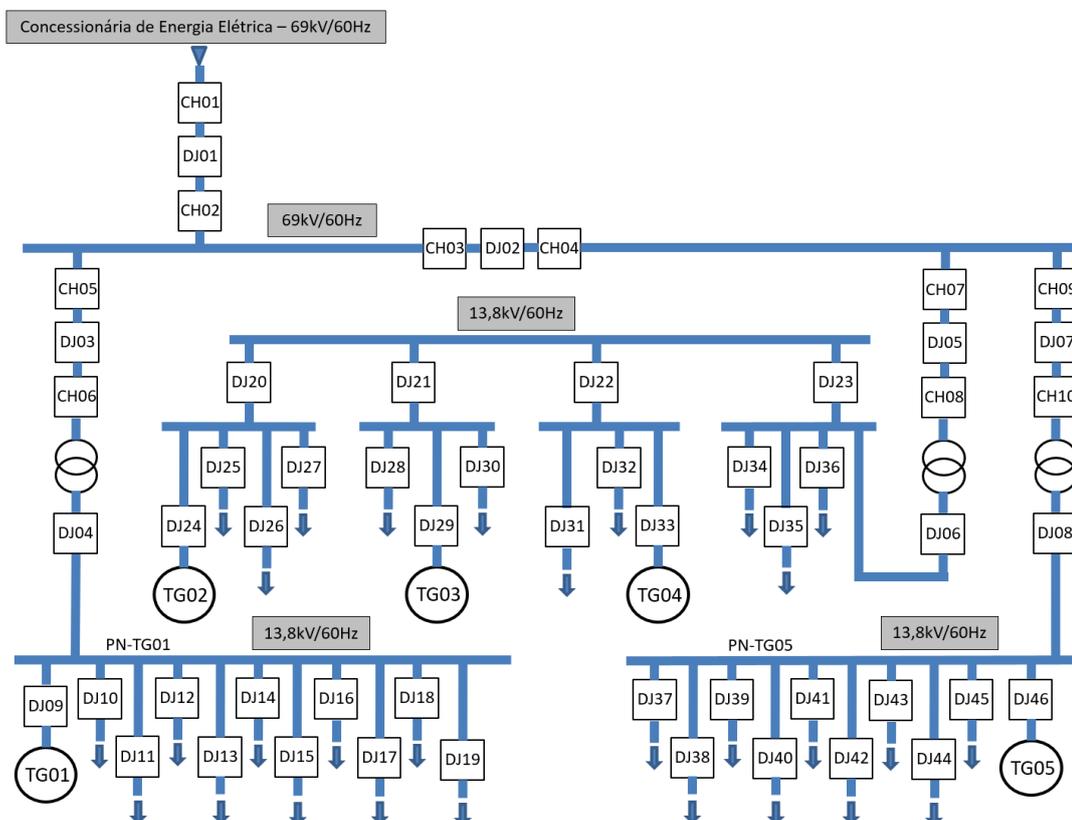


Fonte: adaptado de Costa (2014).

5 Estudo de Caso

Para o estudo de caso, foi escolhida uma subestação real cujo diagrama elétrico simplificado está no Anexo A. Esta subestação faz parte do sistema elétrico mostrado de forma simplificada na Figura 18, que possui sistema de geração próprio trifásico em 13,8 kV, composto por 5 geradores, sendo três com capacidade de gerar 7,2 MW cada um, um capaz de gerar 23 MW e o último capaz de gerar 27 MW, havendo também a possibilidade de compra de energia da concessionária em 69 kV.

Figura 18 – Sistema elétrico simplificado ao qual a subestação em análise pertence



Fonte: adaptado de Moraes (2017).

A subestação em análise possui duas fontes de alimentação em 13,8 kV, sendo uma fornecida pelo barramento PN-TG01 e outra pelo PN-TG05, com transformadores de variadas potências que rebaixam os níveis de tensão para 4,16 kV e 480 V, retificador para 125 V em corrente contínua, banco de baterias e as principais cargas da instalação são motores, contendo também alguns painéis que alimentam a iluminação da unidade.

Devido aos níveis de tensão contidos na subestação e de acordo com as limitações de cada metodologia, mostradas na Tabela 1, será utilizada a metodologia de cálculo de energia incidente da norma IEEE 1584.

Para realização dos cálculos necessários para o estudo de energia incidente, foi desenvolvida uma planilha no *Microsoft Excel*, usando como base o modelo disponibilizado na IEEE1584:2002, porém, sendo realizadas as adaptações para a versão atual da norma IEEE1584:2018. Para correta utilização da planilha, os seguintes dados devem ser preenchidos:

- Nomenclatura do painel;
- Tensão do barramento, em kV;
- Tipo de painel: CCM ou CDC;
- Altura, largura e profundidade do invólucro onde possivelmente ocorria o arco elétrico, em mm;
- Configuração dos eletrodos: VCB, VCBB, HCB, VOA, HOA, representados pelos números de 1 a 5 respectivamente;
- Corrente de curto-circuito, em kA;
- Porção da corrente de curto-circuito que flui através do dispositivo de proteção, em kA;
- Tempo de abertura: tempo que o dispositivo de proteção leva fisicamente para abrir, não contemplando o tempo de atuação, em segundos;
- Tempo de atuação: tempo que o dispositivo leva para emitir o comando de abrir, determinado através do estudo de coordenação e seletividade. Este tempo deve ser obtido no coordenograma utilizando o valor da corrente de arco que flui através do dispositivo de proteção, fornecido pela planilha.

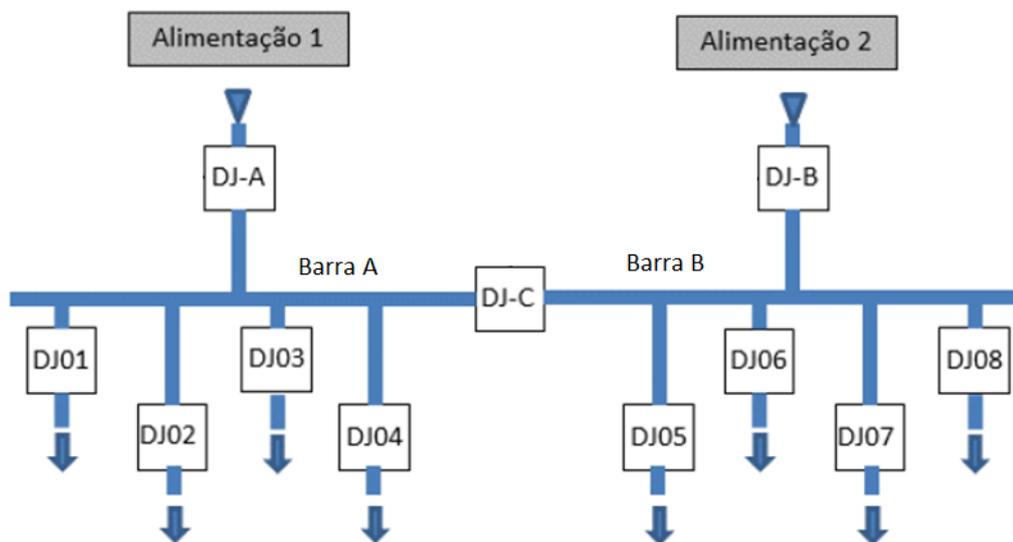
Conforme o tipo de dado da célula ela recebe uma cor de plano de fundo com as seguintes possibilidades:

- Amarelo: dados que devem ser inseridos pelo usuário;
- Branco: dados que podem ser inseridos pelo usuário ou a planilha busca a informação em tabelas padronizadas pela norma;
- Verde: valor calculado pela planilha;
- Azul: dados que devem ser inseridos pelo usuário com base em algum resultado fornecido pela planilha.

5.1 Características gerais da planta

Os barramentos dos CDC são conectados na topologia barra simples com disjuntor de interligação, conforme exemplo da Figura 19, onde um lado da barra é chamado de "barra A" e o outro lado de "barra B". Cada barra pode ser alimentada por uma das fontes de alimentação, estando os dois disjuntores de alimentação fechados e com o disjuntor de interligação aberto, na configuração chamada de "duplo I", ou as duas barras podem ser interligadas e isoladas de uma das fontes de alimentação, estando um dos disjuntores de alimentação aberto, o outro fechado e o disjuntor de interligação fechado, operando na configuração chamada de "L". Os painéis não são operados com o disjuntor de interligação e os dois disjuntores de alimentação fechados ao mesmo tempo, portanto, não ficam dois alimentadores em operação ao mesmo tempo em uma mesma barra. As únicas exceções são os painéis que possuem gerador conectados em sua barra, que podem operar alimentados apenas pelo gerador, apenas pelo sistema elétrico da planta ou por ambas alimentações ao mesmo tempo.

Figura 19 – Exemplo de topologia barra simples com disjuntor de interligação.



Fonte: adaptado de Moraes (2017).

Apesar das barras "A" e "B" dos CDC estarem no interior do mesmo painel, que possui uma única nomenclatura, elas podem apresentar resultados de energia incidente diferentes, e, portanto, será adotada a nomenclatura do painel com o sufixo referente à barra para a análise.

5.2 Configuração dos eletrodos

Os disjuntores dos CDC em geral são extraíveis, ou seja, permanecem no local, porém com seus conectores afastados dos barramentos de modo a seccionar o circuito a jusante, quando em posição "extraído". De acordo com o anexo C da IEEE 1584, se um disjuntor estiver presente, mas os conectores do disjuntor não estiverem seguramente conectados a um pino, para um arco se afastando da fonte de suprimento, o HCB pode parecer a melhor solução. Mas como o arco não pode ser projetado diretamente para o trabalhador, o VCBB é uma solução melhor quando o disjuntor está na posição "extraído". A distância de arco para o trabalhador é medida a partir do ponto em que a barra se conecta ao disjuntor, cerca de 30,48 cm atrás da parte frontal do painel e mais 45,7 cm do tronco do trabalhador. Caso o disjuntor esteja na posição "inserido" ou em operação, e ocorre uma falta interna, como por exemplo, quando os contatos não são capazes de interromper a falta, o arco irrompe para cima, sendo a configuração VCB a melhor solução. Desta forma, a configuração VCBB caracteriza o pior cenário para os CDC com disjuntores extraíveis.

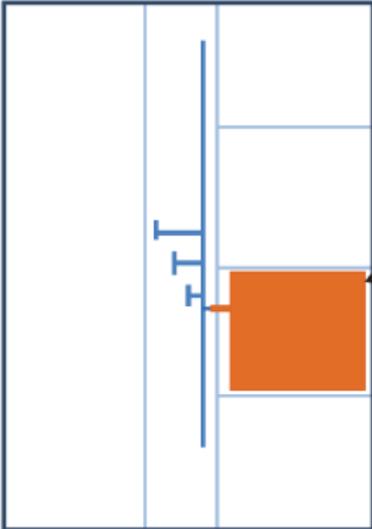
Em CCM, o arco pode ocorrer no compartimento dos barramentos, nas unidades do CCM ou no compartimento principal. Os barramentos são posicionados na vertical, portanto, uma falta no compartimento dos barramentos, podendo ser causada por conectores mal encaixados, por exemplo, causaria um arco que tenderia a se propagar para baixo ao longo do barramento e para longe da fonte de alimentação, sendo VCB a melhor aproximação. Faltas em uma unidade do CCM podem ocorrer em qualquer lugar do compartimento e devem se propagar para os terminais laterais, sendo VCBB a melhor aproximação. Faltas no compartimento principal ocorreriam no dispositivo ou chave de proteção, ocorrendo de modo semelhante ao que ocorre nos CDC, sendo VCBB a melhor aproximação. Portanto, a configuração VCBB também caracteriza o pior cenário para os CCM.

A Tabela 8 mostra desenhos de disjuntores de CDC e CCM conectados em barramentos verticais.

5.3 Características dos painéis

Os níveis de tensão dos barramentos foram obtidos através dos unifilares da subestação e as dimensões dos invólucros através dos desenhos construtivos dos painéis. A Figura 20 mostra os dados dos painéis que serão analisados, onde os espaçamento entre os condutores e a distância de trabalho foram determinadas através da Tabela 4 e Tabela 6, respectivamente.

Tabela 8 – Exemplo de cada categoria de vestimenta antichamas.

Tipo de painel	Imagem demonstrativa	Descrição
CDC		Disjuntor extraível conectado em barramentos de alimentação verticais. Conectores e barramentos de carga não estão desenhados.
CCM		Cabo de alimentação terminado nos barramentos verticais com quatro disjuntores conectados

Fonte – adaptado de IEEE-1584 (2018).

5.4 Estudo de curto-circuito

Para o estudo de curto-circuito foi utilizado o *software* PTW, que significa *Power Tools for Windows*, da empresa SKM, em sua versão 7.0.3.4, onde foi considerada a norma IEC-60909 como referência para os cálculos. Foram utilizados os módulos DAPPER, para a realização do estudo de curto-circuito, e CAPTOR, para coordenação e seletividade das proteções.

O sistema elétrico da subestação foi montado no programa e os dados de seus componentes foram inseridos, conforme descrito na Etapa 1 da metodologia da IEEE 1584.

Figura 20 – Dados dos painéis em análise.

Nome do barramento	Tensão do barramento em kV	Configuração dos eletrodos	Classe do equipamento	Largura em mm	Altura em mm	Profundidade em mm	Espaçamento em mm	Distância de trabalho em mm
PN-01A	13,8	VCBB	CDC	800	1135	900	153	914
PN-01B	13,8	VCBB	CDC	800	1135	900	153	914
PN-02A	4,16	VCBB	CDC	400	750	500	102	914
PN-02B	4,16	VCBB	CDC	400	750	500	102	914
PN-03A	0,48	VCBB	CDC	800	750	500	32	610
PN-03B	0,48	VCBB	CDC	800	750	500	32	610
PN-04A	0,48	VCBB	CCM	437	215	460	25	457
PN-04B	0,48	VCBB	CCM	437	215	460	25	457
PN-04C	0,48	VCBB	CCM	437	215	460	25	457
PN-05	0,48	VCBB	CCM	420	290	450	25	457
PN-06A	0,48	VCBB	CCM	420	290	450	25	457
PN-06B	0,48	VCBB	CCM	420	290	450	25	457
PN-07	0,48	VCBB	CCM	600	1200	250	25	457

Fonte: elaborado pelo autor.

Com base na norma IEC-60909 e conforme as características da planta foram encontradas as correntes de curto-circuito máximas com as seguintes condições:

- Todos os geradores do sistema em operação;
- Todas as cargas em operação;
- Painéis com as barras na configuração "L".

E as correntes de curto-circuito mínimas com as seguintes condições:

- O gerador mais próximo da barra em análise fora de operação;
- As cargas não essenciais para o funcionamento da planta desligadas;
- Painéis com as barras na configuração "duplo I".

Conforme IEC-60909 (2016), cargas não motóricas não foram consideradas para o cálculo das correntes de curto-circuito.

Para o estudo de curto-circuito foram determinados os valores das correntes de curto-circuito trifásico máximo e mínimo no barramento. Também foram obtidos os valores máximos e mínimos das correntes de curto-circuito trifásico passante nos dispositivos de proteção, sendo que serão estes valores que determinarão o tempo de atuação do dispositivo de proteção e, conseqüentemente, a interrupção do arco.

A corrente de curto-circuito no barramento pode ser maior do que a corrente de curto-circuito passante no dispositivo de proteção devido à contribuição das cargas motóricas, portanto, para o cálculo da corrente de arco foi utilizada a corrente de curto-circuito no barramento.

A partir do valor das correntes de curto-circuito máxima e mínima passante no dispositivo de proteção foram analisadas as curvas de tempo x corrente, também conhecida como coordenograma, dos dispositivos de proteção de cada barramento, para determinar o tempo de interrupção do arco, sendo somados os tempos de acionamento e abertura do dispositivo. Os disjuntores dos barramentos geralmente possuem relés de sobrecorrente instantâneo, ANSI 50, e relés de sobrecorrente temporizado, ANSI 51, ou relé térmico, ANSI 49, havendo a possibilidade de o tempo de interrupção do arco ser maior quando considerada a corrente de curto-circuito mínima do que na máxima, o que também pode resultar em um maior valor de energia incidente quando é considerado o valor de corrente de curto-circuito mínima.

Os resultados obtidos no estudo de curto-circuito trifásico estão apresentados na Figura 21.

Figura 21 – Resultados obtidos no estudo de curto circuito trifásico de cada barramento.

PAINEL	CC 3F (kA) max	CC 3F (kA) min	CC 3F passante proteção (kA) max	CC 3F passante proteção (kA) min
PN-01A	17,563	10,740	16,899	10,257
PN-01B	19,776	10,392	19,115	10,150
PN-02A	10,950	9,310	8,409	7,562
PN-02B	10,950	8,339	8,409	7,546
PN-03A	32,158	30,217	30,380	29,091
PN-03B	32,158	29,659	30,380	29,006
PN-04A	30,253	28,565	30,253	28,565
PN-04B	28,596	27,659	28,596	27,659
PN-04C	30,253	28,565	30,253	28,565
PN-05	29,939	28,292	29,939	28,292
PN-06A	30,377	10,229	29,252	9,283
PN-06B	30,377	27,961	29,252	27,306
PN-07	13,616	13,531	13,616	13,531

Fonte: elaborado pelo autor.

6 Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos aplicando a metodologia de cálculo de energia incidente da norma IEEE-1584 (2018) para a subestação apresentada no estudo de caso, bem como sugestões para redução dos níveis de energia incidente e uma comparação entre os resultados obtidos pela aplicação das metodologias das versões de 2002 e 2018 da norma IEEE-1584.

6.1 Resultados Obtidos

Os resultados obtidos para o cálculo da corrente de arco passante no dispositivo de proteção, em faltas trifásicas, e os tempos de atuação e abertura dos dispositivos de proteção estão indicados na Figura 22.

Figura 22 – Valores da corrente de arco que flui pelo dispositivo de proteção, tempo de atuação e tempo de abertura das proteções.

Nome do barramento	Tensão do barramento em kV	Corrente de falta franca no barramento em kA	Porção da corrente de falta franca que flui através do dispositivo de proteção em kA	I _{arc} em kA	Tempo de atuação em s	Tempo de abertura em s
PN-01A	13,8	17,563	16,899	16,124	0,1	0,08
PN-01B	13,8	19,776	19,115	18,222	0,1	0,08
PN-02A	4,16	10,95	8,409	7,601	0,3	0,08
PN-02B	4,16	10,95	8,409	7,601	0,3	0,08
PN-03A	0,48	32,158	30,38	23,816	0,3	0,05
PN-03B	0,48	32,158	30,38	23,816	0,3	0,05
PN-04A	0,48	30,253	30,253	24,305	0,1	0,025
PN-04B	0,48	28,596	28,596	23,110	0,1	0,025
PN-04C	0,48	30,253	30,253	24,305	0,1	0,025
PN-05	0,48	29,939	29,939	24,082	0,1	0,025
PN-06A	0,48	30,377	29,252	23,490	0,1	0,025
PN-06B	0,48	30,377	29,252	23,490	0,1	0,025
PN-07	0,48	13,616	13,616	11,069	0	0,02

Fonte: elaborado pelo autor.

Os disjuntores de todos os painéis serão acionados pela proteção de sobrecorrente instantânea dos relés, para o valor de corrente que flui através do disjuntor na ocorrência de um arco elétrico.

A Figura 23 apresenta os resultados obtidos pelo cálculo da corrente de arco reduzida, obtida através da aplicação do fator de correção da corrente de arco.

Figura 23 – Valores da corrente de arco que flui pelo dispositivo de proteção, tempo de atuação e tempo de abertura das proteções considerando a corrente de arco reduzida.

Nome do barramento	Tensão do barramento em kV	Corrente de falta franca no barramento em kA	Porção da corrente de falta franca que flui através do dispositivo de proteção em kA	Iarc min em kA	Tempo de atuação na corrente reduzida em s	Tempo de abertura na corrente reduzida em s
PN-01A	13,8	17,563	16,899	15,818	0,1	0,08
PN-01B	13,8	19,776	19,115	17,877	0,1	0,08
PN-02A	4,16	10,95	8,409	7,437	0,3	0,08
PN-02B	4,16	10,95	8,409	7,437	0,3	0,08
PN-03A	0,48	32,158	30,38	20,997	0,3	0,05
PN-03B	0,48	32,158	30,38	20,997	0,3	0,05
PN-04A	0,48	30,253	30,253	21,428	0,1	0,025
PN-04B	0,48	28,596	28,596	20,374	0,1	0,025
PN-04C	0,48	30,253	30,253	21,428	0,1	0,025
PN-05	0,48	29,939	29,939	21,231	0,1	0,025
PN-06A	0,48	30,377	29,252	20,709	0,1	0,025
PN-06B	0,48	30,377	29,252	20,709	0,1	0,025
PN-07	0,48	13,616	13,616	9,759	0	0,02

Fonte: elaborado pelo autor.

Como pode ser observado comparando as Figuras 22 e 23, os tempo de atuação das proteções não se alteraram. Isto ocorre devido aos disjuntores ainda estarem sendo acionados pela proteção de sobrecorrente instantânea dos relés para os valores de corrente reduzida que flui através do disjuntor na ocorrência de um arco elétrico. Portanto, os maiores valores de energia incidente são encontrados utilizando a corrente de arco e não a corrente de arco reduzida.

A Figura 24 apresenta os resultados obtidos nos cálculos do fator de correção pelo tamanho do invólucro, o maior valor de energia incidente calculado para cada painel, em J/cm^2 e em cal/cm^2 , a distância segura de aproximação (AFB), em mm, onde a energia incidente será menor do que $5 J/cm^2$ ou $1,2 cal/cm^2$, e a categoria de EPI necessária para proteção do trabalhador.

Figura 24 – Resumo dos resultados do cálculo de energia incidente.

Nome do barramento	Tensão do barramento em kV	Fator de Correção do tamanho do invólucro (CF)	E max em J/cm ²	E max em cal/cm ²	AFB max em mm	Categoria de EPI
PN-01A	13,8	1,265	25,415	6,074	2393	2
PN-01B	13,8	1,265	28,755	6,873	2576	2
PN-02A	4,16	1,076	27,769	6,637	2439	2
PN-02B	4,16	1,076	27,769	6,637	2439	2
PN-03A	0,48	1,141	64,803	15,488	2507	3
PN-03B	0,48	1,141	64,803	15,488	2507	3
PN-04A	0,48	1,000	39,963	9,551	1439	3
PN-04B	0,48	1,000	37,755	9,024	1395	3
PN-04C	0,48	1,000	39,963	9,551	1439	3
PN-05	0,48	1,000	39,548	9,452	1431	3
PN-06A	0,48	1,000	40,126	9,590	1442	3
PN-06B	0,48	1,000	40,126	9,590	1442	3
PN-07	0,48	1,163	2,255	0,539	294	0

Fonte: elaborado pelo autor.

6.2 Análise dos resultados sugestões para redução dos níveis de energia incidente

Os uniformes dos trabalhadores que atuam em painéis elétricos na empresa onde se localiza a subestação analisada possuem proteção contra arco elétrico categoria 2, e, adicionalmente, as vestimentas antichama acima deste nível de proteção podem ser desconfortáveis e prejudicar a mobilidade do trabalhador, podendo até se tornar causa de acidentes. Desta forma, o valor de 8 cal/cm² é um valor de energia incidente razoável do ponto de vista prático e serão propostas medidas para reduzir os níveis de energia incidente para valores inferiores a este.

Os barramentos do PN-03A, PN-03B, PN-04A, PN-04B, PN-04C, PN-05, PN-06A e PN-06B apresentaram níveis de energia incidente superiores a 8 cal/cm² e, portanto, serão analisados alguns métodos para redução de energia incidente nestes painéis.

Um dos modos menos onerosos para redução dos níveis de energia incidente é a diminuição do tempo de eliminação da falta através da redução do tempo de atuação das proteções, porém, isto iria comprometer a coordenação de seletividade das proteções, portanto, este método não será avaliado para aplicação nos painéis em análise.

Os métodos para a redução da corrente de curto-circuito, em geral, requerem a substituição ou adição de equipamentos na subestação, o que é mais indicado de ser feito

na etapa de projeto da subestação. Como a subestação em análise já se encontra em operação, este método também não será avaliado.

A instalação de relés monitores de arco no painel não compromete a coordenação de seletividade das proteções e, devido ao seu tempo de atuação ser muito rápido, reduz drasticamente os níveis de energia incidente nos painéis. A utilização de sensores de luminosidade para detecção do arco torna o tempo de atuação do dispositivo de proteção dependente apenas do tempo de atuação do relé de proteção contra arco e não mais da corrente passante no dispositivo de proteção no momento do arco, eliminando a necessidade de análise do coordenograma e dos cálculos de o valor de corrente de arco mínima, sendo o pior caso sempre quando a corrente de falta franca do painel é máxima.

Serão analisadas as mudanças nos níveis de energia incidente se fosse implementando o relé de proteção contra arco da família VAMP, do fabricante *Schneider Electric*, que, segundo site do fabricante, possui um tempo de atuação de 7 ms. Os resultados obtidos com a utilização deste relé de proteção contra arco são mostrados na Figura 25.

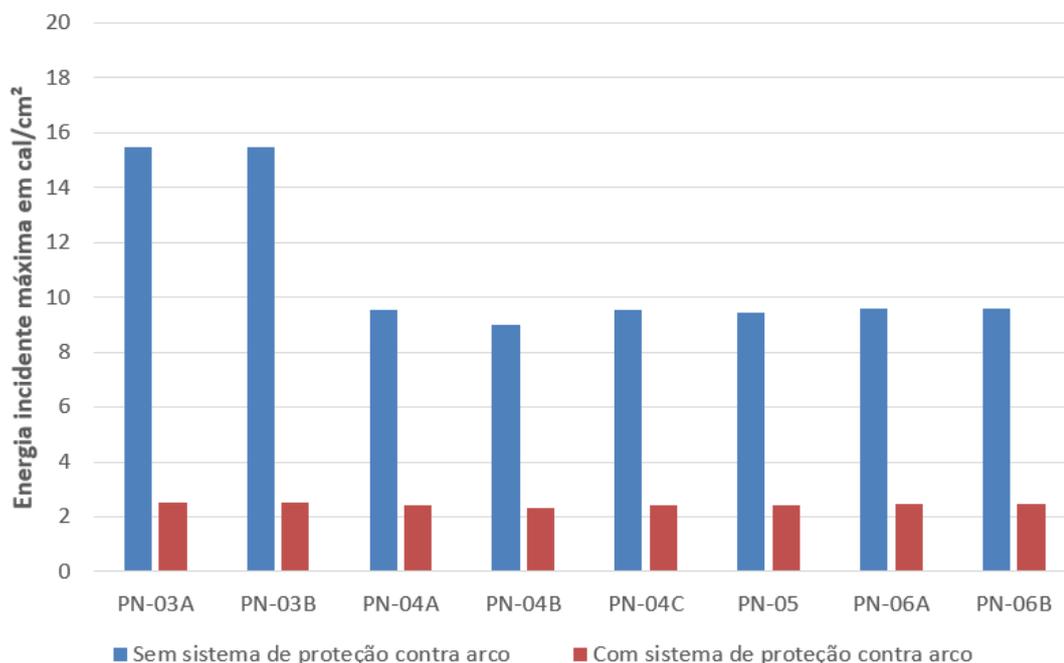
Figura 25 – Resultados obtidos com a utilização de relé de proteção contra arco elétrico.

Nome do barramento	Tensão do barramento em kV	Corrente de falta franca no barramento	Tempo de atuação em s	Tempo de abertura em s	E max em cal/cm ²	AFB max em mm	Categoria de EPI
PN-03A	0,48	32,158	0,007	0,05	2,522	919	1
PN-03B	0,48	32,158	0,007	0,05	2,522	919	1
PN-04A	0,48	30,253	0,007	0,025	2,445	678	1
PN-04B	0,48	28,596	0,007	0,025	2,310	657	1
PN-04C	0,48	30,253	0,007	0,025	2,445	678	1
PN-05	0,48	29,939	0,007	0,025	2,420	674	1
PN-06A	0,48	30,377	0,007	0,025	2,455	679	1
PN-06B	0,48	30,377	0,007	0,025	2,455	679	1

Fonte: elaborado pelo autor.

Como pode ser observado na Figura 25, a análise de todos os painéis resultou em níveis de energia incidente menores do que 8 cal/cm², conforme desejado. A Figura 26 mostra uma comparação entre os resultados obtidos para a energia incidente máxima em cada painel, com o sistema de proteção atual e com a instalação do sistema de proteção contra arcos elétricos. Percebe-se uma maior variação nos painéis PN-03A e PN-03B, devido a eles possuírem um tempo de atuação do dispositivo de proteção maior do que os demais painéis, sendo que com a utilização de relé de proteção contra arco elétrico este tempo é igualado em 7 ms.

Figura 26 – Comparação entre a energia incidente máxima em cada painel sem e com a utilização de relé de proteção contra arco elétrico.



Fonte: elaborado pelo autor.

6.3 Resultado obtido com a aplicação da versão de 2002 da norma IEEE 1584 e comparação com o resultado da versão de 2018

Aplicando os dados apresentados nas Figuras 20 e 21 na planilha para cálculo de energia incidente disponibilizada pela norma IEEE 1584 versão de 2002, obtêm-se os resultados apresentados na Figura 27. Um dado adicional exigido pela metodologia da versão de 2002 é o tipo de aterramento, onde a planta possui o secundário dos transformadores conectados em "estrela" com o neutro solidamente aterrado para tensão abaixo de 1000 V, representado pelo valor "1" na planilha, e aterrado por resistor de baixa impedância, de forma a limitar a corrente de curto circuito em 400 A, para tensão acima de 1000 V, representado pelo valor "2" na planilha.

Uma comparação entre os resultados obtidos aplicando as metodologias de cálculo da versão de 2002 e 2018 da norma IEEE pelo ser observado na Figura 28.

Analisando a Figura 28 percebe-se que o valor de energia incidente resultante da aplicação da metodologia de cálculo da versão de 2002 da norma IEEE 1584 é um pouco inferior do que o resultado da versão de 2018 para os painéis em análise.

Figura 27 – Resultados obtidos pela aplicação da norma IEEE 1584 versão de 2002.

Nome do barramento	Tensão no barramento kV	Corrente de falta franca kA	Corrente de arco total kA	Aterramento 1 ou 2	Corrente de arco no dispositivo de proteção kA	Tempo de interrupção do arco seg	Tempo de interrupção do arco na corrente reduzida seg	Energia incidente cal/cm ²	Distância segura de aproximação mm	EPI segundo NFPA 70E Categoria
PN-01A	13,8	17,563	16,88	2	16,25	0,18	0,18	5,3	4200	2
PN-01B	13,8	19,776	18,97	2	18,34	0,18	0,18	6,0	4781	2
PN-02A	4,16	10,95	10,61	2	8,15	0,38	0,38	6,0	4731	2
PN-02B	4,16	10,95	10,61	2	8,15	0,38	0,38	6,0	4731	2
PN-03A	0,48	32,158	16,66	1	15,74	0,35	0,35	12,8	3041	3
PN-03B	0,48	32,158	16,66	1	15,74	0,35	0,35	12,8	3041	3
PN-04A	0,48	30,253	16,88	1	16,88	0,13	0,13	7,4	1375	2
PN-04B	0,48	28,596	16,09	1	16,09	0,13	0,13	7,0	1332	2
PN-04C	0,48	30,253	16,88	1	16,88	0,13	0,13	7,4	1375	2
PN-05	0,48	29,939	16,73	1	16,73	0,13	0,13	7,3	1367	2
PN-06A	0,48	30,377	16,94	1	16,31	0,13	0,13	7,4	1378	2
PN-06B	0,48	29,939	16,73	1	16,73	0,13	0,13	7,3	1367	2
PN-07	0,48	13,616	8,54	1	8,54	0,02	0,02	0,6	287	0

Fonte: elaborado pelo autor.

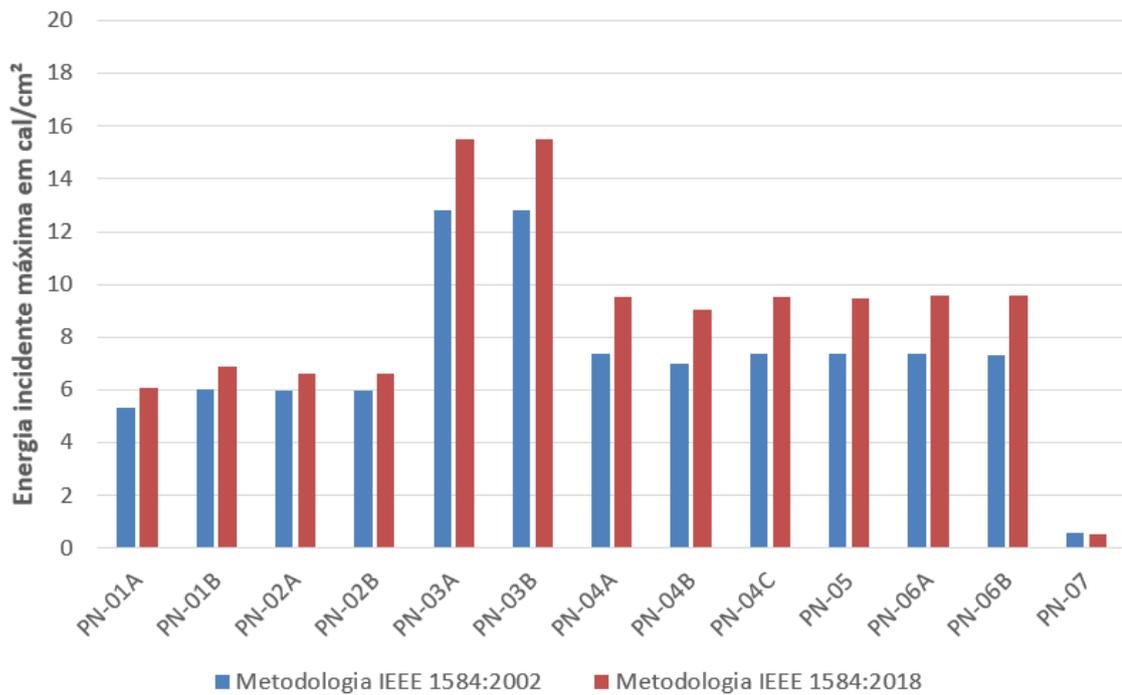
Um aspecto que causa diferença entre os valores resultantes da aplicação da metodologia da versão de 2018 da norma é o fator de correção do tamanho do invólucro, que não era considerado na metodologia da versão de 2002.

Percebe-se também uma diferença maior entre os resultados dos painéis PN-03A, PN-03B, PN-04A, PN-04B, PN-04C, PN-05, PN-06A e PN-06B do que entre os painéis PN-01A, PN-01B, PN-02A e PN-02B. Isto ocorre devido aos primeiros serem alimentados por transformador com o secundário solidamente aterrado, o que resulta em níveis mais baixos de energia incidente quando aplicado o método da versão de 2002 da norma IEEE-1584. O tipo de aterramento foi excluído da versão de 2018 da norma por não apresentar mudanças significativa nos ensaios realizados para a formulação da nova metodologia, segundo IEEE-1584 (2018).

Analisando o gráfico da Figura 8, percebe-se também que a metodologia da norma IEEE-1584 (2018) apresenta, para configuração de eletrodo VCBB, energia incidente resultante levemente superior para corrente de falta entre aproximadamente 20 kA e 55 kA, e levemente inferior para corrente de falta abaixo de 20 kA, se comparada com a versão de 2002 da norma, o que também contribui para as diferenças encontradas, considerando que o gráfico da Figura 8 representa apenas uma comparação qualitativa e não considera outros fatores que afetam o resultado final da energia incidente, em ambas as normas, como o tipo de aterramento na metodologia de 2002 e o fator de correção do tamanho do invólucro na metodologia de 2018.

Através desta comparação entre os resultados obtidos utilizando as metodologias da versão de 2002 e 2018 da norma IEEE-1584 para o cálculo de energia incidente é notável

Figura 28 – Comparação entre os resultados obtidos aplicando as metodologias de cálculo da versão de 2002 e 2018 da norma IEEE.



Fonte: elaborado pelo autor.

que a recente atualização da norma trás alterações significativas para a subestação em análise, havendo inclusive a alteração de categoria de EPI necessário para a execução de trabalho com os painéis PN-04A, PN-04B, PN-04C, PN-05, PN-06A e PN-06B energizados, que resultaria em vestimentas antichama de categoria 2 de acordo com a versão de 2002 da norma e de categoria 3 utilizando a nova metodologia, destacando a importância de se realizar uma revisão do estudo de energia incidente em subestações que o possuem baseado na versão de 2002 da norma.

7 Conclusões

A determinação da proteção adequada para a realização de trabalhos em painéis elétricos energizados mostrou-se fundamental para a mitigação dos riscos aos quais os trabalhadores ficam expostos. Percebeu-se também que o estudo de energia incidente por arcos elétricos tem se aperfeiçoado nos últimos anos, através de revisões em seus métodos de cálculo, tornando-se mais complexos e precisos com a revisão de 2018 da IEEE 1584. Apesar disto, o Brasil ainda carece de normas que detalhem os métodos de cálculo para energia incidente, bem como ensaios para as vestimentas de proteção e sua confecção.

Com o objetivo de demonstrar os conceitos do fenômeno arco elétrico, foram descritos seus riscos, classificação, principais normas nacionais e estrangeiras que regem sobre o assunto e vestimentas de proteção. Para quantificar a energia incidente por arco elétrico, descreveram-se as metodologias de cálculo dispostas nas normas americanas NFPA 70E e na IEEE 1584, com todo seu equacionamento e convertendo as unidades das equações para o padrão do Sistema Internacional, quando necessário. Também foi realizada uma pesquisa atualizada sobre as técnicas e dispositivos para a redução da energia incidente, de forma a minimizar os riscos e a reduzir categoria de vestimenta antichama necessária para a realização de trabalho em subestações e painéis elétricos energizados.

O fenômeno arco elétrico é pouco previsível e sua modelagem é complexa, porém, seu estudo se faz necessário frente aos amplos riscos que ele oferece. Diante disto, foram encontrados diferentes métodos para o cálculo de energia incidente para diferentes faixas de tensão e tipo de corrente, onde o método de cálculo da norma IEEE 1584, devido a sua faixa de aplicação, mostrou-se satisfatório para o ambiente industrial de média tensão, sem ser tão conservador como o método de Ralph Lee.

A revisão de 2018 da norma IEEE 1584 tornou sua forma de cálculo muito mais robusta se comparada com a versão de 2002, que era modelada em grande parte por equações com poucas constantes, linearizadas a partir dos ensaios realizados, e agora, são realizadas interpolações para adaptar os parâmetros dos sistemas em análise aos sistemas onde foram realizados os ensaios. Também, foram alterados alguns dados necessários para análise, como a remoção o efeito do tipo de aterramento, e a inclusão da configuração dos eletrodos e das dimensões dos invólucros dos possíveis pontos onde ocorreriam os arcos elétricos. Estas mudanças se mostraram significativas, onde percebe-se, através da subestação utilizada no estudo de caso, que a quantidade de painéis onde seriam necessárias medidas para redução da energia incidente seria reduzida de 8 para apenas 2 caso fosse

adotada a metodologia da versão de 2002 da norma IEEE-1584, considerando as premissas adotadas.

Os métodos para mitigação dos riscos envolvendo o arco elétrico estão em constante aprimoramento, sendo que, mediante os resultados obtidos com a utilização do relé de proteção contra arcos elétricos, fica evidente sua eficácia na redução dos níveis de energia incidente dos painéis analisados, chegando a reduzir em mais de 83% o nível de energia incidente nos painéis PN-03A e PN-03B, sem comprometer a coordenação e seletividade das proteções. Porém, eles não eliminam totalmente os riscos e o uso e vestimentas antichama ainda é necessário para proteger o trabalhador de maneira adequada. A instalação de um relé de proteção contra arco elétrico em um sistema já existente e em operação poder se tornar uma tarefa complexa, já que o painel precisa ser furado para a instalação dos sensores de luz e provavelmente necessitará da substituição de alguns de seus componentes para a adaptação os relé monitor de arco, sendo, portanto, a etapa de projeto e construção é a mais indicada para realização do estudo de energia incidente e para se adotar medidas de redução de seus níveis.

Referências

- ABNT, A. b. d. n. t. *ABNT NBR IEC 61482-1-1: Trabalhos em tensão - Vestimenta de proteção contra riscos térmicos de um arco elétrico. Parte 1-1: Métodos de ensaio - Método 1: Determinação da resistência ao arco elétrico (ATPV o EBT50) de materiais resistentes à chama para vestimenta*. 2017. Citado na página 32.
- ABNT, A. b. d. n. t. *ABNT NBR IEC 61482-2: Trabalhos sob tensão - Vestimenta de proteção contra riscos térmicos de um arco elétrico. Parte 2: Requisitos*. 2017. Citado na página 32.
- ABRACOPEL. Anuário estatístico brasileiro dos acidentes de origem elétrica. p. 23–44, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.
- BATISTA, M. Falando de nr-10: Cálculo de energia incidente. *Vorbe*, 04 2017. Citado na página 13.
- CA EPIS. *CAMISA SOCIAL ANTICHAMA MANGA LONGA AZUL ROYAL (3656)*. 2018. Disponível em: <<http://ca-epis.blogspot.com/2011/12/macacao-indura-azul-marinho-com-faixas.html>>. Acesso em: 24 set. 2018. Citado na página 33.
- COSTA, L. F. d. O. *O USO DE CONJUNTOS DE MANOBRA E CONTROLE DE POTÊNCIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS DE MÉDIA E BAIXA TENSÃO*. 2014. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Elétrica, UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ. Citado na página 63.
- DOAN, D. R. Arc flash calculations for exposures to dc systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 46, n. 6, p. 2299–2302, Nov 2010. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 56.
- DOUGHTY, R. L.; NEAL, T. E.; FLOYD, H. L. Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600v power distribution systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 36, n. 1, Jan 2000. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 36.
- EASY POWER. *Arc Flash Hazard Calculations Using IEEE 1584-2018*. 2019. Disponível em: <<https://www.easypower.com/ieee-1584-2018>>. Acesso em: 24 jul. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- GARMEL, G. M. *An introduction to clinical emergency medicine*. 2. ed. [S.l.]: Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 216 p. Citado na página 30.
- GOLOVKOV, M.; SCHAU, H.; BURDGE, G. Electric arc: Protecting against thermal effect. *Professional Safety*, v. 62, p. 49–54, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 18, 19, 20, 21 e 22.
- IEC-60909, I. E. C. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems. 2016. Citado na página 69.

- IEEE-1584. Ieee guide for performing arc flash hazard calculations. *IEEE Std 1584-2018 (Revision of IEEE Std 1584-2002)*, p. 1–134, Nov 2018. Citado 19 vezes nas páginas 12, 24, 26, 27, 31, 38, 42, 43, 44, 45, 51, 52, 54, 56, 57, 68, 71, 76 e 86.
- KINDERMANN, G. *Curto-Circuito*. 2. ed. [S.l.]: Sagra Luzzatto, 1992. 140 p. Citado na página 17.
- LALLY, R. 6 arc flash terms you need to know now. *National Safety Apparel*, Janeiro 2018. Citado na página 34.
- LANG, M.; JONES, K. Exposed to the arc flash hazard. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 51, n. 1, p. 51–61, Janeiro 2015. ISSN 0093-9994. Citado na página 16.
- LEE, R. H. The other electrical hazard: Electric arc blast burns. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-18, p. 246–251, 1982. Citado 9 vezes nas páginas 13, 16, 17, 24, 27, 30, 31, 33 e 35.
- LEE, R. H. Pressures developed by arcs. IA-23, p. 760 – 763, 08 1987. Citado na página 16.
- MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. *O Setor Elétrico*, v. 144, p. 28–33, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 13, 17, 23, 24 e 26.
- MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. *O Setor Elétrico*, v. 147, p. 36–41, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 58, 59, 60 e 62.
- MORAES, A. P. d. *Geração de Energia Elétrica com Aproveitamento de Excedente de Vapor de Baixa Pressão*. 2017. Projeto de Diplomação, Curso de Engenharia Elétrica, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Citado 2 vezes nas páginas 64 e 66.
- MTPS, M. d. T. e. P. S. *NR 10 – SEGURANÇA EM INSTALAÇÕES E SERVIÇOS EM ELETRICIDADE*. 2016. Portaria MTPS n.º 508. Citado na página 23.
- NFPA-70E, N. F. P. A. *Standard for Electrical Safety in the Workplace*. [S.l.: s.n.], 2018. Citado 5 vezes nas páginas 17, 28, 29, 56 e 58.
- PINHEIRO, P. Queimaduras – graus e complicações. *MD.SAÚDE*, Agosto 2018. Citado na página 32.
- QUEIROZ, A. R. S. *Utilização de Relés Digitais para Mitigação dos Riscos Envolvendo Arco Elétrico*. 2011. Dissertação de Mestrado, Curso de Ciências, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 60.
- QUEIROZ, A. R. S.; SENGER, E. C. Proteção contra arco elétrico e epis. *O Setor Elétrico*, v. 72, p. 46–51, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 17, 22 e 23.
- QUEIROZ, A. R. S.; SENGER, E. C. Proteção contra arco elétrico e epis. *O Setor Elétrico*, v. 74, p. 30–35, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 27, 31 e 33.
- RESENDE, F. B. *Proteção Elétrica em Subestações: uma Abordagem Sobre a Energia Incidente*. 2016. Dissertação de mestrado, Curso de Engenharia Elétrica, UFMG. Citado 3 vezes nas páginas 30, 59 e 62.

VALE, E. C. S. d. Primeiro atendimento em queimaduras: a abordagem do dermatologista. v. 80, p. 9 – 19, 2005. Citado na página 30.

Anexos

ANEXO A – Unifilar

ANEXO B – Tabelas 1 a 6 da norma IEEE-1584 (2018).

Table 1—Coefficients for Equation (1)

	E.C. / V_{oc}	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10
VCB	600 V	-0.04287	1.035	-0.083	0	0	-4.783E-09	1.962E-06	-0.000229	0.003141	1.092
	2 700 V	0.0065	1.001	-0.024	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729
	14 300 V	0.005795	1.015	-0.011	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729
VCBB	600 V	-0.017432	0.98	-0.05	0	0	-5.767E-09	2.524E-06	-0.00034	0.01187	1.013
	2 700 V	0.002823	0.995	-0.0125	0	-9.204E-11	2.901E-08	-3.262E-06	0.0001569	-0.004003	0.9825
	14 300 V	0.014827	1.01	-0.01	0	-9.204E-11	2.901E-08	-3.262E-06	0.0001569	-0.004003	0.9825
HCB	600 V	0.054922	0.988	-0.11	0	0	-5.382E-09	2.316E-06	-0.000302	0.0091	0.9725
	2 700 V	0.001011	1.003	-0.0249	0	0	4.859E-10	-1.814E-07	-9.128E-06	-0.0007	0.9881
	14 300 V	0.008693	0.999	-0.02	0	-5.043E-11	2.233E-08	-3.046E-06	0.000116	-0.001145	0.9839
VOA	600 V	0.043785	1.04	-0.18	0	0	-4.783E-09	1.962E-06	-0.000229	0.003141	1.092
	2 700 V	-0.02395	1.006	-0.0188	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729
	14 300 V	0.005371	1.0102	-0.029	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729
HOA	600 V	0.111147	1.008	-0.24	0	0	-3.895E-09	1.641E-06	-0.000197	0.002615	1.1
	2 700 V	0.000435	1.006	-0.038	0	0	7.859E-10	-1.914E-07	-9.128E-06	-0.0007	0.9981
	14 300 V	0.000904	0.999	-0.02	0	0	7.859E-10	-1.914E-07	-9.128E-06	-0.0007	0.9981

4.5 Arcing current variation correction factor

Calculate a second set of arc duration, using the reduced arcing current I_{arc_min} to determine if the arcing current variation has an effect on the operating time of protective devices and consequently incident energy. The arcing current variation applies for all system open-circuit voltages within the valid range of the model (208 V to 15 000 V), but it is expected to have the most impact between 208 V and 600 V.

To determine a lower bound of the average rms arcing current, use Equation (2) as follows and the coefficients provided in Table 2:

$$I_{arc_min} = I_{arc} \times (1 - 0.5 \times VarC_f) \quad (2)$$

$$VarC_f = k1V_{oc}^6 + k2V_{oc}^5 + k3V_{oc}^4 + k4V_{oc}^3 + k5V_{oc}^2 + k6V_{oc} + k7$$

where

- $VarC_f$ is the arcing current variation correction factor
- I_{arc} is the final or intermediate rms arcing current(s) (kA) (see note)
- I_{arc_min} is a second rms arcing current reduced based on the variation correction factor (kA)
- V_{oc} is the open-circuit voltage between 0.208 kV and 15.0 kV
- $k1$ to $k7$ are the coefficients provided in Table 2

Table 2—Coefficients for Equation (2)

E.C.	$k1$	$k2$	$k3$	$k4$	$k5$	$k6$	$k7$
VCB	0	-0.0000014269	0.000083137	-0.0019382	0.022366	-0.12645	0.30226
VCBB	1.138e-06	-6.0287e-05	0.0012758	-0.013778	0.080217	-0.24066	0.33524
HCB	0	-3.097e-06	0.00016405	-0.0033609	0.033308	-0.16182	0.34627
VOA	9.5606E-07	-5.1543E-05	0.0011161	-0.01242	0.075125	-0.23584	0.33696
HOA	0	-3.1555e-06	0.0001682	-0.0034607	0.034124	-0.1599	0.34629

NOTE—The correction factor $(1 - (0.5 \times VarC_f))$ is applied as follows:

- 208 V $\leq V_{oc} \leq$ 600 V: To I_{arc} (final current only)
- 600 V $< V_{oc} \leq$ 15 000 V: To I_{arc_600} , I_{arc_2700} , and I_{arc_14300} (intermediate average arcing currents). The final I_{arc} value inherits the correction factor.

The “0.5” coefficient indicates that variation is applied to the average arcing current to obtain a lower-bound value arcing current.

Table 3—Coefficients for Equation (3), Equation (6), Equation (7), and Equation (10)

600 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
VCB	0.753364	0.566	1.752636	0	0	-4.783E-09	0.00001962	-0.000229	0.003141	1.092	0	-1.598	0.957
VCBB	3.068459	0.26	-0.098107	0	0	-5.767E-09	0.000002524	-0.00034	0.01187	1.013	-0.06	-1.809	1.19
HCB	4.073745	0.344	-0.370259	0	0	-5.382E-09	0.000002316	-0.000302	0.0091	0.9725	0	-2.03	1.036
VOA	0.679294	0.746	1.222636	0	0	-4.783E-09	0.00001962	-0.000229	0.003141	1.092	0	-1.598	0.997
HOA	3.470417	0.465	-0.261863	0	0	-3.895E-09	0.00001641	-0.000197	0.002615	1.1	0	-1.99	1.04

Table 4—Coefficients for Equation (4) and Equation (8)

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

Table 5—Coefficients for Equation (5) and Equation (9)

14 300 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
VCB	3.825917	0.11	-0.999749	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729	0	-1.568	0.99
VCBB	3.644309	0.215	-0.585522	0	-9.204E-11	2.901E-08	-3.262E-06	0.0001569	-0.004003	0.9825	0	-1.677	1.06
HCB	3.044516	0.125	0.245106	0	-5.043E-11	2.233E-08	-3.046E-06	0.000116	-0.001145	0.9839	0	-1.655	1.084
VOA	3.405454	0.12	-0.93245	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729	0	-1.534	0.979
HOA	2.04049	0.177	1.005092	0	0	7.859E-10	-1.914E-07	-9.128E-06	-0.0007	0.9981	-0.05	-1.633	1.151

Table 6—Guidelines to determine the equivalent height and width

E.C.	Range	<508 (mm)	≥508 and ≤660.4 (mm)	>660.4 and ≤1244.6 (mm)	>1244.6 (mm)
VCB	Width ₁	= 20 (if Typical) = 0.03937 × Width (if Shallow ^a)	= 0.03937 × Width	obtained from Equation (11) and actual Width	obtained from Equation (11) with Width = 1244.6 mm
	Height ₁	= 20 (if Typical) or = 0.03937 × Height (if Shallow ^a)	= 0.03937 × Height	= 0.03937 × Height	= 49
VCBB	Width ₁	= 20 (if Typical) or = 0.03937 × Width (if Shallow ^a)	= 0.03937 × Width	obtained from Equation (11) and actual Width	obtained from Equation (11) with Width = 1244.6 mm
	Height ₁	= 20 (if Typical) or = 0.03937 × Height (if Shallow ^a)	= 0.03937 × Height	obtained from Equation (12) and actual Height	obtained from Equation (12) with Height = 1244.6 mm
HCB	Width ₁	= 20 (if Typical) or = 0.03937 × Width (if Shallow ^a)	= 0.03937 × Width	obtained from Equation (11) and actual Width	obtained from Equation (11) with Width = 1244.6 mm
	Height ₁	= 20 (if Typical) or = 0.03937 × Height (if Shallow ^a)	= 0.03937 × Height	obtained from Equation (12) and actual Height	obtained from Equation (12) with Height = 1244.6 mm

^aShallow only if $V_{oc} < 600$ V ac and the enclosure depth ≤ 203.2 mm (8 in) otherwise the enclosure is “Typical.”