

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Marina Camponogara

**ANÁLISE DE ENERGIA INCIDENTE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO:
ESTIMAÇÃO, ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO E MEDIDAS DE
PROTEÇÃO**

Santa Maria, RS
2021

PPGEE/UFSM, RS

CAMPONOGARA, Marina

Mestre

2021

Marina Camponogara

**ANÁLISE DE ENERGIA INCIDENTE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO:
ESTIMAÇÃO, ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO E MEDIDAS DE PROTEÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon

Santa Maria, RS
2021

Camponogara, Marina

Análise de Energia Incidente em Redes de Distribuição:
Estimação, Estratégias de Mitigação e Medidas de Proteção /
Marina Camponogara.- 2021.

113 p.; 30 cm

Orientador: Daniel Pinheiro Bernardon

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2021

1. Energia Incidente 2. Arco Elétrico 3. Equipamento
de Proteção Individual I. Pinheiro Bernardon, Daniel II.
Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2021

Todos os direitos autorais reservados a Marina Camponogara. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Éder Trindade Pereira, 101, Bairro Camobi, Santa Maria, RS. CEP: 97110-260.

Fone: (055)55 99946-8736; E-mail: camponogaramarina@gmail.com

Marina Camponogara

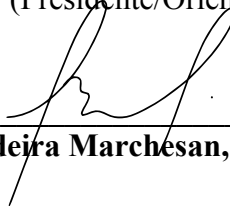
**ANÁLISE DE ENERGIA INCIDENTE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO:
ESTIMAÇÃO, ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO E MEDIDAS DE PROTEÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, na Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

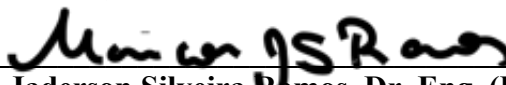
Aprovado em 30 de abril de 2021:



Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. Eng. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Tiago Bandeira Marchesan, Dr. Eng. (UFSM)



Maicon Jaderson Silveira Ramos, Dr. Eng. (UFRGS)

Santa Maria, RS
2021

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Daniel, pela confiança em mim depositada ao me conceder a oportunidade de ser sua orientada.

À minha mãe, Maria Andrea, pelo amor e pela dedicação durante toda a minha vida e por sempre ter colocado minha educação em primeiro lugar.

Ao meu namorado, Klaus, por estar ao meu lado todos os dias e tornar minha passagem por esse mundo mais feliz. Já dizia Tom Jobim que “fundamental é mesmo o amor, é impossível ser feliz sozinho”.

Aos colegas do Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP), por sempre estarem dispostos a compartilhar seu conhecimento para auxiliar os colegas. Um agradecimento especial à Ana e ao Adriano, por estarem sempre ajudando nas simulações do ATPDraw.

À Universidade Federal de Santa Maria, instituição pública, gratuita e de qualidade, onde cursei o ensino médio, a graduação e o curso de mestrado, da qual sinto orgulho de ser filha.

À CPFL Energia pelo apoio técnico e financeiro referente ao projeto “Metodologia e Ferramenta Computacional para Avaliação e Modelagem das Condições de Arco Elétrico em Sistemas Elétricos de Potência no Contexto Brasileiro”, desenvolvido no âmbito do programa de P&D ANEEL PD-00063-3069/2020. Este trabalho foi realizado também com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

A todos aqueles que, de uma maneira ou outra, colaboraram para que eu pudesse concluir mais esta etapa da minha vida e que tornaram essa jornada ainda mais enriquecedora.

“As pessoas são constantemente forçadas a escolher entre a liberdade e o sucesso e a estabilidade. A liberdade com sofrimento ou a felicidade sem liberdade. A maioria escolhe a última opção.”

(Svetlana Aleksiévitich)

RESUMO

ANÁLISE DE ENERGIA INCIDENTE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO: ESTIMAÇÃO, ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO E MEDIDAS DE PROTEÇÃO

AUTORA: Marina Camponogara

ORIENTADOR: Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. Eng.

A ocorrência de um arco elétrico se dá quando a ionização do ar é suficiente para possibilitar a passagem de corrente elétrica e decorre de dois ou mais condutores separados por um dado espaçamento submetidos a um curto-circuito, seja por contato indevido ou falha de isolamento, ou ainda durante a operação rotineira dos equipamentos elétricos, como no processo de abertura e fechamento dos dispositivos de manobra. Uma série de riscos estão associados ao arco elétrico, sendo o risco térmico aceito como o mais significativo, visto que acidentes documentados como causados por esse tipo de fenômeno são predominantemente queimaduras. Grandes quantidades de energia são liberadas durante a ocorrência de um arco elétrico, sendo a energia térmica denominada energia incidente. Dentro do processo de avaliação do risco de arco elétrico, a análise de energia incidente é empregada para prever os níveis de energia incidente gerados em um possível evento de arco elétrico e, como resultado dessa análise, é possível determinar os equipamentos de proteção adequados para o trabalho naquele sítio, se há necessidade de empregar técnicas de mitigação de energia incidente e, ainda, se o trabalho poderá de fato ser realizado em local energizado ou se será necessário que o ponto seja desenergizado. Neste trabalho, uma análise de energia incidente é proposta para redes de distribuição, na qual se deve estimar os níveis de energia incidente, propor técnicas de mitigação quando necessário e determinar medidas de proteção ao trabalhador. As redes empregadas nos estudos de caso são as redes IEEE 13-Node e IEEE 34-Bus, pois contam com sítios dentro do intervalo de tensão do guia de estimativa de energia incidente selecionado, o IEEE Std 1584. Ambos os modelos de 2002 e de 2018 são empregados, a fim de se obter uma comparação entre os resultados. O *software* ATPDraw é utilizado para simular faltas trifásicas francas nos pontos de interesse e as vestimentas e demais equipamentos de proteção pertinentes são escolhidos a partir da NFPA 70E-2021. Os resultados dos estudos de caso confirmam a relação direta entre a energia incidente e a duração do arco elétrico, além de salientar a diferença entre os resultados obtidos empregando o modelo de 2002 e o de 2018 como mais expressiva para cenários com condutores orientados horizontalmente e em sistemas de baixa tensão, em função principalmente do fator de variação da corrente de arco. Para sistemas de média tensão, o intervalo de espaçamentos considerados no modelo empírico do IEEE Std 1584-2002 é distinto do modelo do IEEE Std 1584-2018, forçando o uso do modelo teórico, baseado no modelo de Lee, o que implica em resultados mais conservadores. Por fim, considerando-se o intervalo de tensão de ambos os modelos, há uma limitação quanto à aplicação deles em sistemas de distribuição, visto que não contemplam todas as tensões empregadas nas redes de média e alta tensão.

Palavras-chave: Arco Elétrico. ATPDraw. Energia Incidente. EPI. IEEE Std 1584-2002. IEEE Std 1584-2018. NFPA 70E-2021. Queimaduras Elétricas. Redes de Distribuição. Técnicas de Mitigação. Vestimentas de Proteção Térmica.

ABSTRACT

INCIDENT ENERGY ANALYSIS IN DISTRIBUTION NETWORKS: ESTIMATION, MITIGATION STRATEGIES AND PROTECTION MEASURES

AUTHOR: Marina Camponogara

ADVISOR: Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. Eng.

An electric arc occurs when the air's ionization is sufficient to allow the passage of electric current and arises from two or more conductors separated by a given spacing subjected to a short-circuit, either by improper contact or insulation failure, or even during the routine operation of electrical equipment, such as in the process of opening and closing maneuvering devices. A series of risks are associated to electric arc, the thermal risk being accepted as the most significant, as accidents documented as caused by this type of phenomenon are predominantly burns. Large amounts of energy are released during the occurrence of an electric arc, the thermal energy being called incident energy. Within the arc flash risk assessment process, the incident energy analysis is employed to predict the incident energy levels generated in a possible arc flash event and, as result of this analysis, it is possible to determine the appropriate protective equipment for the work in that site, whether there is the need to employ incident energy mitigation techniques, and whether the work can actually be carried out in an energized location or whether it will be necessary for the point to be de-energized. In this work, an incident energy analysis is proposed for distribution grids, in which incident energy levels must be estimated, mitigation techniques proposed when necessary, and worker protection measures determined. The employed grids in the case studies are the IEEE 13-Node and IEEE 34-Bus grids, as they have points within the voltage range of the selected incident energy estimation guide, the IEEE Std 1584. Both 2002 and 2018 models are used to obtain a comparison among the results. The ATPDraw software is used to simulate bolted three-phase faults at the points of interest and the clothing and other pertinent protective equipment are chosen from NFPA 70E-2021. The results of the case studies confirm the direct relation between the incident energy and the arc duration, in addition to highlighting the difference among the results obtained using the 2002 and 2018 models as more expressive for scenarios with horizontally oriented conductors and in low voltage systems, mainly due to the arc current variation factor. For medium voltage systems, the spacing range considered in the IEEE Std 1584-2002's empirical model is different from the IEEE Std 1584-2018 model, forcing the use of the theoretical model, based on the Lee model, which implies in more conservative results. Finally, considering the voltage ranges of both models, there is a limitation regarding their application in distribution systems, as they do not include all voltages used in medium and high voltage grids.

Keywords: ATPDraw. Distribution Grids. Electric Arc. Electrical Burns. IEEE Std 1584-2002. IEEE Std 1584-2018. Incident Energy. Mitigation Techniques. NFPA 70E-2021. PPE. Thermal Protection Clothing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração da configuração VCB em teste.	32
Figura 2 – Equipamento com configuração VCB.	32
Figura 3 – Ilustração da configuração VCBB em teste.	33
Figura 4 – Equipamento com configuração VCBB.	33
Figura 5 – Ilustração da configuração HCB em teste.	33
Figura 6 – Equipamento com configuração HCB.	33
Figura 7 – Ilustração da configuração VOA em teste.	33
Figura 8 – Equipamento com configuração VOA.	33
Figura 9 – Ilustração da configuração HOA em teste.	34
Figura 10 – Equipamento com configuração HOA.	34
Figura 11 – Fluxograma da metodologia aplicada.	59
Figura 12 – Sistema IEEE 13-Node.	61
Figura 13 – Sistema IEEE 34-Bus.	62
Figura 14 – Modelagem de falta trifásica franca no nó 634 do sistema IEEE 13-Node.	64
Figura 15 – Modelagem de falta trifásica franca no nó 633 do sistema IEEE 13-Node.	65
Figura 16 – Sistema IEEE 34-Bus modelado no ATPDraw.	66
Figura 17 – Modelagem de falta trifásica franca na barra 888 do sistema IEEE 34-Bus.	66
Figura 19 – Curva tempo-corrente do fusível KRP-C_SP.	71
Figura 20 – Curva tempo-corrente do fusível KRP-C_SP.	73
Figura 21 – Curva tempo-corrente do fusível LCU.	75
Figura 22 – Curva tempo-corrente do fusível LCU.	77
Figura 23 – Curva tempo-corrente do fusível KRP-C_SP.	80
Figura 24 – Curva tempo-corrente do fusível KRP-C_SP.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes para determinação dos valores intermediários de corrente de arco elétrico.....	35
Tabela 2 – Diretivas para determinação de altura e largura equivalentes do compartimento. .	38
Tabela 3 – Coeficientes para definição do fator de correção do tamanho do compartimento (CF).	39
Tabela 4 – Coeficientes para determinação dos valores intermediários de energia incidente e de distância de aproximação segura.....	41
Tabela 5 – Coeficientes para obtenção do fator de correção da variação da corrente de arco.	45
Tabela 6 – Seleção de vestimenta com AR e outros EPIs pelo método de análise de energia incidente.	47
Tabela 7 – Seleção de vestimenta com AR e outros EPIs pelo método de categorização de EPI.	48
Tabela 8 – Vestimentas para tensões de 50 V a 1000 V em corrente alternada.....	51
Tabela 9 – Vestimentas para tensões de 1,1 kV a 46 kV em corrente alternada.....	52
Tabela 10 – Vestimentas para tensões de 46,1 kV a 800 kV em corrente alternada.	52
Tabela 11 – Níveis de proteção e EPI exigido conforme a ABNT NBR 16384:2020.	57
Tabela 12 – Parâmetros de aplicação do Estudo de Caso 1.....	69
Tabela 13 – Resultados da aplicação do modelo do IEEE Std 1584-2002 para o Estudo de Caso 1.....	74
Tabela 14 – Resultados da aplicação do modelo do IEEE Std 1584-2002 para o Estudo de Caso 1 com o emprego de técnica de mitigação.	78
Tabela 15 – Resultados da aplicação do modelo do IEEE Std 1584-2018 para o Estudo de Caso 1.....	84
Tabela 16 – Resultados da aplicação do modelo do IEEE Std 1584-2018 para o Estudo de Caso 1 com o emprego de técnica de mitigação.	85
Tabela 17 – Parâmetros de aplicação do Estudo de Caso 2.....	86
Tabela 18 – Resultados da aplicação do modelo do IEEE Std 1584-2002 para o Estudo de Caso 2.....	88
Tabela 19 – Constantes para obtenção das correntes de arco intermediárias (configuração VOA).....	89
Tabela 20 – Constantes para obtenção dos níveis de energia incidente e distância de aproximação segura intermediários (configuração VOA).	91

Tabela 21 – Resultados da aplicação do modelo do IEEE Std 1584-2018 para o Estudo de Caso 2.	97
Tabela 22 – Parâmetros de aplicação do Estudo de Caso 3.	98
Tabela 23 – Resultados da aplicação do modelo do IEEE Std 1584-2002 para o Estudo de Caso 3.	99
Tabela 24 – Constantes para obtenção das correntes de arco intermediárias (configuração HOA).	100
Tabela 25 – Constantes para obtenção dos níveis de energia incidente e distância de aproximação segura intermediários (configuração HOA).	101
Tabela 26 – Resultados da aplicação do modelo do IEEE Std 1584-2018 para o Estudo de Caso 3.	105
Tabela 27 – Resumo dos resultados dos estudos de caso analisados.	106

LISTA DE ABREVIATURAS

ABA	<i>American Burn Association</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIEE	<i>American Institute of Electrical Engineers</i>
AR	<i>Arc Rated</i>
ARM	<i>Arc Reduction Maintenance Switch</i>
AT	Alta Tensão
ATPV	<i>Arc Thermal Performance Value</i>
BT	Baixa Tensão
EBT	Extrabaixa Tensão
EPC	Equipamento de Proteção Individual
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FR	<i>Flame Resistant</i>
IAS	<i>Industry Applications Society,</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MT	Média Tensão
NESC	<i>National Electrical Safety Code</i>
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i>
NR	Norma Regulamentadora
SPC	Sistema de Proteção Coletiva
ZR	Zona de Risco

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	16
1.1 PROBLEMA.....	16
1.2 JUSTIFICATIVA.....	17
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 Objetivo Geral	18
1.3.2 Objetivos Específicos	18
1.4 ORGANIZAÇÃO DE CAPÍTULOS	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 ESTADO DA ARTE	20
2.1.1 Arco Elétrico	20
2.1.2 Energia Incidente	22
2.1.2.1 Conceito e Estimativa.....	22
2.1.2.2 Técnicas de Mitigação.....	26
2.2 NORMATIZAÇÃO	28
2.2.1 Normatização Internacional	28
2.2.1.1 IEEE Std 1584-2002.....	28
2.2.1.1.1 Modelo Empírico	28
2.2.1.1.2 Modelo Teórico.....	30
2.2.1.2 IEEE Std 1584-2018.....	31
2.2.1.3 NFPA 70E	46
2.2.1.4 NESC C2.....	50
2.2.2 Normatização Nacional	53
2.2.2.1 NR-10.....	53
2.2.2.2 NR-6.....	54
2.2.2.3 ABNT NBR 16384:2020.....	55
3 METODOLOGIA	59
3.1 METODOLOGIA PROPOSTA	59
3.2 ETAPAS DE IMPLEMENTAÇÃO	60
3.2.1 Etapa 1 – Definição dos Estudos de Caso	60
3.2.1.1 IEEE 13-Node – Estudos de Caso 1 e 2	61
3.2.1.2 IEEE 34-Bus – Estudo de Caso 3.....	62
3.2.2 Etapa 2 – Curto-Circuito Utilizando o ATPDraw	62
3.2.3 Etapa 3 – Aplicação dos Modelos IEEE Std 1584	66
3.2.4 Etapa 4 – Análise dos Resultados de Energia Incidente	67
3.2.4.1 Etapa 4.1 – Seleção de Vestimenta de Proteção Térmica e Demais EPIs.....	67
3.2.4.2 Etapa 4.2 – Seleção de Técnicas de Mitigação	68
4 RESULTADOS	69

4.1	ESTUDO DE CASO 1	69
4.1.1	Análise de Energia Incidente Empregando o Modelo IEEE Std 1584-2002 .	70
4.1.2	Análise de Energia Incidente Empregando o Modelo IEEE Std 1584-2018 .	78
4.2	ESTUDO DE CASO 2	86
4.2.1	Análise de Energia Incidente Empregando o Modelo IEEE Std 1584-2002 .	87
4.2.2	Análise de Energia Incidente Empregando o Modelo IEEE Std 1584-2018 .	88
4.3	ESTUDO DE CASO 3	97
4.3.1	Análise de Energia Incidente Empregando o Modelo IEEE Std 1584-2002 .	98
4.3.2	Análise de Energia Incidente Empregando o Modelo IEEE Std 1584-2018 .	99
4.4	RESUMO DOS RESULTADOS E COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS	106
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

INTRODUÇÃO

O perigo elétrico se caracteriza por uma condição de risco como o contato ou a falha de um equipamento que pode resultar em choque elétrico ou em lesões decorrentes do arco elétrico, como queimadura ótica em função do clarão súbito relacionado, queimadura térmica ou ferimento por explosão (NFPA, 2021, p. 11). Conforme NFPA (2021), o perigo de choque elétrico está relacionado à passagem de corrente elétrica através do corpo a partir do contato ou aproximação de partes energizadas, enquanto o perigo de arco elétrico reflete a possibilidade de ferimento ou danos à saúde devido à liberação de energia causada por esse tipo de evento.

A combinação entre a possibilidade de ocorrência e a severidade de ferimento ou danos à saúde que resultam de um dado perigo elétrico é definida como risco elétrico. A avaliação de risco é “um processo no qual são identificados o perigo, a possibilidade de ocorrência e a potencial severidade de ferimento ou danos à saúde, além de determinar a necessidade de medidas de proteção adicionais” (NFPA, 2021, p. 13). Dados os tipos de perigo elétrico existentes, esse tipo de avaliação é feito tanto para arco quanto para choque elétrico.

Uma avaliação de risco de arco elétrico deve ser realizada para identificar o perigo de arco elétrico, estimar a possibilidade de ocorrência e severidade de lesões e outros danos à saúde e determinar se medidas de proteção adicionais são necessárias, inclusive a adoção de Equipamento de Proteção Individual (EPI) (NFPA, 2021, p. 26). No que concerne aos segundo e terceiro itens, a análise de energia incidente é utilizada para prever a energia térmica gerada por um arco elétrico para um cenário específico e, com isso, indicar a possibilidade ou não de o trabalho ser realizado em ambiente energizado e, se sim, se há a necessidade de se utilizar medidas de proteção e guiar a seleção de EPIs adequados.

1.1 PROBLEMA

A energia térmica liberada durante um evento de arco elétrico, quando impressa em uma superfície localizada a uma certa distância da fonte, é denominada energia incidente. Essa impressão de energia é responsável pelas queimaduras causadas por arco elétrico, que são parte do grupo das queimaduras de natureza elétrica.

De acordo com Brandão et al. (2017), as queimaduras de natureza elétrica têm taxa de ocorrência menor do que outros tipos de queimaduras, mas são consideradas um dos tipos de lesão mais agressivos, em função de sua alta morbimortalidade. Além disso, estão associadas a elevados custos financeiros, relacionados a longos períodos de internação e a necessidade de

múltiplos procedimentos cirúrgicos, bem como das sequelas funcionais que podem resultar da lesão original. Assim, as queimaduras de natureza elétrica têm impacto socioeconômico, como sinaliza Arnoldo et al. (2004), além de que seu ônus se difere entre os países desenvolvidos e aqueles em desenvolvimento, conforme Brandão et al. (2017).

Quanto aos tipos de queimaduras elétricas, Luz et al. (2009) esclarece que essas podem ser divididas em quatro tipos: as de alta tensão, referentes às ocorrências em tensões iguais ou maiores do que 1000 V; as de baixa tensão, quando ocorrem em tensões inferiores a 1000 V; por arco elétrico, que são aquelas em que não há fluxo de corrente através do corpo do paciente; e por raios. Um estudo realizado por Arnoldo et al. (2004) com um grupo de 700 pacientes internados por queimaduras de causa elétrica aponta as queimaduras por arco elétrico em maior número, representando aproximadamente 39,6% dos casos avaliados, mas com a menor taxa de mortalidade, em torno de 1,1%.

De acordo com a Associação Americana de Queimados (do inglês, *American Burn Association*, ABA), somente 3,1% dos casos registrados de queimaduras nos Estados Unidos entre 2008 e 2017 foram de origem elétrica, mas ocorreram principalmente em pacientes em idade de trabalho, entre 20 e 60 anos. Este tipo de queimadura se difere das demais etiologias por ser comumente acidental e relacionada ao trabalho (59%), atingindo majoritariamente funcionários do sexo masculino, que são aqueles envolvidos no setor industrial, onde ocorrem 35,6% dos casos de queimadura de origem elétrica (AMERICAN BURN ASSOCIATION, 2017). O Escritório de Estatísticas de Trabalho dos Estados Unidos (do inglês, *U.S. Bureau of Labor Statistics*) apontou 510 acidentes ocupacionais não-fatais por queimaduras elétricas nos Estados Unidos no ano de 2019, o que representa 1,4% de todas as queimaduras ocupacionais registradas no período (U.S. BUREAU OF LABOR STATISTICS, 2021).

Uma pesquisa de 2 anos e meio desenvolvida por Mohammadi et al. (2008) aponta resultados semelhantes aos indicados pela ABA: 4,73% dos pacientes avaliados tinham queimaduras elétricas, sendo 95,3% do sexo masculino, com idade média de 30,5 anos. Ademais, 59,3% das queimaduras ocorreram no ambiente de trabalho.

1.2 JUSTIFICATIVA

Desde a publicação do artigo pioneiro de Lee (1982) e intensificada com a publicação de IEEE (2002), a conscientização quanto aos riscos associados aos trabalhos em eletricidade vem crescendo progressivamente. Especialmente quanto aos riscos decorrentes de um evento de arco elétrico, o risco térmico é considerado o de maior relevância, já que, conforme Mohla

et al. (2010), a maioria das internações hospitalares em função de acidentes de origem elétrica são devido a queimaduras por arco elétrico.

Além dos riscos associados à saúde e segurança do trabalhador, os danos causados aos equipamentos elétricos por esse tipo de evento podem causar interrupção no fornecimento de energia elétrica por longos períodos. Diante disso, a análise de energia incidente se mostra altamente relevante para a segurança da vida e do patrimônio. Especificamente nesse trabalho, a proteção do trabalhador é mais bem enfatizada, mas cabe salientar que a busca por níveis de energia incidente seguros para o trabalho em eletricidade estão atrelados também à preservação dos sistemas elétricos.

A análise de energia incidente busca avaliar a existência do risco de arco elétrico e, em caso afirmativo, estimar os níveis de energia incidente e as distâncias seguras de trabalho, além de propor métodos para a proteção do conteúdo humano e material.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo realizar uma análise de energia incidente em redes de distribuição, que será estimada a partir de modelos matemáticos existentes, propondo estratégias para mitigar esses níveis e apresentar medidas de proteção individual contra eventos de arco elétrico.

1.3.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Investigar as estratégias de mitigação dos níveis de energia incidente com base na literatura e nos modelos de estimação de energia incidente empregados;
- Avaliar as medidas de proteção para os trabalhadores em eletricidade com base em normas nacionais e internacionais;
- Elaborar a metodologia de análise dos estudos de casos, utilizando o *software* ATPDraw e os modelos do IEEE Std 1584-2002 e do IEEE Std 1584-2018;
- Obter resultados e conclusões em termos de energia incidente, técnicas de mitigação e seleção de EPIs a partir das análises realizadas, propondo futuras pesquisas se aplicável.

1.4 ORGANIZAÇÃO DE CAPÍTULOS

O presente trabalho é composto de cinco capítulos, sendo o primeiro capítulo denominado Introdução e o último, Considerações Finais. O capítulo Referências Bibliográficas é alocado a parte e não numerado, logo não está incluso na contagem.

No segundo capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica, a qual inclui o estado da arte no que se refere à energia incidente e seus termos correlatos. Também são apresentados os guias, códigos e normas aplicáveis ao tema, tanto internacionais como nacionais, entre eles os dois modelos da IEEE Std 1584, que provém o modelo de estimativa de energia incidente mais difundido e a NFPA 70E, que serve de guia para a seleção das medidas de proteção aplicáveis aos trabalhadores em eletricidade. Além disso, técnicas para mitigação dos níveis de energia incidente também são apresentadas, conforme a literatura.

No terceiro capítulo, é discutida a metodologia empregada no trabalho, apresentando em detalhes as redes empregadas nos estudos de caso e fazendo uma breve apresentação sobre as funcionalidades e a aplicabilidade do *software* ATPDraw no presente trabalho.

O quarto capítulo disserta sobre os estudos de caso deste trabalho, onde são tratados os aspectos de simulação de eventos de falta e premissas para a análise de energia incidente, bem como a discussão dos resultados obtidos.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as considerações finais acerca deste trabalho, apontamentos quanto aos objetivos estipulados, resumos e artigos submetidos e publicados ao longo dessa pesquisa e perspectivas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão acerca dos principais registros científicos encontrados na literatura especializada, bem como as normas, os guias e os procedimentos nacionais e internacionais que se referem à temática de energia incidente.

A Seção 2.1 aborda o estado da arte, apresentando os principais artigos, livros e trabalhos que tratam do arco elétrico e da energia incidente, enquanto a Seção 2.2 traz a normatização nacional e internacional do tema.

2.1 ESTADO DA ARTE

De modo geral, a pesquisa científica em torno da temática de energia incidente iniciou somente na década de 1980, com a publicação do trabalho pioneiro de Lee (1982). Porém, a questão do arco elétrico já vinha sendo discutida mais de duas décadas antes, como sinalizado por Kaufmann e Page (1960).

Nessa Seção, o conceito de arco elétrico é apresentado e uma linha do tempo quanto à sua pesquisa é tratada. A ênfase, no entanto, é direcionada ao tema de energia incidente. Além de conceituar este tema, são apresentados métodos de estimativa com base em artigos reconhecidos, além de estratégias de mitigação dos níveis de energia incidente apresentadas em livros e outros trabalhos institucionais.

2.1.1 Arco Elétrico

O arco elétrico é a passagem de corrente através do que era previamente o ar e se inicia a partir da ocorrência de um *flashover* ou da introdução de um material condutivo (DAS, 2012, p. 2). O período inicial da falta eleva a temperatura das imediações, carbonizando parte do material isolante, que passa a atuar como condutor, favorecendo a queda de tensão da falta e continuidade ao fluxo de corrente (KAUFMANN; PAGE, 1960). Nos terminais o nível de temperatura também é elevado, podendo alcançar 20.000 K ou mais, de forma que, nesse evento, o condutor não é o ar em si, mas sim o vapor do material dos terminais, normalmente um material condutor ou carbono (LEE, 1982).

Ainda que largamente utilizado de maneira benéfica, como em soldagem e fornos a arco, além de cauterizações, o arco elétrico representa um perigo e um risco, como foi primeiramente notado e sinalizado por Kaufmann e Page (1960). Nessa época, os problemas ocasionados por

arco elétrico em redes de distribuição já eram comuns, tanto que o Instituto Americano de Engenheiros Eletricistas (do inglês, *American Institute of Electrical Engineers*, AIEE) criou uma força tarefa para buscar soluções para essas ocorrências. O AIEE se converteu no Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (do inglês, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, IEEE) em 1963 e, 4 anos depois, Shields (1967) trouxe novamente à tona a questão do arco elétrico em sistemas de distribuição de baixa tensão, dessa vez discutindo o uso de relés suplementares de falta à terra como medida de proteção contra os danos severos a equipamentos elétricos decorrentes da energia do arco elétrico.

Uma década depois, Stanback (1977) propôs testes para estimar os danos mencionados por Shields para sistemas de 277/480 V. Ao reportar os resultados adquiridos nos testes realizados, o autor recomendou práticas para as configurações de coordenação tempo-corrente e proteção de falta à terra em dispositivos de proteção contra sobrecorrente. Além disso, apresentou equações que indicam a taxa de queima de barramentos e carcaças, em polegadas cúbicas por segundo, como função da corrente de arco. Uma vez que essas equações são válidas somente para sistemas com o mesmo nível de tensão dos testes propostos por Stanback, elas não serão apresentadas neste trabalho.

Kindermann (1997) apontou que as faltas fase-terra são as mais corriqueiras em sistemas elétricos, enquanto as trifásicas são mais raras, visto que exigem a participação das três fases. Porém, ainda que as faltas que envolvem duas ou três fases sejam menos comuns, Dunki-Jacobs (1986) alertou para a possibilidade de escalamento de faltas fase à terra. Segundo o autor, na condição de autossustentação do arco, ou seja, quando iniciado entre fase e terra, a falta pode permanecer nessa condição ou escalar para uma falta bifásica ou trifásica envolvendo a terra.

Observa-se que, entre a publicação dos trabalhos de Kaufmann e Page (1960) e de Stanback (1977) e ainda à época de Dunki-Jacobs (1986), a grande preocupação quanto ao evento do arco elétrico eram as perdas materiais, causadas principalmente pelos incêndios decorrentes desse tipo de fenômeno. Foi com Lee (1982) que a questão das queimaduras ocasionadas por arco elétrico surgiu na literatura, impulsionando a proposição de modelos para estimar a energia térmica liberada pelo arco e sua consequente aplicação no gerenciamento de risco do trabalho em eletricidade.

Entre os riscos associados ao fenômeno do arco elétrico, estão as queimaduras térmicas, mas também se pode citar o choque elétrico, partículas de metal derretido, estilhaços, explosões, ondas de pressão, luz intensa, som intenso, incêndios, e o efeito do plasma e de campos magnéticos intensos, além de vapores e gases tóxicos (DAS, 2012, p. 6). A queimadura térmica é a mais conhecida e difundida, uma vez que grande parte dos trabalhos dessa área são

direcionados a propor modelos que estimem a energia térmica liberada pelo arco elétrico, porém o conjunto de vestimentas e de equipamentos que o trabalhador deve usar o protege, em menor ou maior nível, de todos esses riscos.

2.1.2 Energia Incidente

2.1.2.1 Conceito e Estimativa

As aplicações de arco elétrico permitem reconhecê-lo como uma fonte de calor. A energia térmica liberada por esse fenômeno e incidente em uma superfície é denominada energia incidente. Define-se energia incidente como “a quantidade de energia térmica impressa em uma superfície, a uma certa distância da fonte, gerada durante um evento de arco elétrico” (IEEE, 2018, p. 19).

O trabalho de Lee (1982) é considerado pioneiro na sinalização do risco térmico decorrente do arco elétrico como o outro perigo elétrico. À época da publicação deste trabalho, somente o choque elétrico era reconhecido como perigo elétrico e os riscos associados ao arco elétrico se limitavam a questões técnicas. Ao propor um modelo para estimar a energia térmica produzida pelo arco, este autor consolidou-se como pioneiro nos estudos de arco elétrico, abrindo precedentes para a proposição de outros modelos, sendo os mais conhecidos os de Doughty, Neal e Floyd (1998) e o do IEEE (2002).

O modelo de Lee, denominado Modelo Teórico, estabelece que a tensão do arco corresponde a 70,7% da tensão da fonte e a corrente a 70,7% do valor da corrente de curto-circuito franco, sendo todas as variáveis trifásicas. Assim, pode-se afirmar que a potência máxima do arco, em watts, é 0,5 vezes a capacidade de curto-circuito do sistema daquele ponto, dada em volt-ampère. É importante apontar, portanto, que esse modelo leva em conta somente parâmetros elétricos, não levando em consideração fatores como o calor absorvido pela pele e o calor refletivo pelas superfícies adjacentes ao arco elétrico.

A fim de fundamentar sua proposição de um modelo para estimar energia térmica produzida pelo arco elétrico, o autor apresentou dados referentes a suportabilidade do corpo humano frente ao aumento de temperatura, de modo a tratar das distâncias de trabalho para queimaduras curáveis e fatais. Conforme Artz, Moncrief e Pruitt (1979 apud LEE, 1982), quando a temperatura da pele está em 44 °C, o mecanismo de equilíbrio de temperatura do corpo começa a falhar em cerca de 6 horas, de forma que, se o corpo ficar submetido a esse nível de temperatura por 6 horas ou mais, podem ocorrer danos às células. Para o intervalo entre 44 °C e 51 °C, a taxa de destruição das células dobra a cada grau, de forma que, acima de 51

°C, essa taxa é extremamente rápida. Sob uma temperatura de 70 °C, leva apenas 1 segundo para a total destruição da célula. Assim, uma exposição da pele sob uma temperatura de a partir de 96 °C com duração de 0,1 segundos implica na total destruição do tecido, enquanto para temperaturas abaixo de 80 °C, nesse mesmo intervalo de tempo, o tecido pode ser curado.

Duas equações que permitem calcular as distâncias para uma queimadura curável e para uma queimadura fatal, dadas por (1) e (2), respectivamente, foram estabelecidas por Lee (1982). Estas expressões mostram o risco térmico como função direta da capacidade da fonte (potência) e, obviamente, do tempo de exposição, não sendo função, portanto, da tensão da fonte.

$$D_c = \sqrt{2,65 \times MVA_{bf} \times t} \quad (1)$$

$$D_f = \sqrt{1,96 \times MVA_{bf} \times t} \quad (2)$$

Onde D_c representa a distância para uma queimadura curável e D_f a distância para uma queimadura fatal, ambas em pés (ft); MVA_{bf} é a potência da falta franca no ponto de ocorrência (MVA) e t o tempo de exposição em segundos.

Por fim, Lee (1982) também chama a atenção quanto a necessidade de se utilizar equipamentos de proteção e recomenda o uso de meios de separação do trabalhador em relação ao ponto de trabalho, bem como proíbe o trabalho em partes energizadas sob distância que represente perigo térmico.

Posteriormente, Neal, Bingham e Doughty (1996) apresentaram resultados de um programa de testes de arcos elétricos envolvendo duas ou três fases, cuja proposta foi confirmar a energia radiante e convectiva produzida pelo arco elétrico e determinar a efetividade de vestimentas de proteção em reduzir e minimizar queimaduras. Os testes foram realizados para tensões de circuito aberto de 600 V e 2,4 kV, a fim de permitir a simulação de faltas fase-fase e trifásicas em sistema de distribuição.

Como resultado, (3) foi proposta, a qual representa a curva de energia incidente em sistemas de 600 V e comprova seu comportamento inverso à distância, conforme fora previamente sinalizado por Lee (1982).

$$E_{inc} = \frac{K \times E_{arc}}{D^{2,2}} \quad (3)$$

Onde E_{inc} é a energia incidente em cal/cm²; K é um fator fixo, cujo valor é de 0,0000432 pés/cm²; D é a distância entre o arco e o trabalhador em pés e E_{arc} é a energia total do arco em calorias.

O efeito do confinamento do arco também foi investigado na série de testes proposta. Considerando espaçamentos de 4 polegadas ou menos, a presença do compartimento implica no aumento entre 118% e 142% do valor da energia incidente. Testes de arcos elétricos bifásicos e trifásicos, em 610 V, também foram feitos, a fim de avaliar a diferença dos níveis de energia incidente considerando os dois tipos de evento.

Os programas de testes tratado em Neal, Bingham e Doughty (1996) e em Doughty et al. (1997) permitiu aos autores estabelecer as seguintes premissas:

- (i) A energia incidente alcança um valor máximo conforme o espaçamento dos eletrodos aumenta. No entanto, a energia incidente máxima tipicamente ocorre a um espaçamento entre eletrodos que é superior ao espaçamento que produz a máxima potência de arco;
- (ii) A energia incidente é diretamente proporcional ao tempo de duração do arco;
- (iii) A energia incidente é significativamente afetada pelo ambiente circundante;
- (iv) A função de transferência de radiação é o percentual da energia total do arco elétrico por unidade de área que é realmente recebida a uma distância específica da fonte, isto é, trata-se da energia incidente. Este valor varia com a corrente de arco, a configuração dos eletrodos e o ambiente circundante do arco.

Um segundo modelo para estimativa de energia incidente foi proposto por Doughty, Neal e Floyd (1998), no qual os autores apresentaram os resultados obtidos por um programa de testes desenvolvido para medir a energia incidente de arcos trifásicos em sistemas de 600 V e determinar o efeito do confinamento do arco na energia incidente. Este trabalho foi posteriormente republicado em 2000.

Nesse trabalho, fica estabelecido que “qualquer processo de estimação de energia incidente requer o conhecimento acerca da tensão de circuito aberto e da corrente de falta franca disponível no local do arco, a duração do arco, a configuração e o espaçamento entre os eletrodos, o compartimento circundante ao arco, se houver, e a distância do arco” (DOUGHTY; NEAL; FLOYD, 1998). Esse axioma é também válido para outros modelos que serão apresentados posteriormente.

No programa de testes proposto, as configurações não-confinada (*open-air*) e confinada (*in-box*) foram testadas com as mesmas condições, a saber:

- Tensão de circuito aberto: menor ou igual a 600 V;

- Duração do arco: 6 ciclos (100 milissegundos);
- Orientação dos eletrodos: vertical;
- Espaçamento entre os eletrodos: 1,25 polegadas;
- Corrente de curto-circuito franco: 16 – 50 kA.

Os eletrodos utilizados eram cobre maciço e com diâmetro 3/4 de polegada de diâmetro e, para o caso do arco confinado, o compartimento empregado tinha formato cúbico com aresta de 20 polegadas. Os testes foram conduzidos com o compartimento não aterrado pois, de acordo com Doughty et al. (1997), essa condição produz a máxima energia incidente. A medição de energia incidente foi feita empregando calorímetros.

Para a duração do arco estabelecida no programa de testes, a energia incidente máxima é dada por (4) e (5) para ambientes abertos e confinados, respectivamente. Para arcos com duração diferente de 6 ciclos, aplicar (6) para arcos em ambiente aberto e (7) para arcos confinados.

$$E_{MA} = 527,1D_A^{-1,9593}(0,0016F^2 - 0,0076F + 0,8938) \quad (4)$$

$$E_{MB} = 103,87D_B^{-1,4738}(0,0093F^2 - 0,3453F + 5,9675) \quad (5)$$

$$E_{MA} = 5271D_A^{-1,9593} \times t_A(0,0016F^2 - 0,0076F + 0,8938) \quad (6)$$

$$E_{MB} = 1038,7D_B^{-1,4738} \times t_A(0,0093F^2 - 0,3453F + 5,9675) \quad (7)$$

Onde E_{MA} é a energia incidente máxima em ambiente aberto e E_{MB} , para ambiente fechado, ambas em cal/cm²; D_A e D_B são as distâncias a partir dos eletrodos, ou seja, a distância de trabalho, em polegadas, para ambientes aberto e fechado, respectivamente; F é a corrente de falta franca, em kA, e t_A a duração do arco, em segundos. A distância de trabalho deve ser maior ou igual a 18 polegadas e a corrente de falta franca deve estar dentro do intervalo de 16 a 50 kA.

Ao se rearranjar as expressões (6) e (7), obtém-se (8) e (9), que servem para determinar a distância requerida para se produzir um dado nível máximo de energia incidente, sendo útil para a definição da distância para uma queimadura de segundo grau ou o limite de proteção de uma vestimenta de dada caloria.

$$D_A = \left[\left(\frac{t_A}{E_{MA}} \right) \times (8,434F^2 - 40,06F + 4711) \right]^{0,5104} \quad (8)$$

$$D_B = \left[\left(\frac{t_A}{E_{MB}} \right) \times (9,66F^2 - 358,7F + 6198) \right]^{0,6785} \quad (9)$$

Assim, o modelo de Doughty, Neal e Floyd (1998) difere-se do modelo de Lee (1982) ao definir os limites de aplicação do modelo, definir um modelo para estimar a energia incidente do arco elétrico confinado e investigar os efeitos do confinamento nos níveis de energia incidente. Para correntes de falta franca reduzidas, a energia incidente para um arco elétrico em ambiente fechado é de 1,5 a 2,5 vezes maior que o mesmo arco em ambiente aberto e, para correntes de falta franca elevadas, esse fator multiplicativo fica estabelecido entre 2,5 e 2,8 vezes.

Um novo modelo para a estimacão de energia incidente só foi proposto em 2002, a partir da publicação do guia IEEE Std 1584. Esse modelo será tratado na Seção 2.2, porém cabe dizer que, no período entre a primeira versão desse guia, em 2002, e segunda versão, em 2018, muitos trabalhos surgiram propondo melhorias no modelo ou sugerindo alternativas para cenários não contemplados por ele. O trabalho de Wu (2010), que apresenta uma modificacão no modelo de IEEE (2002) para aplicacões de média tensão, e o de Short e Eblen (2012), onde os autores propõem uma equacão para estimar a energia incidente de um arco monofásico confinado, são dois exemplos de proposições. Por não serem tão popularizados quanto os modelos do IEEE e os de Lee (1982) e de Doughty, Neal e Floyd (1998), eles não serão apresentados neste trabalho.

2.1.2.2 Técnicas de Mitigacão

Enquanto os artigos previamente citados tratam da estimativa de energia incidente, outros trabalhos da literatura tratam de formas de mitigacão dos níveis de energia incidente. A reduçã ou até mesmo eliminacão dos níveis de energia incidente passíveis de ocorrer em um sistema não apenas resguarda os equipamentos de serem danificados como também minimiza a exposicão dos trabalhadores a este risco, como apontado por Prigmore e Schaffer (2017).

A opçã mais segura para evitar o risco de arco elétrico é o trabalho desenergizado. No entanto, não é prático desligar uma linha de produçã ou um ramal inteiro toda a vez em que houver a necessidade de se executar um trabalho. Aliás, essa opçã não implica em uma condiçã necessariamente segura, pois, conforme comentado por Hodgson e Shipp (2010),

embora raro, um arco elétrico pode ocorrer enquanto o equipamento está ocioso e causar danos sérios. Diante disto, estratégias mais proativas são propostas na literatura.

Uma das melhores e mais eficientes técnicas para reduzir os níveis de energia incidente é extinguir a falta mais rápido, isto é, fazer com que o dispositivo de proteção atue com maior velocidade. Para tanto, pode-se recorrer ao ajuste nas configurações dos dispositivos de proteção ou ao emprego de diferentes técnicas de proteção, como o Intertravamento Seletivo de Zona (do inglês, *Zone Selective Interlocking*, ZSI) e a proteção diferencial de barramento (87B).

De acordo com Shipp e Wood (2011), ao se avaliar os dispositivos de proteção, é importante verificar se as curvas de atuação dos disjuntores estão corretas, isto é, sem a tolerância de *trip* default. Uma vez que muitos fabricantes se baseiam em coordenação conservativa, as curvas documentadas são conservativas também, o que significa que os dispositivos atuam mais rapidamente do que suas curvas publicadas. Além disso, se disponibilizado, é melhor que sejam empregadas as curvas tempo-corrente referentes aos testes de arco elétrico.

O conceito de ZSI surgiu na década de 1980, como uma alternativa mais econômica à proteção diferencial e aplicada à comutadores de baixa tensão. Burns, Baker e Hrcir (2019) apresentam dois cenários distintos para explicar como o esquema ZSI funciona. No primeiro cenário, quando a falta ocorre à jusante do disjuntor de um alimentador, ambos os disjuntores do alimentador e o principal sentirão o aumento de corrente. O disjuntor do alimentador enviará um sinal de bloqueio para o disjuntor principal, dizendo a ele que atue conforme foi configurado, enquanto o disjuntor do alimentador tenta extinguir a falta sem que o disjuntor principal atue, o que deixaria toda a linha desenergizada. Já no caso de a falta ocorrer à montante do disjuntor de um alimentador, esse não enviará o sinal de bloqueio ao disjuntor principal, de forma que o disjuntor principal reduzirá seu tempo de atuação para 2 ciclos.

Por sua vez, o conceito de proteção diferencial de barramento é bastante conhecido, mas “fica limitado à aplicação em equipamentos de média e alta tensão em função do custo e do espaço necessário” (HODGSON; SHIPP, 2010). Burns, Baker e Hrcir (2019) também destacam que este tipo de proteção requer três transformadores de corrente adicionais e um relé com a função ANSI 87.

Outra técnica para a redução dos níveis de energia incidente é a redução do nível da corrente de falta. A corrente de falta é uma característica da construção do sistema e, por isso, há poucas maneiras de reduzi-la, o que exige a instalação de outros equipamentos ou a substituição daqueles já existentes. No entanto, reduzir a corrente de falta pode não levar ao decréscimo da energia incidente, pois o tempo de atuação do dispositivo de proteção aumentará

com o menor nível de corrente de falta, o que conseqüentemente poderá aumentar a energia incidente, como apontam Paul e Jewell (2018).

Diante disso, lança-se mão de outras estratégias, cujo objetivo não é de reduzir o nível de energia incidente ao qual o trabalhador ou os equipamentos poderão ser submetidos, mas sim protegê-los adotando diferentes tecnologias. Entre elas, Paul e Jewell (2018) citam os comutadores arco-resistentes e o controle remoto de disjuntores empregando o *rack* remoto, além da chave de manutenção redutora de arco (do inglês *arc reduction maintenance switch*, ARM) e os relés com detecção de luz originada pelo evento de arco elétrico.

2.2 NORMATIZAÇÃO

2.2.1 Normatização Internacional

2.2.1.1 IEEE Std 1584-2002

O Guia IEEE para Realização de Cálculos de Risco de Arco Elétrico (IEEE Std 1584, do inglês *IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*) é um guia desenvolvido pelo Comitê da Indústria Química e Petrolífera da Sociedade de Aplicações Industriais do IEEE (*IEEE Industry Applications Society*, IAS) com o objetivo de prover modelos matemáticos aplicáveis na determinação da distância segura de exposição ao arco elétrico e da energia incidente.

Sua primeira versão foi publicada em 2002 e se converteu no principal documento aplicável em termos de estimativa de energia incidente. Recebeu alterações em 2004 e em 2011, tendo uma segunda versão sido publicada em 2018.

Nesta versão do guia, dois modelos são apresentados: o empírico, para sistemas de 208 V a 15 kV e o teórico, baseado no modelo de Lee (1982), para sistemas acima de 15 kV.

2.2.1.1.1 Modelo Empírico

O modelo empiricamente derivado se aplica a sistemas que atendam aos seguintes parâmetros:

- Tensões trifásicas de 208 V a 15 kV;
- Frequência de 50 Hz ou 60 Hz;
- Corrente de falta franca entre 700 A e 106 kA;
- Aterramentos de todos os tipos ou não-aterado;

- Compartimentos de tamanhos comumente empregados;
- Espaçamento entre os eletrodos de 13 a 152 mm;
- Faltas envolvendo as três fases.

Sua aplicação tem quatro etapas, a saber: determinação da corrente de arco; determinação da duração do arco; determinação da energia incidente e determinação da distância de aproximação segura.

A corrente de arco é definida em duas etapas: primeiro, determina-se o logaritmo da corrente de arco, empregando-se (10) para sistemas abaixo de 1000 V e (11) para sistemas com tensão igual ou maior que 1000 V. O valor final de corrente de arco é obtido utilizando (12).

$$\log I_a = K + 0,662 \log I_{bf} + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588(V \times \log I_{bf}) - 0,00304(G \times \log I_{bf}) \quad (10)$$

$$\log I_a = 0,00402 + 0,983 \log I_{bf} \quad (11)$$

$$I_a = 10^{\log I_a} \quad (12)$$

Onde \log é \log_{10} ; I_a é a corrente de arco, em kA; K é uma constante referente ao tipo de ambiente circundante, sendo igual a -0,153 para configurações abertas e -0,097 para configurações fechadas. I_{bf} é a corrente de falta franca trifásica, em kA; V é a tensão do nominal do sistema, em kV e G é o espaçamento entre os eletrodos, em mm.

Conhecido o valor da corrente de arco, determina-se o tempo de operação do dispositivo de proteção, que será empregado posteriormente no cálculo de energia incidente.

A estimativa de energia incidente segue também dois passos, como para a corrente de arco. Primeiro, determina-se o logaritmo da energia incidente normalizada usando (13) e a energia incidente normalizada empregando (14). A energia incidente é dada por (15).

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \log I_a + 0,0011G \quad (13)$$

$$E_n = 10^{\log E_n} \quad (14)$$

$$E = 4,184C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \quad (15)$$

Onde \log é \log_{10} ; E_n é a energia incidente normalizada para tempo e distância, em J/cm^2 ; K_1 é uma constante referente ao ambiente circundante, igual a -0,792 para configurações abertas e -0,555 para configurações fechadas; K_2 é uma constante referente ao aterramento, sendo nula para sistemas não-aterrados e aterrados por alta resistência e igual a -0,113 para sistemas aterrados; G é a distância entre os eletrodos, em mm; E é a energia incidente final, em J/cm^2 ; C_f é o fator de cálculo, sendo igual a 1 para tensões até 1000 V e 1,5 para 1000 V ou mais; t é a duração do arco, em segundos; D é distância de trabalho, em mm e x é o expoente de distância, cujos valores são tabelados em IEEE (2002). Especificamente para arcos elétricos em ambiente aberto, esse expoente é igual a 2.

A distância de aproximação segura, por sua vez, é dada por (16).

$$D_B = \left[4,184 C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (16)$$

Onde D_B é a distância do limite de aproximação até o ponto do arco, em mm; C_f é o fator de cálculo, igual a 1 para sistemas abaixo de 1000 V e 1,5 para sistemas de 1000 V ou mais; E_n é a energia incidente normalizada; E_B é a energia incidente em J/cm^2 na distância-limite ou distância de aproximação segura; t é a duração do arco em segundos; x é o expoente de distância, dado em IEEE (2020) e I_{bf} é a corrente de falta trifásica franca, em kA. Para obter a distância de aproximação segura, deve-se considerar o valor de E_B igual a 5,0 cal/cm² para pele desprotegida ou o nível suportado pela vestimenta utilizada, pois esses valores representam o nível de energia incidente que pode causar uma queimadura curável (segundo grau).

Por fim, é importante destacar que o guia recomenda uma segunda rodada de cálculos empregando a corrente de arco reduzida, que é 15% menor que a corrente de arco obtida a partir de (10), (11) e (12). Essa recomendação se dá pelo fato de que, “para dispositivos de proteção operando na porção mais íngreme de suas curvas tempo-corrente, uma pequena variação na corrente implica em uma grande mudança no tempo de operação” (IEEE, 2002, p. 31).

2.2.1.1.2 Modelo Teórico

Já para sistemas acima de 15 kV ou com distanciamentos distintos daqueles atendidos pelo modelo empírico, emprega-se o modelo teoricamente derivado, baseado no modelo de Lee (1982). Esse modelo se aplica a sistemas trifásicos em subestações abertas e a sistemas de

distribuição e transmissão, pois este é projetado para aplicações onde as faltas irão escalar para faltas trifásicas. Em caso de impossibilidade ou improbabilidade de se ocorrer o fenômeno de escalamento da falta, este modelo proverá um resultado conservativo, podendo o mesmo ocorrer se aplicá-lo a sistemas monofásicos.

Este modelo conta com apenas duas etapas, que contemplam a determinação da energia incidente e da distância de aproximação segura. Os valores de energia incidente e distância de aproximação segura para o modelo teórico proposto no presente guia são dados por (17) e (18), respectivamente. Nota-se a independência de ambas as variáveis da corrente de arco elétrico, pois para sistemas de tensão acima de 15 kV, IEEE (2002) considera a corrente de arco igual à corrente de falta franca.

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{V} \times I_{\text{bf}} \times \left(\frac{t}{D^2} \right) \quad (17)$$

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \text{V} \times I_{\text{bf}} \times \left(\frac{t}{E_B} \right)} \quad (18)$$

Onde E é a energia incidente, em J/cm^2 ; V é a tensão do sistema, em kV; I_{bf} é a corrente de falta franca, em kA; t é o tempo de duração do arco, em segundos, e D a distância do possível ponto de arco até o trabalhador, em mm. Já D_B é a distância entre o limite de aproximação e o ponto de ocorrência do arco, em mm, e E_B a energia incidente, em J/cm^2 na distância-limite.

2.2.1.2 IEEE Std 1584-2018

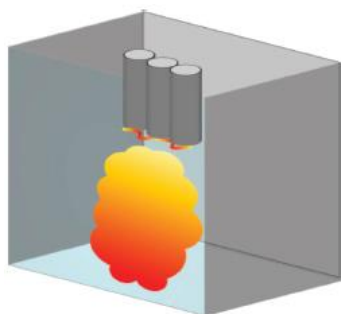
A segunda versão da IEEE Std 1584 foi publicada em 2018, sendo, portanto, a versão mais recente desse guia e se aplica a equipamentos elétricos e condutores em corrente alternada trifásica com tensões de 208 V a 15 kV. Não são apresentados cálculos para sistemas monofásicos em corrente alternada e para sistemas em corrente contínua e não são mencionadas recomendações quanto aos EPIs para mitigação do risco de arco elétrico.

O modelo proposto se aplica a sistemas que atendam aos seguintes parâmetros:

- Tensões de 208 V a 15 kV, trifásico, linha a linha;
- Frequência de 50 Hz ou 60 Hz;
- Corrente de falta franca de 500 A a 106 kA (para sistemas de 208 V a 600 V) e de 200 A a 65 kA (para sistemas de 601 V a 15 kV);

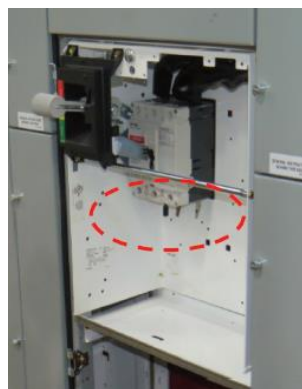
- Espaçamento entre condutores de 6,35 mm a 76,2 mm (sistemas de 208 V a 600 V) e de 19,05 mm a 254 mm (sistemas de 601 V a 15 kV);
- Distâncias de trabalho iguais ou maiores que 305 mm;
- Dimensões-limite para sistema confinado de 1244,6 mm (altura ou largura máxima) e 1549 m² (máxima área de abertura). A largura mínima do compartimento deve ser maior que o quádruplo do espaçamento entre os condutores;
- Configurações dos eletrodos:
 - Condutores verticais dentro de caixa ou invólucro metálico (VCB), conforme ilustrado na Figura 1 e na Figura 2;
 - Condutores verticais terminados em barreira isolante dentro de caixa ou invólucro metálico (VCBB) (Figura 3 e Figura 4);
 - Condutores horizontais em caixa ou invólucro metálico (HCB) (Figura 5 e Figura 6);
 - Condutores verticais ao ar livre (VOA) (Figura 7 e Figura 8);
 - Condutores horizontais ao ar livre (HOA) (Figura 9 e Figura 10).

Figura 1 – Ilustração da configuração VCB em teste.



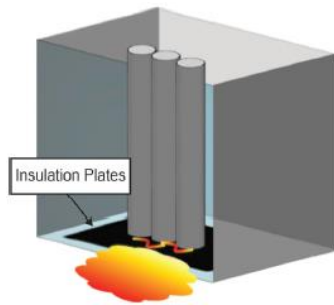
Fonte: Adaptado de IEEE (2018, p. 38).

Figura 2 – Equipamento com configuração VCB.



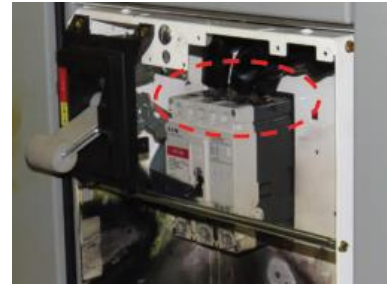
Fonte: Adaptado de IEEE (2018, p. 38).

Figura 3 – Ilustração da configuração VCBB em teste.



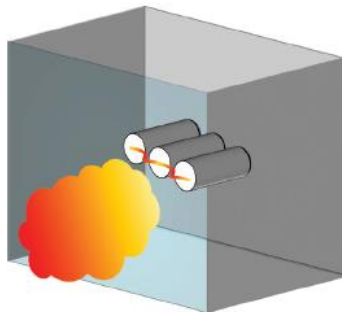
Fonte: Adaptado de IEEE (2018, p. 38).

Figura 4 – Equipamento com configuração VCBB.



Fonte: Adaptado de IEEE (2018, p. 38).

Figura 5 – Ilustração da configuração HCB em teste.



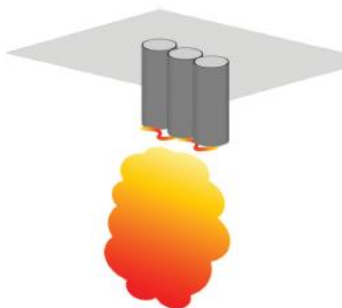
Fonte: Adaptado de IEEE (2018, p. 39).

Figura 6 – Equipamento com configuração HCB.



Fonte: Adaptado de IEEE (2018, p. 39).

Figura 7 – Ilustração da configuração VOA em teste.



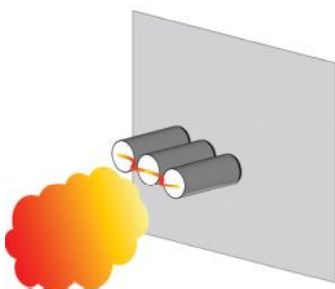
Fonte: Adaptado de IEEE (2018, p. 39).

Figura 8 – Equipamento com configuração VOA.



Fonte: Adaptado de IEEE (2018, p. 39).

Figura 9 – Ilustração da configuração HOA em teste.



Fonte: Adaptado de IEEE (2018, p. 39).

Figura 10 – Equipamento com configuração HOA.



Fonte: Adaptado de IEEE (2018, p. 39).

O modelo para cálculo de energia incidente é dividido em duas partes, de acordo com a tensão de circuito aberto do sistema: um modelo para sistemas com $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15000 \text{ V}$ e outro para sistemas com $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$. Sua aplicação segue 4 passos, nos quais se determina a corrente de arco elétrico, a duração do arco ou tempo de extinção da falta, a energia incidente e a distância de aproximação segura.

A primeira variável a ser determinada é a corrente de arco elétrico. Ela depende primeiramente da corrente de falta franca e de outros fatores tais como a distância entre os condutores, a configuração dos eletrodos e da tensão do sistema.

Se a tensão do sistema for $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15000 \text{ V}$, os valores intermediários para 600 V, 2700 V e 14300 V devem ser definidos aplicando-se (19):

$$I_{\text{arc_}V_{oc}} = 10^{(k_1 + k_2 \log I_{bf} + k_3 \log G)} (k_4 I_{bf}^6 + k_5 I_{bf}^5 + k_6 I_{bf}^4 + k_7 I_{bf}^3 + k_8 I_{bf}^2 + k_9 I_{bf} + k_{10}) \quad (19)$$

Onde I_{bf} é a corrente de falta trifásica franca, em kA; $I_{\text{arc_}600}$, $I_{\text{arc_}2700}$ e $I_{\text{arc_}14300}$ são as correntes de arco médias para V_{oc} igual a 600 V, 2700 V e 14300 V, respectivamente, em kA; G a distância entre os eletrodos, em mm; \log é o logaritmo na base 10 (\log_{10}) e k_1 a k_{10} coeficientes da Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficientes para determinação dos valores intermediários de corrente de arco elétrico.

Configuração dos eletrodos	V _{oc}	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅	k ₆	k ₇	k ₈	k ₉	k ₁₀
VCB	600 V	-0,04287	1,035	-0,083	0	0	-4,783E-09	1,962E-06	-2,290E-04	3,141E-03	1,092E+00
	2700 V	0,0065	1,001	-0,024	-1,557E-12	4,556E-10	-4,186E-08	8,346E-07	5,482E-05	-3,191E-03	9,729E-01
	14300 V	0,005795	1,015	-0,011	-1,557E-12	4,556E-10	-4,186E-08	8,346E-07	5,482E-05	-3,191E-03	9,729E-01
VCBB	600 V	-0,017432	0,98	-0,05	0	0	-5,767E-09	2,542E-06	-3,400E-04	1,187E-02	1,013E+00
	2700 V	0,002823	0,995	-0,0125	0	-9,20E-11	2,901E-08	-3,262E-06	1,569E-04	-4,003E-03	9,825E-01
	14300 V	0,014827	1,01	-0,01	0	-9,20E-11	2,901E-08	-3,262E-06	1,569E-04	-4,003E-03	9,825E-01
HCB	600 V	0,054922	0,988	-0,11	0	0	-5,382E-09	2,316E-06	-0,000302	0,0091	0,9725
	2700 V	0,001011	1,003	-0,0249	0	0	4,859E-10	-1,814E-07	-9,128E-06	-0,0007	0,9881
	14300 V	0,008693	0,999	-0,02	0	-5,04E-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
	2700 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
	14300 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
	2700 V	0,000435	1,006	-0,038	0	0	7,859E-10	-1,914E-07	-9,128E-06	-0,0007	0,9981
	14300 V	0,000904	0,999	-0,02	0	0	7,859E-10	-1,914E-07	-9,128E-06	-0,0007	0,9981

Fonte: Adaptado de IEEE (2018).

Os valores finais são determinados calculando primeiramente os termos da interpolação utilizando (20), (21) e (22) para determinar I_{arc_1} , I_{arc_2} e I_{arc_3} , respectivamente.

$$I_{arc_1} = \frac{(I_{arc2700} - I_{arc600})}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + I_{arc2700} \quad (20)$$

$$I_{arc_2} = \frac{(I_{arc14300} - I_{arc2700})}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + I_{arc14300} \quad (21)$$

$$I_{arc_3} = \frac{I_{arc_1}(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{I_{arc_2}(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (22)$$

Onde I_{arc_1} corresponde ao primeiro termo da interpolação, em kA, entre 600 V e 2700 V; I_{arc_2} é o segundo termo da interpolação, em kA, utilizado quando V_{oc} é maior que 2700 V e I_{arc_3} é o terceiro termo da interpolação, em kA, usado quando V_{oc} é menor ou igual a 2700 V. V_{oc} é a tensão de circuito aberto do sistema (tensão do sistema), em kV.

O valor final da corrente de arco é dado por (23) se $0,6 < V_{oc} \leq 2,7$ kV e por (24) se $V_{oc} > 2,7$ kV:

$$I_{arc} = I_{arc_3} \quad (23)$$

$$I_{arc} = I_{arc_2} \quad (24)$$

Se a tensão do sistema for $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$, encontra-se o valor intermediário apenas para 600 V, utilizando (19). Para obter o valor final da corrente de arco, aplica-se (25):

$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{0,6}{V_{oc}}\right)^2 \times \left[\frac{1}{(I_{arc_600})^2} - \left(\frac{0,6^2 - V_{oc}^2}{0,6^2 \times I_{bf}^2}\right) \right]}} \quad (25)$$

Onde I_{arc} é a corrente de arco final, em kA; V_{oc} é a tensão de circuito aberto, em kV; I_{arc_600} é a corrente de falta para V_{oc} igual à 600 V e I_{bf} é a corrente de falta franca para faltas trifásicas, também em kA.

Já a duração do arco é definida como o “tempo que a fonte energizada a montante do arco leva para parar de prover corrente ou energia para a falta e é mais comumente dependente do tempo de operação do dispositivo de proteção contra sobrecorrente” (IEEE, 2018, p. 40). Para determinar a duração do arco ou tempo de extinção da falta, utiliza-se a corrente de arco determinada previamente.

Para definição dos valores de energia incidente, deve-se primeiro definir o fator de correção do tamanho do compartimento (do inglês, *enclosure size correction factor*, sigla CF) para as configurações em caixa (VCB, VCBB e HCB). As equações para essas configurações são normalizadas para compartimentos cúbicos de aresta 508 mm. Se o compartimento em avaliação for menor ou maior do que o compartimento usado na normalização, deve-se determinar o CF a fim de ajustar o valor de energia incidente.

De acordo com as instruções apresentadas em IEEE (2018, p. 28), “um conjunto de valores de altura e largura equivalentes são determinados com base na tensão do sistema, configuração dos eletrodos e na altura e largura do compartimento. A profundidade não é considerada a menos que a largura e a altura sejam ambas menores que 508 mm e a tensão do sistema seja menor que 600 V”. Em casos de compartimentos com áreas de abertura superiores a 1244,6 mm x 1244,6 mm, possíveis de serem encontrados em equipamentos reais, o CF para 1244,6 mm x 1244,6 mm pode ser usado para aplicação do modelo presente na norma em estudo.

A fim de estabelecer os valores equivalentes de altura e largura, é preciso determinar o tipo de compartimento em avaliação: típico ou raso. O compartimento do tipo raso é aquele que atende as seguintes condições, a saber: (i) a tensão do sistema é inferior a 600 V; (ii) ambas a altura e a largura são menores que 508 mm e (iii) a profundidade do compartimento é menor ou igual a 203,2 mm. Se qualquer uma destas condições não for atendida, considera-se o compartimento como típico.

A largura e a altura equivalentes devem ser determinadas para comparar estes valores com intervalos de medida específicos para cada uma das três configurações em caixa. Para obter os valores de largura e a altura equivalentes, aplicar (26) e (27), respectivamente. As diretrizes para determinar os valores equivalentes de altura e largura para dadas variações de dimensões de compartimento e de configurações de eletrodos são apresentadas na Tabela 2.

$$\text{Width}_1 = \left(660,4 + (\text{Width} - 660,4) \times \left(\frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right) \times 25,4^{-1} \quad (26)$$

$$\text{Height}_1 = \left(660,4 + (\text{Height} - 660,4) \times \left(\frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right) \times 25,4^{-1} \quad (27)$$

Onde Width_1 e Height_1 são os valores equivalentes de largura e altura, respectivamente; Width o valor real de largura do compartimento, em mm, e Height o valor real de altura do compartimento, também em mm; V_{oc} é a tensão do sistema (kV), A uma constante de valor 4 para configuração VCB e 10 para configurações VCBB e HCB e B uma constante igual a 20 para VCB, 24 para VCBB e 22 para HCB.

Tabela 2 – Diretivas para determinação de altura e largura equivalentes do compartimento.

Variável	< 508 (mm)	≥ 508 e ≤ 660,4 (mm)	> 660,4 e ≤ 1244,6 (mm)	> 1244,6 (mm)
VCB				
Width_1	= 20 (se típico) = 0,03937 × Width (se raso)	= 0,03937 × Width	Obtido a partir de (26) e o valor real	Obtido a partir de (26) com Width = 1244,6 mm
Height_1	= 20 (se típico) = 0,03937 × Height (se raso)	= 0,03937 × Height	= 0,03937 × Height	= 49
VCBB				
Width_1	= 20 (se típico) = 0,03937 × Width (se raso)	= 0,03937 × Width	Obtido a partir de (26) e o valor real	Obtido a partir de (26) com Width = 1244,6 mm
Height_1	= 20 (se típico) = 0,03937 × Height (se raso)	= 0,03937 × Height	Obtido a partir de (27) e o valor real	Obtido a partir de (27) com Height = 1244,6 mm
HCB				
Width_1	= 20 (se típico) = 0,03937 × Width (se raso)	= 0,03937 × Width	Obtido a partir de (26) e o valor real	Obtido a partir de (26) com Width = 1244,6 mm
Height_1	= 20 (se típico) = 0,03937 × Width (se raso)	= 0,03937 × Height	Obtido a partir de (27) e o valor real	Obtido a partir de (27) com Height = 1244,6 mm

Fonte: Adaptado de IEEE (2018, p. 29).

A partir dos valores equivalentes obtidos, determina-se o tamanho equivalente do compartimento empregando (28), onde Height_1 é a altura equivalente, Width_1 a largura

equivalente e EES o tamanho equivalente, todos do compartimento. Para configurações típicas de compartimento o valor mínimo de EES é 20.

$$EES = \frac{\text{Height}_1 + \text{Width}_1}{2} \quad (28)$$

O CF para compartimento típico é obtido a partir de (29):

$$CF = b_1 \times EES^2 + b_2 \times EES + b_3 \quad (29)$$

Para obter o CF para compartimento raso, utilizar (30):

$$CF = \frac{1}{b_1 \times EES^2 + b_2 \times EES + b_3} \quad (30)$$

Onde CF é o fator de correção do tamanho do compartimento, b_1 a b_3 são coeficientes fornecidos pela Tabela 3 e EES é o tamanho equivalente do compartimento.

Tabela 3 – Coeficientes para definição do fator de correção do tamanho do compartimento (CF).

Tipo de compartimento	Configuração dos eletrodos	b_1	b_2	b_3
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 (2018).

Com o valor do CF definido, é possível obter o valor de energia incidente. Para isso, se a tensão do sistema for $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15000 \text{ V}$, empregar (31), (32) e (33) para estipular os valores intermediários.

$$E_{600} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left[k_1 + k_2 \log G + \left(\frac{k_3 I_{\text{arc}_600}}{k_4 I_{\text{bf}}^7 + k_5 I_{\text{bf}}^6 + k_6 I_{\text{bf}}^5 + k_7 I_{\text{bf}}^4 + k_8 I_{\text{bf}}^3 + k_9 I_{\text{bf}}^2 + k_{10} I_{\text{bf}}} \right) + k_{11} \log I_{\text{bf}} + k_{12} \log D + k_{13} \log I_{\text{arc}_600} + \log \frac{1}{\text{CF}} \right]} \quad (31)$$

$$E_{2700} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left[k_1 + k_2 \log G + \left(\frac{k_3 I_{\text{arc}_2700}}{k_4 I_{\text{bf}}^7 + k_5 I_{\text{bf}}^6 + k_6 I_{\text{bf}}^5 + k_7 I_{\text{bf}}^4 + k_8 I_{\text{bf}}^3 + k_9 I_{\text{bf}}^2 + k_{10} I_{\text{bf}}} \right) + k_{11} \log I_{\text{bf}} + k_{12} \log D + k_{13} \log I_{\text{arc}_2700} + \log \frac{1}{\text{CF}} \right]} \quad (32)$$

$$E_{14300} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left[k_1 + k_2 \log G + \left(\frac{k_3 I_{\text{arc}_14300}}{k_4 I_{\text{bf}}^7 + k_5 I_{\text{bf}}^6 + k_6 I_{\text{bf}}^5 + k_7 I_{\text{bf}}^4 + k_8 I_{\text{bf}}^3 + k_9 I_{\text{bf}}^2 + k_{10} I_{\text{bf}}} \right) + k_{11} \log I_{\text{bf}} + k_{12} \log D + k_{13} \log I_{\text{arc}_14300} + \log \frac{1}{\text{CF}} \right]} \quad (33)$$

Onde E_{600} , E_{2700} e E_{14300} são os valores de energia incidente, em J/cm², para V_{oc} igual a 600 V, 2700 V e 14300 V, nessa ordem; T corresponde à duração do arco, em ms; G, o espaçamento entre os eletrodos, em mm; I_{arc_600} , I_{arc_2700} e I_{arc_14300} é a corrente de arco (kA) para 600 V, 2700 V e 14300 V; I_{bf} é a corrente de falta franca para faltas trifásicas, em kA; D, a distância entre os eletrodos e os calorímetros (distância de trabalho), em mm; CF, o fator de correção do tamanho do compartimento; log corresponde a log₁₀ e k_1 a k_{13} coeficientes da Tabela 4, selecionados conforme a tensão avaliada.

Tabela 4 – Coeficientes para determinação dos valores intermediários de energia incidente e de distância de aproximação segura.

Configuração dos eletrodos	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅	k ₆	k ₇	k ₈	k ₉	k ₁₀	k ₁₁	k ₁₂	k ₁₃
600 V													
VCB	0,753364	0,566	1,752636	0	0	-4,783E-09	0,000001962	-0,000229	0,003141	1,092	0	-1,598	0,957
VCBB	3,068459	0,26	-0,098107	0	0	-5,767E-09	0,000002524	-0,00034	0,01187	1,013	-0,06	-1,809	1,19
HCB	4,073745	0,344	-0,370259	0	0	-5,382E-09	0,000002316	-0,000302	0,0091	0,9725	0	-2,03	1,036
VOA	0,679294	0,746	1,222636	0	0	-4,783E-09	0,000001962	-0,000229	0,003141	1,092	0	-1,598	0,997
HOA	3,470417	0,465	-0,261863	0	0	-3,895E-09	0,000001641	-0,000197	0,002615	1,1	0	-1,99	1,04
2700 V													
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	1,569E-04	-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
14300 V													
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	1,569E-04	-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	1,160E-04	-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

Fonte: Adaptado de IEEE (2018).

Para obter o valor final, determinar primeiro os termos da interpolação utilizando (34), (35) e (36), sendo E_1 o primeiro termo da interpolação entre 600 V e 2700 V; E_2 , o segundo termo, empregado quando $V_{oc} > 2700$ V e E_3 o terceiro termo, usado quando $V_{oc} \geq 2700$ V. V_{oc} é a tensão de circuito aberto (tensão do sistema), em kV.

$$E_1 = \frac{(E_{2700} - E_{600})}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + E_{2700} \quad (34)$$

$$E_2 = \frac{(E_{14300} - E_{2700})}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + E_{14300} \quad (35)$$

$$E_3 = \frac{E_1(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{E_2(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (36)$$

O valor final da energia incidente, em J/cm^2 , é dado por (37) se $0,6 < V_{oc} \leq 2,7$ kV e por (38) se $V_{oc} > 2,7$ kV.

$$E = E_3 \quad (37)$$

$$E = E_2 \quad (38)$$

Para converter o valor de J/cm^2 para cal/cm^2 (unidade mais usual, especialmente no que se refere à classificação de EPIs), basta dividir o valor de energia em J/cm^2 por 4,184.

Se a tensão do sistema for $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$, aplicar (39) para a determinação do valor intermediário, enquanto o valor final é dado por (40).

$$E_{\leq 600} = \frac{12,552}{50} T \times \left[k_1 + k_2 \log G + \left(\frac{k_3 I_{arc} 600}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} \right) + \right. \\ \left. k_{11} \log I_{bf} + k_{12} \log D + k_{13} \log I_{arc} + \log \frac{1}{CF} \right] \quad (39)$$

$$E = E_{\leq 600} \quad (40)$$

Onde $E_{\leq 600}$ é o valor de energia incidente, em J/cm^2 , para $V_{oc} \leq 600$ V; T é a duração do arco, em ms; G , espaçamento entre os eletrodos (mm); I_{arc_600} é a corrente de arco para 600 V e I_{arc} , para $V_{oc} \leq 600$ V (kA); I_{bf} , corrente de falta franca para faltas trifásicas (kA); D , distância entre os eletrodos e os calorímetros (distância de trabalho) (mm); CF é o fator de correção do tamanho do compartimento; \log corresponde a \log_{10} ; k_1 a k_{13} coeficientes da Tabela 4 para 600 V e E é a energia incidente final, em J/cm^2 .

O limite ou fronteira do arco, ou ainda, distância de aproximação segura, do inglês *arc-flash boundary*, é “a distância de uma fonte de arco na qual a energia incidente é calculada como $5,0 J/cm^2$ ou $1,2 cal/cm^2$ ” (AMMERMAN et al., 2008). A relevância desse valor consiste no fato de esta ser quantidade de energia incidente requerida para produzir uma queimadura de segundo grau curável em uma pele desprotegida.

Se a tensão do sistema for $600 V < V_{oc} \leq 15000$ V, determinar os valores intermediários empregando (41), (42) e (43).

$$AFB_{600} = 10^{\left[\frac{k_1 + k_2 \log G + \left(\frac{k_3 I_{arc_600}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} \right) + k_{11} \log I_{bf} + k_{13} \log I_{arc_600} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{T}}{-k_{12}} \right]} \quad (41)$$

$$AFB_{2700} = 10^{\left[\frac{k_1 + k_2 \log G + \left(\frac{k_3 I_{arc_2700}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} \right) + k_{11} \log I_{bf} + k_{13} \log I_{arc_2700} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{T}}{-k_{12}} \right]} \quad (42)$$

$$AFB_{14300} = 10^{\left[\frac{k_1 + k_2 \log G + \left(\frac{k_3 I_{arc_14300}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} \right) + k_{11} \log I_{bf} + k_{13} \log I_{arc_14300} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{T}}{-k_{12}} \right]} \quad (43)$$

Onde AFB_{600} , AFB_{2700} e AFB_{14300} é a distância de aproximação segura (mm) para V_{oc} igual a 600 V, 2700 V e 14300 V, respectivamente; G , o espaçamento entre os eletrodos (mm); I_{arc_600} , I_{arc_2700} e I_{arc_14300} a corrente de arco, em kA, para as tensões de 600 V, 2700 V e 14300 V, nessa

ordem; I_{bf} é a corrente de falta franca, para faltas trifásicas, em kA; CF, fator de correção de tamanho do compartimento; T, duração do arco, em ms; \log é igual ao \log_{10} e os coeficientes k_1 a k_{13} dispostos na Tabela 4.

Para obter o valor final, determinar primeiramente os termos da interpolação, conforme (44), (45) e (46):

$$AFB_1 = \frac{(AFB_{2700} - AFB_{600})}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + AFB_{2700} \quad (44)$$

$$AFB_2 = \frac{(AFB_{14300} - AFB_{2700})}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + AFB_{14300} \quad (45)$$

$$AFB_3 = \frac{AFB_1(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{AFB_2(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (46)$$

Onde AFB_1 é o primeiro termo da interpolação entre 600 V e 2700 V, em mm; AFB_2 é o segundo termo da interpolação, usado quando $V_{oc} > 2700$ V (mm); AFB_3 é o terceiro termo da interpolação, utilizado quando $V_{oc} \leq 2700$ V, em mm. V_{oc} é a tensão de circuito aberto (tensão do sistema), em kV.

O valor final de distância de aproximação segura (AFB), em mm, é dado por (47) para sistemas com tensão $0,6 < V_{oc} \leq 2,7$ kV e por (48) para sistemas com tensão $V_{oc} > 2,7$ kV.

$$AFB = AFB_3 \quad (47)$$

$$AFB = AFB_2 \quad (48)$$

Se a tensão do sistema for $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$, aplicar (49) para obter o valor intermediário e (50) para o valor final.

$$AFB_{\leq 600} = 10^{\left[\frac{k_1 + k_2 \log G + \left(\frac{k_3 I_{arc} 600}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} \right) + k_{11} \log I_{bf} + \frac{k_{13} \log I_{arc} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{T}}{-k_{12}} \right]} \quad (49)$$

$$AFB = AFB_{\leq 600} \quad (50)$$

Onde $AFB_{\leq 600}$ é o limite do arco, em mm, para $V_{oc} \leq 600$ V; G é o espaçamento entre os eletrodos (mm); I_{arc_600} é a corrente de arco para 600 V e I_{arc} a corrente de arco, ambas em kA, para $V_{oc} \leq 600$ V; I_{bf} é a corrente de falta trifásica franca, em kA; CF é o fator de correção do tamanho do compartimento; T , duração do arco (ms); \log refere-se ao \log_{10} e k_1 a k_{13} coeficientes para 600 V dados pela Tabela 4.

Bem como na versão de 2002, o modelo de 2018 tem como orientação um quinto passo na aplicação do modelo para determinação de energia incidente, onde se deve repetir os passos de determinação de duração do arco, energia incidente e distância de aproximação segura considerando a corrente de arco reduzida. O objetivo de se avaliar esse cenário é observar se a variação de corrente terá efeitos no tempo de operação dos dispositivos de proteção e, conseqüentemente, na energia incidente.

Para obter a corrente de arco reduzida, aplicar (51) e (52):

$$I_{arc_min} = I_{arc} \times (1 - 0,5VarC_f) \quad (51)$$

$$VarC_f = k_1 V_{oc}^6 + k_2 V_{oc}^5 + k_3 V_{oc}^4 + k_4 V_{oc}^3 + k_5 V_{oc}^2 + k_6 V_{oc} + k_7 \quad (52)$$

Onde $VarC_f$ é o fator de correção da variação da corrente de arco; I_{arc} é o valor final I_{arc} (para sistemas de tensão $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$) ou os valores intermediários I_{arc_600} , I_{arc_2700} e I_{arc_14300} (para sistemas com tensão $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15000 \text{ V}$), em kA; I_{arc_min} é a segunda corrente de arco, reduzida com base no fator de correção da variação, dada em kA e V_{oc} é a tensão de circuito aberto entre 0,208 kV e 15 kV. Os coeficientes k_1 a k_7 são dados na Tabela 5.

Tabela 5 – Coeficientes para obtenção do fator de correção da variação da corrente de arco.

Configuração dos eletrodos	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
VCB	0	-1,4269E-06	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

Fonte: Adaptado de IEEE (2018).

Os valores de energia incidente e de distância de aproximação obtidos com os valores de corrente de arco obtidos nessa etapa devem ser comparados com os obtidos para a corrente de arco integral e deve-se considerar como resultado os maiores valores obtidos.

2.2.1.3 NFPA 70E

A Norma Para Segurança Elétrica no Local de Trabalho (NFPA 70E, do inglês *Standard for Electrical Safety in Workplace*) é uma norma desenvolvida pela Associação Nacional de Proteção Contra Incêndios (NFPA, *National Fire Protection Association*), uma organização global sem fins lucrativos, criada em 1982, dedicada a eliminar óbitos, lesões e perdas patrimoniais e econômicas devido a incêndios, riscos elétricos e relacionados. Sua primeira versão foi lançada em 1979 e é republicada a cada três anos, sendo sua versão mais recente publicada no final de 2020 e vigente a partir de 2021.

O objetivo da NFPA 70E é promover práticas seguras de trabalho a partir da redução da exposição a maiores riscos elétricos. Sua versão vigente (NFPA 70E-2021) divide-se em artigos, que estão dispostos em três capítulos:

1. Práticas Seguras de Trabalho;
2. Requerimentos de Segurança em Manutenção;
3. Requerimentos de Segurança para Equipamentos Especiais.

O primeiro capítulo apresenta definições e orientações para práticas seguras de trabalho em eletricidade. Dos conceitos apresentados, a definição de resistividade ao arco (do inglês, *arc rating* ou *arc rated*, sigla AR) é bastante relevante para esse trabalho. AR é o valor atribuído aos materiais que descreve sua performance quando exposto a um evento de arco elétrico. Conforme NFPA (2021, p. 10), o AR é expresso em cal/cm² e é derivado do valor de performance térmica ao arco (do inglês, *arc thermal performance value*, sigla ATPV) ou da energia do limite de abertura (do inglês, *energy of breakopen threshold*, E_{BT}). Mesmo que o ATPV e a E_{BT} sejam definidos na norma *Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing* (ASTM F1959/F1959M), suas definições são apresentadas brevemente na NFPA 70E.

É importante destacar que uma vestimenta AR é diferente de uma vestimenta resistente à chama (do inglês, *flame resistant*, sigla FR). De acordo com Westex ([s.d.]), “para testar uma vestimenta como AR, o padrão oficial de classificação de arco exige que todas as vestimentas que se propõem a serem testadas como AR devem ser FR e, com isso, pode-se afirmar que todas as vestimentas AR são FR, mas nem todas as vestimentas FR são AR”.

Westex ([s.d.]) explica que, em todas as aplicações FR, o objetivo principal da vestimenta é resistir à ignição e, além disso, isolar o usuário do risco térmico, ou seja, reduzir ou eliminar qualquer queimadura de segundo e terceiro grau através do uso da vestimenta, mesmo em áreas diretamente impactadas pelo risco. Já ao testar um tecido como AR, a curva de Stoll modela prevê se ocorrerá ou não uma queimadura de segundo grau e a energia que pode causar uma queimadura dessa classificação naquele tecido em 50% das vezes, tornando esse valor de energia a classificação de arco daquele tecido e de qualquer vestimenta feita a partir dele.

A importância de se conhecer a AR de um certo material reside na seleção dos EPIs destinados ao trabalhador que atua em atividades com risco de arco elétrico. Ainda no primeiro capítulo, os métodos de análise de energia incidente e de categorização de EPI contra arco elétrico são apresentados como métodos aplicáveis para seleção de EPI contra arcos elétricos. É importante destacar que tanto um quanto o outro podem ser utilizados, mas não devem ser aplicados ao mesmo equipamento, no sentido de que, ao apresentar ambas as informações de categoria de EPI e de energia incidente, pode-se causar confusão na escolha do equipamento.

De acordo com NFPA (2021, p. 26), o método de análise de energia incidente considera que o nível de exposição à energia incidente deve ser baseado na distância de trabalho das áreas do rosto e peito do trabalhador a partir da possível fonte de arco para a específica tarefa a ser realizada, sendo as roupas de proteção e outros EPIs utilizados pelo trabalhador de acordo com esse valor de energia incidente. A seleção de vestimenta com AR e outros EPIs quando utilizado este método é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Seleção de vestimenta com AR e outros EPIs pelo método de análise de energia incidente.

Exposição à energia incidente entre 1,2 cal/cm² e 12 cal/cm²
<p>Vestimenta com AR igual ou superior a energia incidente estimada: Camisa de manga comprida AR e calças AR ou macacão AR ou traje AR; Escudo facial AR e balaclava AR ou capuz de proteção AR; Roupa exterior com AR (quando necessário); Luvas de couro para serviços pesados ou luvas AR ou luvas isolantes de borracha com protetores de couro.</p> <p>Equipamentos: Capacete; Óculos de segurança ou óculos de proteção; Protetor auricular; Calçado de couro.</p>
Exposição à energia incidente maior que 12 cal/cm²
<p>Vestimenta com AR igual ou superior a energia incidente estimada: Camisa de manga comprida AR e calças AR ou macacão AR ou traje AR; Capuz de proteção AR;</p>

Roupa exterior com AR (quando necessário);
Luvas AR ou luvas isolantes de borracha com protetores de couro.

Equipamentos:

Capacete;
Óculos de segurança ou óculos de proteção;
Protetor auricular;
Calçado de couro.

Fonte: Adaptado de NFPA (2021, p. 29).

Já o método de categorização de EPI contra arcos em corrente alternada aplica-se, por exemplo, nas situações apresentadas em NFPA (2021), mas também àquelas situações em que a energia incidente é estimada segundo os métodos conhecidos na literatura. Quatro categorias de EPI são definidas em NFPA (2021), conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Seleção de vestimenta com AR e outros EPIs pelo método de categorização de EPI.

Categoria	Classificação de Risco Mínima (cal/cm²)	EPI
1	4	<p>Vestimenta: Camiseta de manga longa AR e calças AR ou macacão AR; Escudo facial AR ou capuz AR; Jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete AR (opcional);</p> <p>Equipamentos de proteção: Capacete; Óculos de segurança ou óculos de proteção; Protetor auricular de inserção; Luvas de couro para trabalho pesado, luvas AR ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro; Calçado de couro (opcional);</p>
2	8	<p>Vestimenta: Camiseta de manga longa AR e calças AR ou macacão AR; Capuz AR ou escudo facial AR e balaclava AR; Jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete AR (opcional);</p> <p>Equipamentos de proteção: Capacete; Óculos de segurança ou óculos de proteção; Protetor auricular de inserção; Luvas de couro para trabalho pesado, luvas AR ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro; Calçado de couro.</p>
3	25	<p>Vestimenta: Camiseta de manga longa AR (conforme requerido); Calças AR (conforme requerido);</p>

		Macacão AR (conforme requerido); Jaqueta e calças do traje AR (conforme requerido); Capuz do traje AR; Luvas AR ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro; Jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete AR (opcional); Equipamentos de proteção: Capacete; Óculos de segurança ou óculos de proteção; Protetor auricular de inserção; Calçado de couro.
4	40	Vestimenta: Camiseta de manga longa AR (conforme requerido); Calças AR (conforme requerido); Macacão AR (conforme requerido); Jaqueta e calças do traje AR (conforme requerido); Capuz do traje AR; Luvas AR ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro; Jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete AR (opcional); Equipamentos de proteção: Capacete; Óculos de segurança ou óculos de proteção; Protetor auricular de inserção; Calçado de couro.

Fonte: Adaptado de NFPA (2021, p. 37).

Assim, para situações em que os EPIs sejam selecionados pelo método de categorização de EPI, a proteção térmica contra eventos de arco elétrico só é garantida para uma exposição de até 40 cal/cm². Para níveis de energia incidente superiores, o trabalho deve ser feito em equipamento ou linha desenergizado.

A NFPA (2021) também apresenta diretrizes quanto à aplicação do método de categorização de EPIs contra arcos elétricos para sistemas em corrente contínua. Com o crescimento da inserção de sistemas de geração distribuída (GD) nos sistemas de distribuição, essa referência pode servir de auxílio às equipes encarregadas da segurança do trabalho das distribuidoras de energia elétrica.

O segundo capítulo cobre aspectos para manutenção segura em equipamentos elétricos e instalações, mas não apresenta métodos de manutenção ou procedimentos de testes específicos. São discutidos requerimentos gerais de manutenção e premissas para situações específicas, além apresentar equipamentos os equipamentos de segurança pessoal e de proteção que devem ser empregados em situações de manutenção. Entre esses equipamentos estão os

equipamentos de aterramento; hastes de terra; luvas de borracha, mangas e protetores de couro; instrumentos de teste; mantas, tapetes isolantes ou equipamento isolante similar; barreiras de proteção; dispositivos externos para desenergização do circuito; lanternas portáteis; equipamento de aterramento para proteção temporária; calçado dielétrico; roupa de proteção; *jumpers* de *by-pass* e ferramentas manuais isoladas e isolantes.

Já o terceiro capítulo trata dos requerimentos de segurança para equipamentos especiais, tais como células eletrolíticas, baterias e salas de baterias, *lasers*, equipamentos de eletrônica de potência e equipamentos de laboratórios de pesquisa e desenvolvimento.

Em seus anexos apresenta, sob caráter informativo, os métodos de cálculo de energia incidente e limite de arco presentes na literatura, tais como os trabalhos de Lee (1982), Doughty, Neal e Floyd (1998) e IEEE (2018). Também há menção ao trabalho de Doan (2010), que propõe um modelo de cálculo de energia incidente para sistemas em corrente contínua até 1000 V.

2.2.1.4 NESC C2

O Código Nacional de Segurança Elétrica (NESC C2, do inglês *National Electrical Safety Code*, Comitê de Padrões Credenciados C2) é uma norma nacional americana aprovada pelo Instituto Americano de Normas Nacionais (ANSI, *American National Standards Institute*). Este código cobre disposições básicas para proteção de pessoas quanto aos riscos decorrentes da instalação, operação ou manutenção de condutores e equipamentos em subestações de energia elétrica e de redes de distribuição de energia elétrica aéreas e subterrâneas, além de linhas de comunicação. Este documento também inclui regras de trabalho para construção, manutenção e operação destes ambientes de trabalho e se aplica a sistemas e equipamentos operados por concessionárias ou sistemas e equipamentos similares de estabelecimentos industriais sob controle de pessoal especializado.

A configuração do NESC C2, sob autoria do IEEE, foi estabelecida em 1973, sendo anteriormente vinculado ao Escritório Nacional de Normas (*National Bureau of Standards*). A primeira edição por parte do IEEE foi publicada em 1981 e a atual versão vigora desde 2017.

O NESC C2-2017 divide-se em quatro partes, a saber:

1. Regras de Segurança para Instalação e Manutenção de Subestações de Energia Elétrica e Equipamentos;
2. Regras de Segurança para Instalação e Manutenção de Redes de Distribuição de Energia e Linhas de Comunicação Aéreas;

3. Regras de Segurança para Instalação e Manutenção de Redes de Distribuição de Energia e Linhas de Comunicação Subterrâneas;
4. Regras de Trabalho para Operação de Subestações de Energia Elétrica, Linhas de Comunicação e Equipamentos.

Essas partes são divididas em seções, das quais as seções 41 e 42 são as maior interesse no estudo de energia incidente, pois apresentam regras de trabalho para os empregadores e empregados, respectivamente.

A seção 41 diz respeito aos requerimentos gerais para os empregadores, que incluem que “os empregadores devem garantir que uma avaliação seja realizada para determinar a potencial exposição a um arco elétrico para trabalhadores que trabalham em ou próximo a linhas, partes ou equipamentos energizados” (IEEE, 2017, p. 278). Se a avaliação determinar exposição potencial do empregado, este não deve usar vestimenta feita de acetato, nylon, poliéster ou polipropileno a menos que possua AR, além de não poder usar uma roupa de cima, como casacos ou capas, de um tecido que possa sofrer ignição ou que continue a queimar quando exposto a chamas ou ao arco elétrico identificado na avaliação.

Caso o valor da exposição potencial avaliada seja superior que 2 cal/cm^2 , o empregador deve realizar uma análise de risco de arco detalhada ou utilizar a Tabela 8, a Tabela 9 e a Tabela 10 para determinar a categoria da vestimenta a qual os trabalhadores devem vestir quando trabalhando em ou próximo a linhas, partes ou equipamentos energizados em tensões de 50 V a 800 kV em corrente alternada. A análise de risco de arco deve incluir o cálculo de energia de arco estimada baseada na corrente de falta, na duração do arco e na distância entre o arco e o trabalhador.

Tabela 8 – Vestimentas para tensões de 50 V a 1000 V em corrente alternada.

Tipo de equipamento	Tensão nominal e cal/cm^2		
	50 - 250 V	251 - 600 V	601 - 1000 V
Gabinetes ou medidores independentes	4	20	30
Transformadores montados em solo	4	4	6
Medidores de transformadores de corrente e controle de fiação	4	4	6
Comutador com revestimento metálico e CCMs	8	40	60
Pedestais, caixas de ligação e de passagem	4	8	12
Ar livre (incluindo linhas)	4	4	6
Protetores de rede	4	-	-
Painéis monofásicos (todos) e trifásicos ($\leq 100 \text{ A}$)	4	8	12
Painéis trifásicos ($> 100 \text{ A}$)	4	-	-

Fonte: Adaptado de IEEE (2017).

Tabela 9 – Vestimentas para tensões de 1,1 kV a 46 kV em corrente alternada.

Tensão fase-fase (kV)	Corrente de falta (kA)	Sistema 4 cal Tempo de extinção máximo (ciclos)	Sistema 8 cal Tempo de extinção máximo (ciclos)	Sistema 12 cal Tempo de extinção máximo (ciclos)
1,1 a 15	5	46,5	93,0	139,5
	10	18,0	36,1	54,1
	15	10,0	20,1	30,1
	20	6,5	13,0	19,5
15,1 a 25	5	27,6	55,2	82,8
	10	11,4	22,7	34,1
	15	6,6	13,2	19,8
	20	4,4	8,8	13,2
15,1 a 36	5	20,9	41,7	62,6
	10	8,8	17,6	26,5
	15	5,2	10,4	15,7
	20	3,5	7,1	10,6
36,1 a 46	5	16,2	32,4	48,6
	10	7,0	13,9	20,9
	15	4,3	8,5	12,8
	20	3,0	6,1	9,1

Fonte: Adaptado de IEEE (2017).

Tabela 10 – Vestimentas para tensões de 46,1 kV a 800 kV em corrente alternada.

Tensão fase-fase (kV)	Corrente de falta (kA)	Sistema 4 cal Tempo de extinção máximo (ciclos)	Sistema 8 cal Tempo de extinção máximo (ciclos)	Sistema 12 cal Tempo de extinção máximo (ciclos)
46,1 a 72,5	20	18,2	36,4	54,5
	30	10,2	20,4	30,6
	40	6,6	13,2	19,7
	50	4,6	9,2	13,9
72,6 a 121	20	9,9	19,8	19,8
	30	5,7	11,4	17,1
	40	3,8	7,5	11,3
	50	2,7	5,4	8,1
138 a 145	20	12,1	24,1	36,2
	30	7,4	14,9	22,3
	40	5,2	10,4	15,6
	50	3,9	7,8	11,7
161 a 169	20	11,9	23,9	35,8
	30	7,4	14,8	22,2
	40	5,2	10,3	15,5
	50	3,9	7,8	11,6
230 a 242	20	13,6	27,3	40,9
	30	8,4	16,8	25,2
	40	5,9	11,7	17,6

	50	4,4	8,8	13,2
345 a 362	20	26,4	52,7	79,1
	30	16,2	32,4	48,6
	40	11,3	22,6	34,0
	50	8,5	17,0	25,5
500 a 550	20	23,1	46,2	69,2
	30	14,2	28,4	42,6
	40	10,0	19,9	29,9
	50	7,5	15,0	22,4
765 a 800	20	25,3	50,5	75,8
	30	15,6	31,2	46,8
	40	10,9	21,7	32,6
	50	8,2	16,3	24,5

Fonte: Adaptado de IEEE (2017).

Além disso, deve exigir que trabalhadores cubram o corpo inteiro com vestimenta AR e equipamentos que tenham uma classificação de risco não menor que o nível de energia incidente previsto.

Já a seção 42 trata das regras gerais para os empregados e estabelece que é mandatório que “trabalhadores devem manter todas as partes do seu corpo tão afastadas quanto possível de chaves, escovas, comutadores, disjuntores e outras partes nas quais possa ocorrer um arco durante a operação ou manobra” (IEEE, 2017, p. 286) e que sempre que foram ser expostos a condições de arco, os trabalhadores devem utilizar vestimentas que estejam de acordo com o apresentado na seção 41.

A nova versão do NESC C2 deverá ser publicada em 2022 e, de acordo com as propostas apresentadas em IEEE (2019), a nova versão do código deverá estar alinhada com o modelo mais recente de IEEE (2018).

2.2.2 Normatização Nacional

2.2.2.1 NR-10

As Normas Regulamentadoras (NRs) foram estabelecidas a partir da publicação da Portaria Nº 3.124, de 08 de junho de 1978 (BRASIL, 1978). Um conjunto de 28 NRs relativas à Segurança e à Medicina do Trabalho foi estabelecido pelo Ministério do Trabalho, sendo a NR-10 relacionada ao trabalho em eletricidade.

A NR-10 – Segurança em Instalações e Serviços de Eletricidade é uma norma que “estabelece requisitos e condições mínimas para a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta

ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade” (BRASIL, 2004). Fornece, portanto, diretivas quanto a medidas de controle e de proteção, segurança e procedimentos de trabalho e de emergência.

A NR-10, tendo sido publicada há mais de 40 anos, passou por alterações e atualizações em quatro ocasiões: em 1983, com a publicação da Portaria Nº 12, de 06 de junho de 1983 (BRASIL, 1983); em 2004, a partir da Portaria Nº 598, de 7 de dezembro de 2004 (BRASIL, 2004); em 2016, por meio da Portaria Nº 508, de 29 de abril de 2016 (BRASIL, 2016) e, mais recentemente, em 2019, por meio da publicação da Portaria Nº 915, de 30 de julho de 2019 (BRASIL, 2019). Porém, mesmo com essas modificações, a NR-10 não contempla explicitamente a questão do risco elétrico, havendo menção ao choque elétrico, queimaduras e outros riscos apenas no que tange à segurança em projetos.

Assim, limita-se a conceituar os termos de “Zona de Risco” e “Zona Controlada”. Por Zona de Risco (ZR) define-se o “entorno de parte condutora energizada, não segregada, acessível inclusive acidentalmente, de dimensões estabelecidas de acordo com o nível de tensão, cuja aproximação só é permitida a profissionais autorizados e com a adoção de técnicas e instrumentos apropriados de trabalho” (BRASIL, 2004) enquanto o conceito de Zona Controlada (ZC) é “entorno de parte condutora energizada, não segregada, acessível, de dimensões estabelecidas de acordo com o nível de tensão, cuja aproximação só é permitida a profissionais autorizados” (BRASIL, 2004). Os raios que determinam o tamanho da ZR e da ZC são definidos de tensões menores que 1 kV até tensões abaixo de 700 kV.

Quanto às medidas de proteção ao trabalhador, são estabelecidas como medidas de proteção coletiva a desenergização elétrica e, na impossibilidade desta, o emprego de tensão de segurança. Na impossibilidade de ambas, outras medidas devem ser tomadas, como isolamento das partes vivas, obstáculos, barreiras, sinalização, sistema de seccionamento automático de alimentação e bloqueio do religamento automático. Em caso de inviabilidade técnica ou insuficiência das medidas de proteção coletiva no controle de riscos, deve-se adotar EPIs específicos e adequados às atividades desenvolvidas, observando e atendendo ao disposto na NR-6 – Equipamento de Proteção Individual – EPI.

2.2.2.2 NR-6

A NR-6 – Equipamento de Proteção Individual – EPI foi estabelecida pela Portaria Nº 3.124, de 08 de junho de 1978 (BRASIL, 1978) e, bem como a NR-10, passou por diversas alterações e atualizações ao longo dos anos. Sua redação foi especialmente atualizada pela

Portaria Nº 25, de 15 de outubro de 2001 (BRASIL, 2001) ainda que ela tenha sido alterada outras 19 vezes, sendo a mais recente no ano de 2018.

A NR-6 estabelece como definição de EPI “todo o dispositivo ou produto, de uso individual utilizado pelo trabalhador, destinado à proteção de riscos suscetíveis de ameaçar a segurança e a saúde no trabalho” (BRASIL, 2001). A lista dos EPIs de acordo com essa norma foi alterada pela Portaria Nº 194, de 07 de dezembro de 2010 (BRASIL, 2010) e contempla:

- EPI para proteção da cabeça: capacete e capuz ou balaclava;
- EPI para proteção dos olhos e face: óculos, protetor facial e máscara de solda;
- EPI para proteção auditiva: protetor auditivo;
- EPI para proteção respiratória: respirador purificador de ar não motorizado, respirador purificador de ar motorizado, respirador de adução de ar tipo linha de ar comprimido, respirador de adução de ar tipo máscara autônoma e respirador de fuga;
- EPI para proteção do tronco: vestimentas e colete à prova de balas (uso permitido para vigilantes que trabalhem portando arma de fogo);
- EPI para proteção de membros superiores: luvas, creme protetor, manga, braçadeira e dedeira;
- EPI para proteção dos membros inferiores: calçado, meia, perneira e calça;
- EPI para proteção do corpo inteiro: macacão e vestimenta de corpo inteiro;
- EPI para proteção contra quedas com diferença de nível: dispositivo trava-queda e cinturão.

Ainda que os tipos de EPIs contra arco elétrico apresentados em Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020) sejam contemplados pela NR-6, a norma brasileira não apresenta direcionamento quanto à categoria ou a suportabilidade das vestimentas ao evento de arco elétrico, deixando uma lacuna em termos de seleção do EPI adequado nessas situações.

2.2.2.3 ABNT NBR 16384:2020

Em 2020, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a ABNT NBR 16384:2020 – “Segurança em eletricidade – Recomendações e orientações para trabalho seguro em serviços de eletricidade” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020), cujo “objetivo é fornecer orientações adicionais para a operação e a realização de serviços em eletricidade, visando à segurança das pessoas, trabalhadores e instalações, além de fornecer informações adicionais para a elaboração de um programa eficiente de segurança em

eletricidade para a execução dos serviços, bem como organizar os aspectos humanos na intervenção destas instalações por meio de um sistema de gerenciamento” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020).

Esta norma se aplica a serviços que operem desde a extra-baixa tensão (EBT) até a alta tensão (AT). Assim, também cobre instalações elétricas necessárias para geração, transmissão, transformação, distribuição e utilização de energia elétrica.

Termos definidos nessa norma são relevantes para a questão do arco elétrico, a saber: lesão, perigo, risco e risco elétrico. Por lesão, neste caso de natureza elétrica, entende-se “ferimento corporal produzido pelos efeitos térmicos e físicos do choque elétrico, arco elétrico, incêndio ou explosão provocada pela energia elétrica, como consequência da operação de uma instalação elétrica” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020). O perigo é uma situação ou condição com potencial para causar danos à integridade física das pessoas, meio ambiente, patrimônio ou perda de produção, devido à ausência de medidas de controle, enquanto o risco é a capacidade de causar esses danos, por meio da combinação de probabilidade ou frequência esperada de ocorrer. Portanto, o risco elétrico fica definido como a “probabilidade de ocorrer uma lesão versus proteções efetivas, devido às atividades com eletricidade” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020).

Os EPIs, bem como os Equipamentos de Proteção Individual (EPC) e os Sistemas de Proteção Coletiva (SPC), se incluem no termo “equipamentos” que, associados a ferramentas e dispositivos, devem atender integralmente aos requisitos das normas técnicas nacionais e, na ausência dessas, das normas estrangeiras ou internacionais aplicáveis. Como anteriormente afirmado em Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020), estes também devem possuir comprovantes de ensaio ou certificados, conforme a legislação aplicável, tais como o certificado de aprovação para EPIs e categoria de isolamento para instrumentos de teste. Quanto as vestimentas de proteção contra os efeitos térmicos do arco elétrico, recomenda-se que sejam especificadas de acordo com o nível de energia incidente, calculada em J/cm^2 ou cal/cm^2 , para cada equipamento do sistema elétrico, quando aplicável, empregando um método internacionalmente reconhecido (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020).

Além de vestimentas AR, há recomendação de que os níveis de energia incidente em cada situação operacional do sistema sejam informados no diagrama unifilar ou multifilar e que este seja elaborado para cada local, sistema elétrico ou equipamento, estando disponível a todos os envolvidos no local de serviço. Os valores de energia incidente e de distância de aproximação segura também devem contar na sinalização na advertência fixas e permanentes dos

equipamentos, além da informação dos EPIs e EPCs necessários à operação do equipamento. Dessa forma, o estudo de energia incidente deve fazer parte dos estudos realizados acerca do sistema elétrico, bem como medidas e meios de proteção contra arcos elétricos devem ser especificadas.

Além disso, a zona de risco de arco elétrico fica estabelecida de acordo com o cálculo de energia incidente, com um nível de exposição superior a 1,2 cal/cm². Em especial quanto ao serviço em painéis elétricos, não se recomenda a intervenção em painéis energizados quando o nível de energia incidente for superior a 40 cal/cm², em função da não existência de vestimenta com esse nível de proteção e, ainda, em caso de exposição igual ou superior a 8 cal/cm², há a recomendação de que os serviços sejam realizados em duplas. De acordo com Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020), “o uso de vestimenta de suportabilidade até 8 cal/cm² é recomendado para utilização diária, além de luvas de proteção contra riscos mecânicos”.

Quatro níveis de proteção contra arco elétrico são apresentados para vestimentas e demais EPIs (AE-1, AE-2, AE-3 e AE-4), conforme Tabela 11. Esses níveis de proteção se referem, respectivamente, a um ATPV mínimo de 4, 8, 25 e 40 cal/cm².

É importante destacar que, para tensões de 440 V ou mais, mesmo que o nível de energia incidente esteja abaixo de 8 cal/cm², a utilização de protetor facial com nível de proteção AE-2 é necessária, enquanto o uso desses em cubículos ou painéis com tensões de até 220 V não é exigido.

Tabela 11 – Níveis de proteção e EPI exigido conforme a ABNT NBR 16384:2020.

Nível de Proteção	EPI exigido
AE-1	Especificações idênticas aos níveis de proteção AE-2.
AE-2	Calça, camisa, jaqueta, macacão de utilização diária, casaco, macacão de parada, luva isolante, luva de cobertura de couro ou luvas de proteção compostas, balaclava, capacete, protetor facial, calçado de segurança para eletricitista e conjunto impermeável (quando aplicável).
AE-3	Calça de manobra, blusão de manobra, capuz tipo carrasco, luva de tecido em sobreposição à luva isolante (quando aplicável) e calçado de segurança para eletricitista.
AE-4	Calça de manobra, blusão de manobra, capuz tipo carrasco, luva de tecido em sobreposição à luva isolante (quando aplicável) e calçado de segurança para eletricitista.

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020).

Dessa forma, a ABNT NBR 16384:2020 converteu-se no documento mais abrangente em termos de energia incidente a nível nacional, mas não substitui a NR-10, atuando como um complemento a norma regulamentadora.

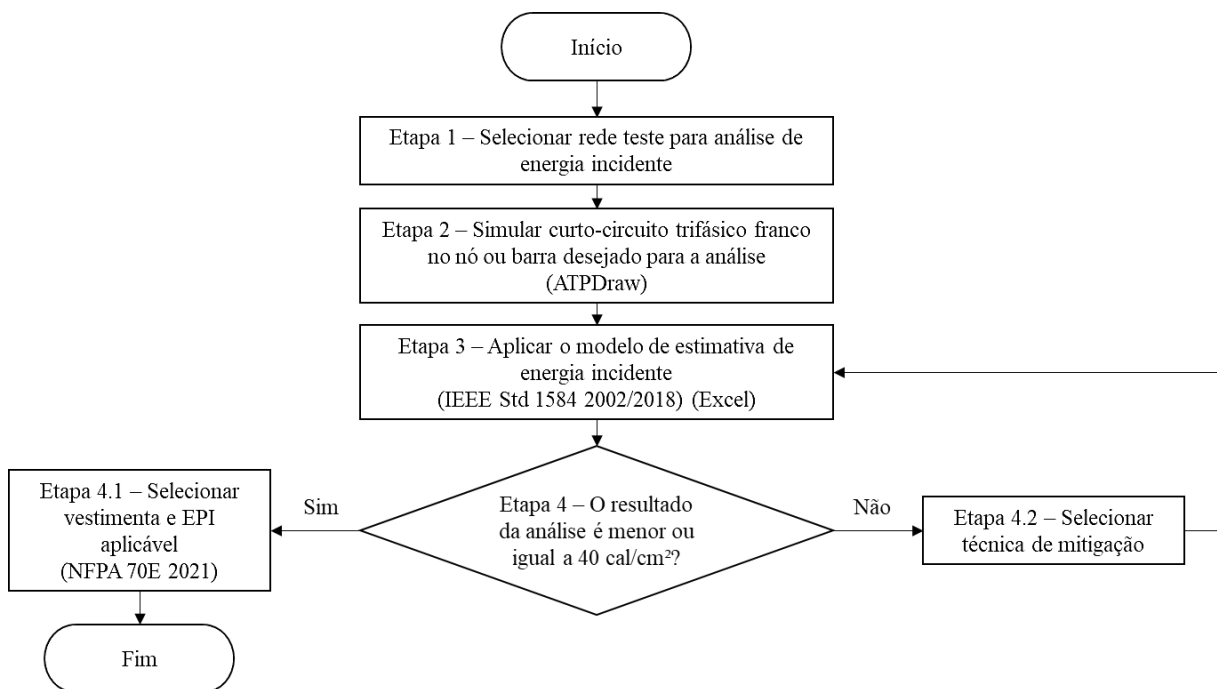
3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada uma visão geral da metodologia aplicada no presente trabalho, bem como as redes empregadas nos estudos de caso e o *software* para simulação de curto-circuito.

3.1 METODOLOGIA PROPOSTA

O presente trabalho propõe uma análise de energia incidente, isto é, a estimativa dos níveis de energia incidente e a determinação, se necessário, de proteção aos trabalhadores em ambiente energizado passível de ocorrência de um evento de arco elétrico. A sequência de implementação da análise proposta é apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Fluxograma da metodologia aplicada.



Fonte: Autoria própria.

O primeiro passo de uma análise é saber o local que será analisado, isto é, conhecer o sistema a se analisar, se será avaliado em sua totalidade ou apenas em um ponto. Conhecido o local a ser analisado, emprega-se o *software* ATPDraw para simular um curto-circuito trifásico franco nesse ponto. O valor do curto-circuito obtido na simulação e demais informações colhidas do sistema serão aplicados à estimativa de energia incidente empregando o Microsoft

Excel. Nesse trabalho, os modelos de 2002 e 2018 da IEEE Std 1584 são utilizados para estimar o nível de energia incidente e a distância de aproximação segura.

Passa-se à avaliação dos resultados da aplicação de ambos os modelos nos estudos de caso. Levando-se em consideração a existência de EPIs conforme NFPA (2021), se a energia incidente estimada para aquele local é menor ou igual a 40 cal/cm^2 , então é possível que o trabalhador execute as atividades em ambiente energizado, sendo selecionados os EPIs adequados, caso aplicáveis, e a análise é finalizada. Caso contrário, o trabalho energizado não é seguro naquela condição e se faz necessária a adoção de técnicas de mitigação que impliquem na redução do nível de energia incidente no ponto analisado. Escolhida a técnica de mitigação adequada, aplica-se novamente os modelos da estimacão de energia incidente selecionados e, se a energia incidente estimada for igual ou inferior a 40 cal/cm^2 , os EPIs adequados são selecionados, finalizando a implementação do processo de análise proposto.

3.2 ETAPAS DE IMPLEMENTAÇÃO

A implementação da análise proposta segue quatro grandes etapas, as quais são tratadas mais a fundo na presente seção.

3.2.1 Etapa 1 – Definição dos Estudos de Caso

Nesta etapa, os sistemas a serem avaliados são escolhidos, definindo-se os pontos de interesse para a análise de energia incidente. Com isso, são estabelecidos os estudos de caso que serão desenvolvidos no presente trabalho, que são:

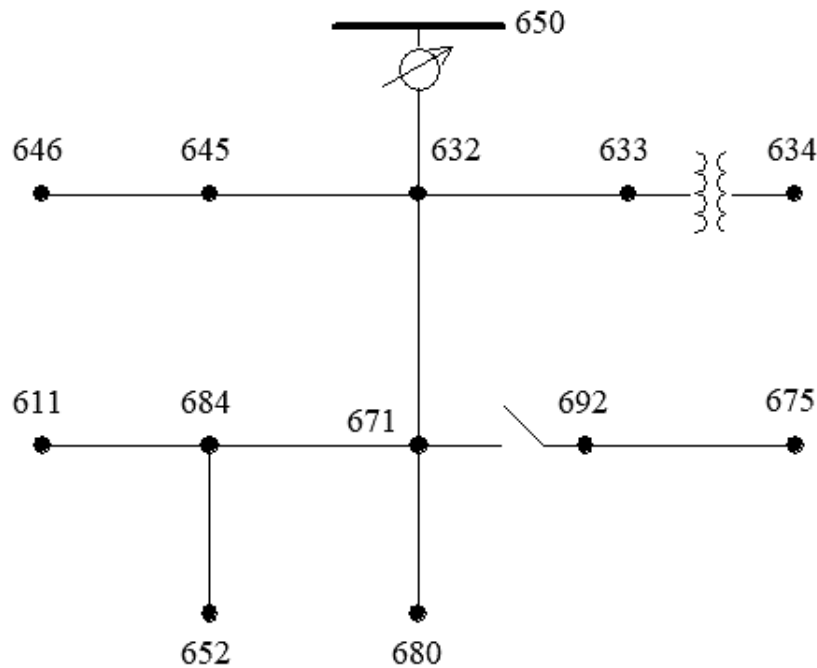
- Estudo de Caso 1: análise de energia incidente de arco elétrico decorrente de falta trifásica franca ocorrida no nó 634 do sistema IEEE 13-Node;
- Estudo de Caso 2: análise de energia incidente de arco elétrico decorrente de falta trifásica franca ocorrida no nó 633 do sistema IEEE 13-Node;
- Estudo de Caso 3: análise de energia incidente de arco elétrico decorrente de falta trifásica franca ocorrida na barra 888 do sistema IEEE 34-Bus.

Conforme IEEE (2020), tanto o sistema IEEE 13-Node quanto o IEEE 34-Bus são modelos de redes de distribuição do IEEE (1992 *Test Feeder Cases*) que foram criados em 1992 e são sistemas projetados para avaliar e comparar algoritmos na solução de sistemas radiais trifásicos desequilibrados. Além disso, é relevante destacar que ambos representam modelos de ordem reduzida de um circuito de distribuição real.

3.2.1.1 IEEE 13-Node – Estudos de Caso 1 e 2

O sistema 13-Node é um circuito muito pequeno utilizado para testar recursos comuns em *softwares* de distribuição de energia elétrica e está representado na Figura 12. Conforme descrito em IEEE (2020), este sistema opera em 4,16 kV e é caracterizado por ser curto, altamente carregado e desbalanceado, com linhas aéreas e subterrâneas e um único transformador ao longo da rede. Apresenta também capacitores *shunt* e um regulador de tensão na subestação.

Figura 12 – Sistema IEEE 13-Node.



Fonte: Adaptado de IEEE (2020).

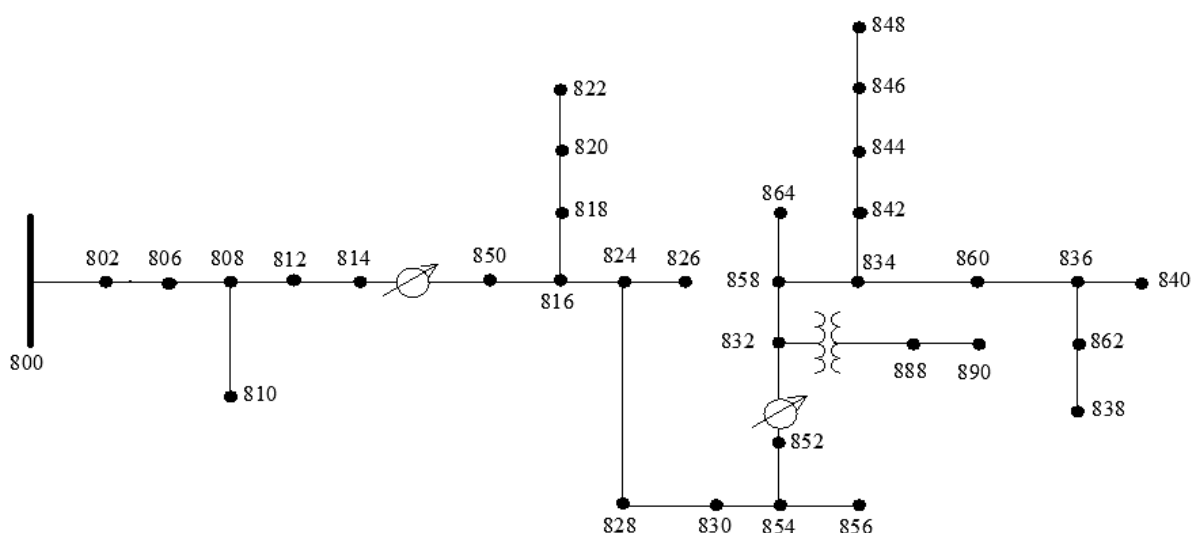
Os pontos de interesse nesse sistema para análise desenvolvida nesse trabalho são os nós 633 e 634, que estão localizados, respectivamente, nos lados de alta e baixa tensão do transformador de distribuição. Esse transformador possui potência de 500 kVA e conexão estrela-aterrada tanto do lado de 4,16 kV quanto no lado de 480 V. O segmento de rede que atende o nó 633 é aéreo.

3.2.1.2 IEEE 34-Bus – Estudo de Caso 3

De acordo com IEEE (2020), o sistema 34-Bus é um alimentador real localizado no estado do Arizona, nos Estados Unidos. Esse alimentador opera com tensão nominal de 24,9 kV e se caracteriza por ser longo e levemente carregado, mas desbalanceado. Possui apenas um transformador ao longo da linha, do qual deriva uma seção curta de 4,16 kV e apresenta dois reguladores de tensão na linha, além de capacitores *shunt*.

O ponto de interesse para a análise proposta nesse trabalho é a barra 888, que se localiza logo na saída do lado de baixa tensão do transformador de distribuição, conforme é possível visualizar na Figura 13. Esse transformador possui potência de 500 kVA e uma relação de tensão de 24,9/4,16 kV, sendo ambos os lados conectados conforme o esquema estrela-aterrada.

Figura 13 – Sistema IEEE 34-Bus.



Fonte: Adaptado de IEEE (2020).

A opção de se avaliar apenas a barra 888 se dá em função da tensão, pois apenas esta e a barra 890 tem tensão dentro do intervalo proposto pelos modelos de estimação de energia incidente empregados.

3.2.2 Etapa 2 – Curto-Circuito Utilizando o ATPDraw

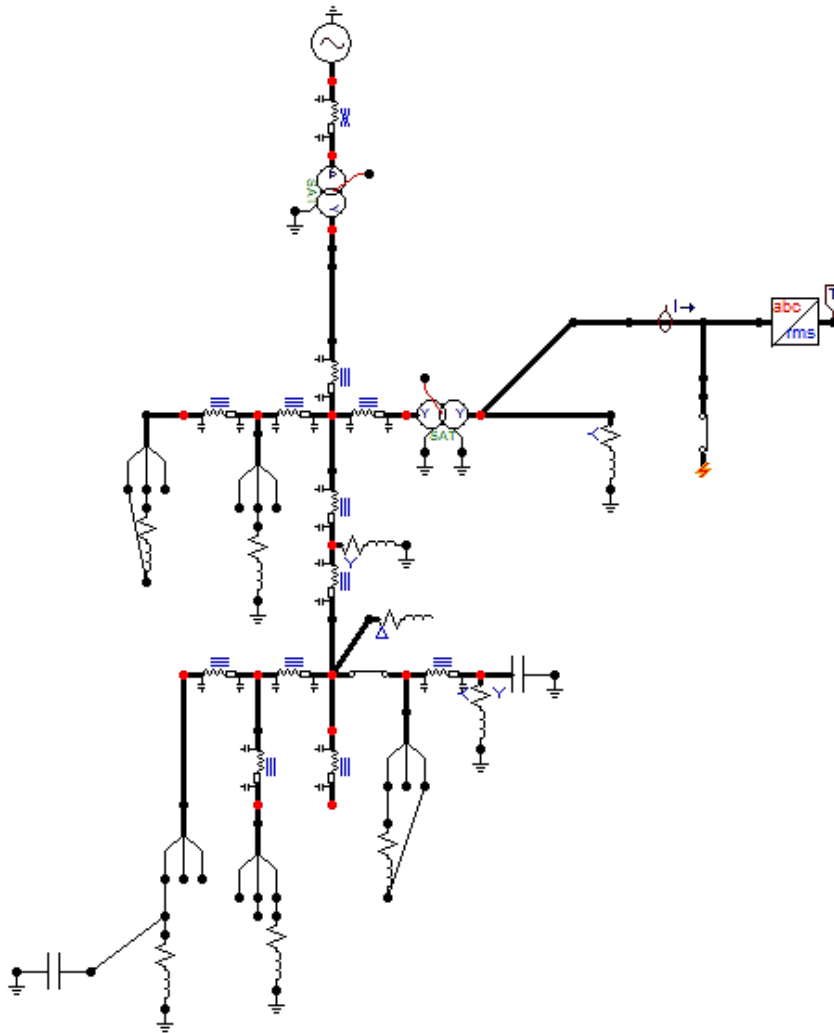
O ATPDraw é o pré-processador gráfico da versão ATP do Programa de Transitórios Eletromagnéticos (do inglês, *Electromagnetic Transients Program*, EMTP) para a plataforma Windows. Permite a análise no domínio do tempo ou varredura de frequência, podendo ser

aplicado a estudos de chaveamentos, harmônicas, surtos, coordenação da isolação, eletrônica de potência, HVDC, máquinas elétricas e sistemas de controle, além de ter uma interface amigável pois, conforme exposto em ATPDRAW (2020), o usuário é capaz de construir um circuito elétrico utilizando o mouse e selecionando componentes dispostos em um menu e a partir desse circuito o programa gera um arquivo de entrada do ATP no formato apropriado. Além disso, EEUG (2020) destaca que, por ser um programa livre, o ATP se consolidou como um programa universal para simulação digital de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos ao longo dos últimos 30 anos.

Neste trabalho, ATPDraw é empregado para simular um curto-circuito trifásico franco no ponto de interesse para cada cenário a ser analisado e a opção por esta ferramenta está atrelada ao fato de este ser um *software* livre. Três cenários de falta são simulados no *software*, os quais estão representados na Figura 14, na Figura 15 e na Figura 17.

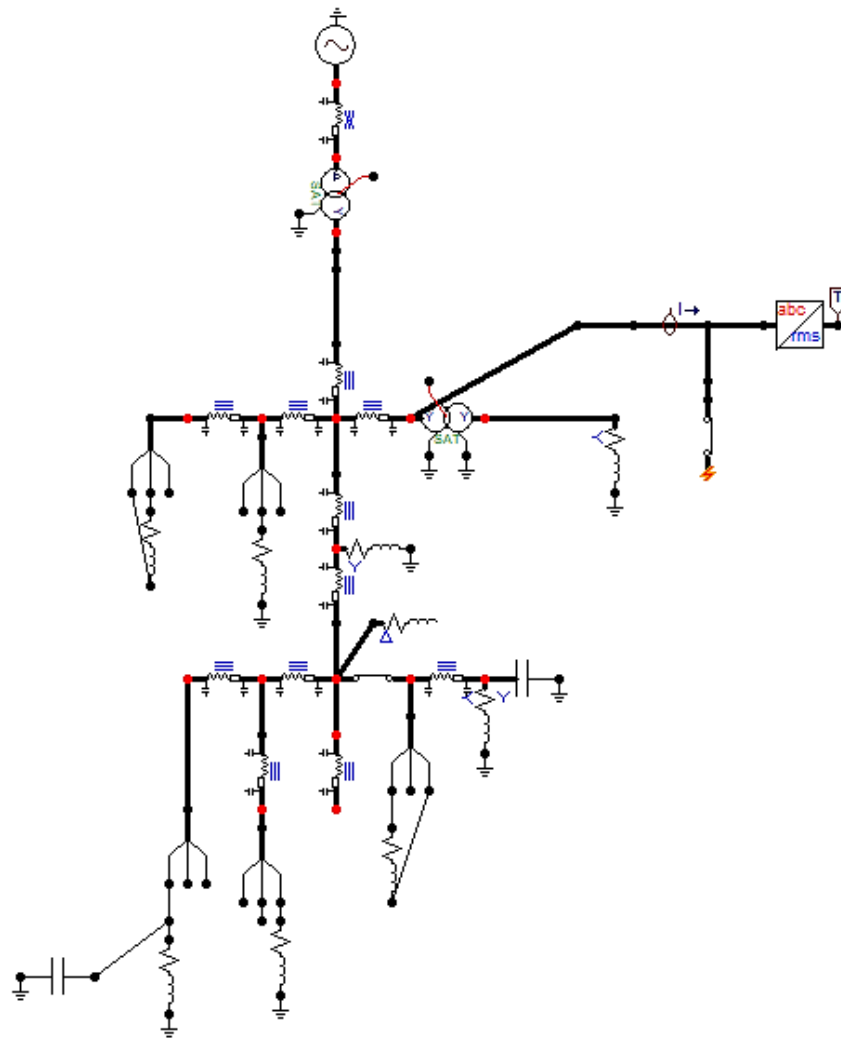
A Figura 14 ilustra uma falta trifásica franca no nó 634 do sistema 13-Node, isto é, uma falta no lado de baixa tensão do transformador da rede, cujo possível evento de arco elétrico é objeto de análise do Estudo de Caso 1. Já a Figura 15 apresenta outra falta de mesma natureza na mesma rede, porém no nó 633, que representa o lado de alta tensão do mesmo transformador. O arco elétrico que se origina desse curto-circuito é analisado como o Estudo de Caso 2.

Figura 14 – Modelagem de falta trifásica franca no nó 634 do sistema IEEE 13-Node.



Fonte: Autoria própria.

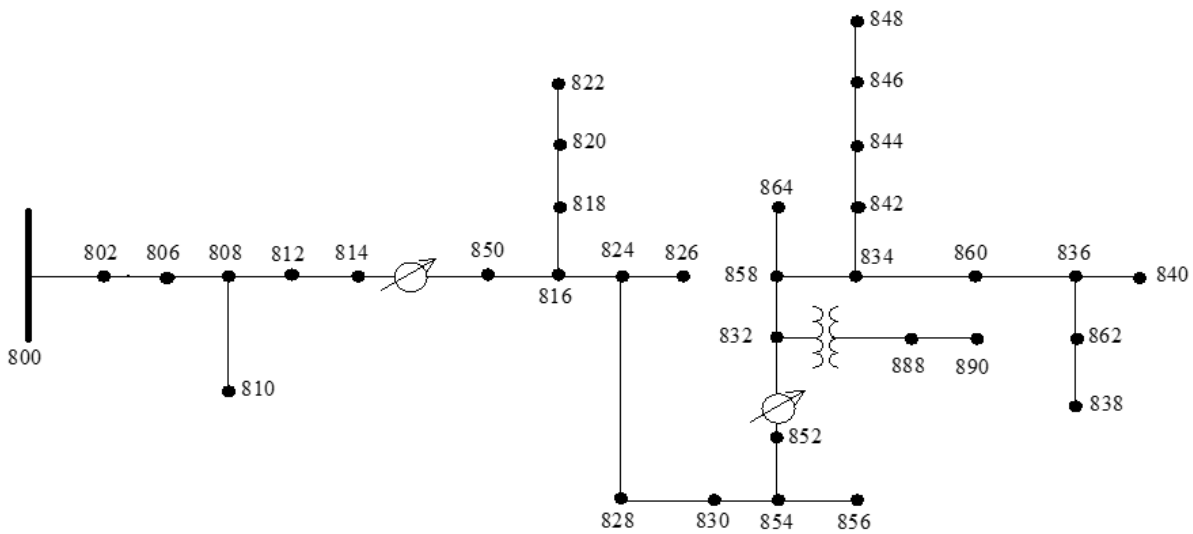
Figura 15 – Modelagem de falta trifásica franca no nó 633 do sistema IEEE 13-Node.



Fonte: Autoria própria.

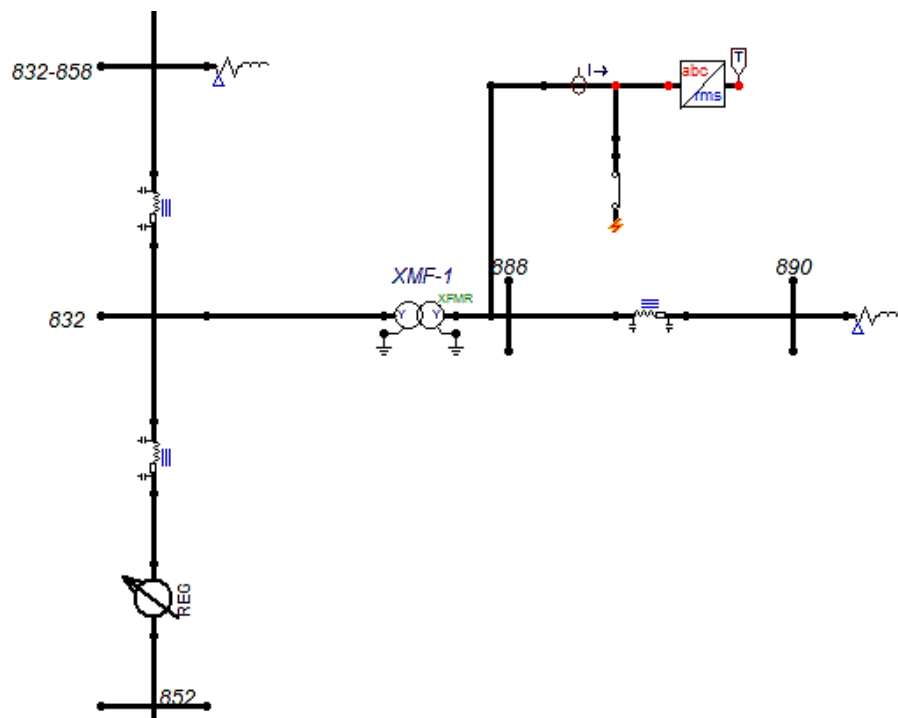
A Figura 16 mostra o sistema IEEE 34-Bus modelado no ATPDraw, enquanto a Figura 17 mostra o ponto de ocorrência de uma falta trifásica franca nesse sistema. A análise de energia incidente de um arco elétrico decorrente dessa falta é o objeto de análise do Estudo de Caso 3.

Figura 16 – Sistema IEEE 34-Bus modelado no ATPDraw.



Fonte: Autoria própria.

Figura 17 – Modelagem de falta trifásica franca na barra 888 do sistema IEEE 34-Bus.



Fonte: Autoria própria.

3.2.3 Etapa 3 – Aplicação dos Modelos IEEE Std 1584

Para estimar os níveis de energia incidente e os valores de distância de aproximação segura para os três estudos de caso propostos, ambas as versões de 2002 e de 2018 do guia IEEE

Std 1584 são empregadas. Em cada estudo de caso, a escolha do modelo adequado de cada uma das versões é função do nível de tensão do ponto em análise.

Para o primeiro estudo de caso, cujo nó avaliado tem tensão de 480 V, utiliza-se o Modelo Empírico com tensão inferior a 1000 V da IEEE Std 1584-2002 e o modelo para sistemas com $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$ da IEEE Std 1584-2018. Já para os segundo e terceiro estudos de caso, onde os pontos analisados têm ambos tensão de 4,16 kV, emprega-se o Modelo Teórico (IEEE Std 1584-2002) e o modelo para sistemas com $600 < V_{oc} < 15000 \text{ V}$ (IEEE Std 1584-2018). Tais modelos foram detalhados no Capítulo 2, Seção 2.2.1.1 (IEEE Std 1584-2002) e Seção 2.2.1.2 (IEEE Std 1584-2018) e as expressões empregadas em cada um dos estudos de caso são mostradas com maior minúcia no Capítulo 4.

3.2.4 Etapa 4 – Análise dos Resultados de Energia Incidente

Os resultados obtidos a partir da aplicação modelos de 2002 e de 2018 do guia IEEE Std 1584 devem ser analisados quanto ao nível de energia incidente estimado. É a partir deste nível que será tomada a decisão da próxima etapa, isto é, se é possível escolher uma vestimenta e os demais equipamentos de proteção ao trabalhador imediatamente ou há necessidade de se empregar alguma técnica de mitigação dos níveis de energia incidente para então selecionar o aparato de proteção.

Os EPIs categorizados propostos em NFPA (2021) têm a categoria número 4 como a de maior grau de proteção, cujas vestimentas e equipamentos de proteção protegem o trabalhador contra exposições de até 40 cal/cm^2 . Por isso, esse valor é considerado como o limite superior que, se não for ultrapassado, permite a escolha dos EPIs pertinentes e que, se ultrapassado, implica na obrigatoriedade do emprego de técnicas de mitigação.

Portanto, no caso de a energia incidente estimada ser inferior a 40 cal/cm^2 , os EPIs para proteção do trabalhador são selecionados e, assim, finaliza-se a análise proposta nesse trabalho. Caso contrário, deve ser selecionada uma técnica de mitigação e reaplicado o modelo de estimativa de energia incidente (2002, 2018 ou ambos, de acordo com aquele que resultou na ultrapassagem do limite superior de exposição) até que seja possível selecionar os EPIs adequados para o trabalho naquele ponto e, dessa forma, finalizar a análise.

3.2.4.1 Etapa 4.1 – Seleção de Vestimenta de Proteção Térmica e Demais EPIs

A seleção de vestimenta de proteção térmica e demais EPIs é feita conforme apresentado em NFPA (2021). Essa norma apresenta duas opções para a seleção de EPIs, conforme discutido

na Seção 2.2.1.3, mas em função da maior abrangência e popularidade do método de categorização, a seleção dos EPIs será feita considerando esse método.

3.2.4.2 Etapa 4.2 – Seleção de Técnicas de Mitigação

As técnicas de mitigação de energia incidente são normalmente associadas à questão do tempo de atuação do dispositivo de proteção do sítio em análise. Uma alteração no tempo de duração do arco pode ser feita pela modificação dos ajustes de temporização do equipamento de proteção existente ou pela troca desse dispositivo por outro com menor tempo de atuação, respeitando a coordenação e a seletividade.

Além disso, o aumento da distância de trabalho é outra abordagem que permite reduzir os níveis de exposição do trabalhador. Essa técnica pode ser empregada a partir do uso de ferramentas como a vara de manobra, por exemplo, que permite ao trabalhador operar mais longe do ponto possível de arco, diminuindo assim a quantidade de energia que atinge a superfície do seu corpo.

Tanto a redução na duração do arco elétrico quanto o aumento da distância de trabalho são utilizados nos estudos de caso do presente trabalho, sendo a escolha dessas técnicas baseadas no impacto dessas variáveis nos modelos de estimativa de energia incidente empregados, o que permite quantificar seus efeitos.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, a metodologia descrita no capítulo anterior é aplicada em três estudos de caso distintos. Os resultados obtidos e suas respectivas análises são apresentados a seguir.

4.1 ESTUDO DE CASO 1

O primeiro cenário simulado foi um evento de arco elétrico a partir da ocorrência de um curto-circuito trifásico franco no lado de baixa tensão do transformador de linha do sistema IEEE 13-Node. O nó 634 tem tensão nominal de 480 V e está orientado horizontalmente, ao ar livre e possui a configuração estrela aterrada.

Os resultados obtidos para o curto-circuito trifásico franco no nó 634 simulado no ATPDraw ratificam o carregamento desbalanceado do sistema, visto que as correntes de curto-circuito são diferentes para as fases A, B e C, o que é característico de redes de distribuição. A fase A apresenta maior valor de corrente (16,048 kA), enquanto as fases B e C apresentam valores bastante próximos, de 15,77 kA e 15,678 kA, nessa sequência.

Para aplicação do modelo de estimação de energia incidente do IEEE Std 1584, tanto o proposto pela versão de 2002 quanto pela de 2018, é necessário conhecer os seguintes parâmetros: a tensão de circuito aberto do nó ou barra onde ocorre a suposta falta; a corrente de curto-circuito trifásico franco no nó ou barra onde ocorre a suposta falta; o espaçamento entre os condutores; a distância entre os eletrodos e o operador; a configuração dos eletrodos e se o nó ou barra é ou não aterrado. A Tabela 12 apresenta os parâmetros para aplicação desses modelos no presente estudo de caso.

Tabela 12 – Parâmetros de aplicação do Estudo de Caso 1.

Parâmetros	Valores
Tensão de circuito aberto – V_{oc} (kV)	0,480
Corrente de curto-circuito trifásico franco – I_{bf} (kA)	16,048
Espaçamento entre eletrodos – G (mm)	76,2
Distância de trabalho – D (mm)	305
Configuração dos eletrodos	HOA
Aterramento	Y-G

Fonte: Autoria própria.

4.1.1 Análise de Energia Incidente Empregando o Modelo IEEE Std 1584-2002

A primeira etapa da análise de energia incidente é a determinação da corrente de arco elétrico. Visto a tensão de operação do nó avaliado (480 V), deve-se aplicar (53) para determinar o logaritmo da corrente de arco.

$$\log I_a = K + 0,662 \log I_{bf} + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588(V \times \log I_{bf}) - 0,00304(G \times \log I_{bf}) \quad (53)$$

Onde $K = -0,153$ (configuração aberta). Logo:

$$\log I_a = 0,7755 \quad (54)$$

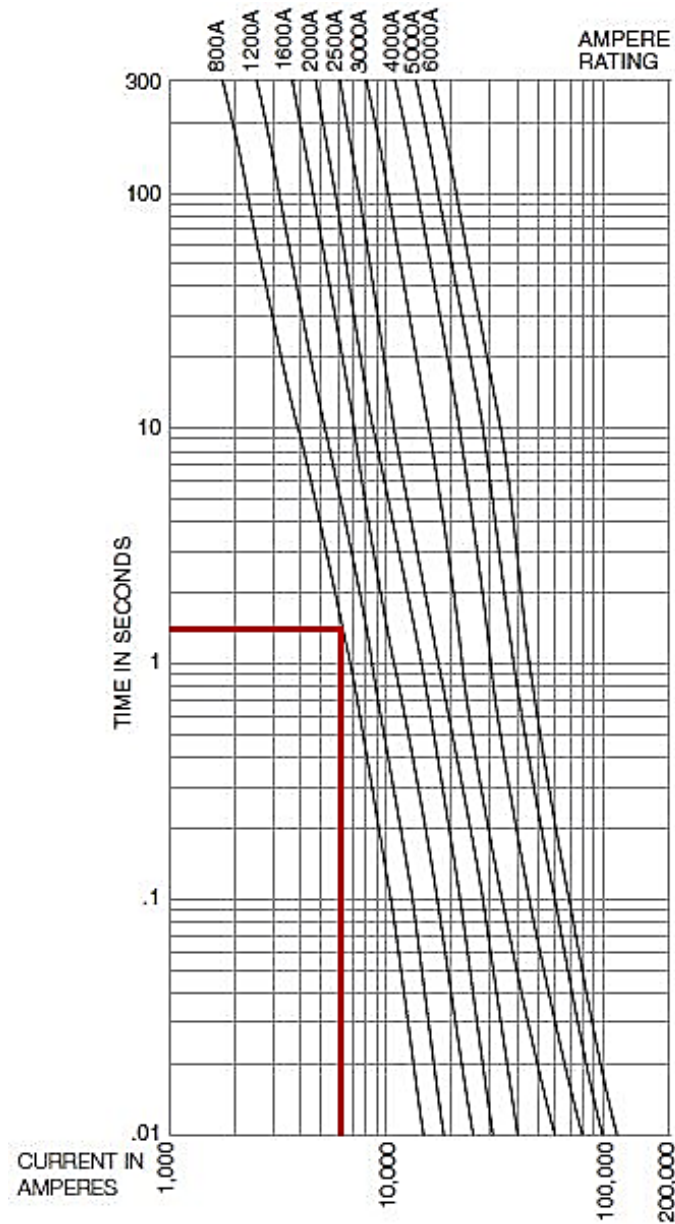
Empregando (54) em (55), determina-se a corrente de arco final (56), conforme segue.

$$I_a = 10^{\log I_a} \quad (55)$$

$$I_a = 5,9639 \text{ kA} \quad (56)$$

Adotando-se como dispositivo de proteção o fusível KRP-C_SP, da Cooper Bussmann, o tempo de atuação da proteção será de 1,5 segundos, conforme a Figura 18. Nesse cenário, a duração do arco considerada é igual ao tempo de atuação do fusível, sendo dispensados aspectos de coordenação e seletividade.

Figura 18 – Curva tempo-corrente do fusível KRP-C_SP.



Fonte: Adaptado de Cooper Bussmann (2003).

Conhecido o tempo de atuação do dispositivo de proteção, é possível determinar a energia incidente. Para tanto, emprega-se (58) para definir o logaritmo da energia incidente normalizada para 0,2 segundos.

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \log I_a + 0,0011G \quad (58)$$

Onde $K_1 = -0,792$ (configuração aberta) e $K_2 = -0,113$ (sistema aterrado). Logo:

$$\log E_n = 0,0172 \quad (59)$$

A energia incidente normalizada é dada aplicando-se (59) em (60) e resulta em (61).

$$E_n = 10^{\log E_n} \quad (60)$$

$$E_n = 1,0403 \text{ J/cm}^2 \quad (61)$$

Aplica-se (62) para determinar a energia incidente final (63), onde C_f é unitário (fator de correção para sistemas com tensão inferior à 1000 V) e x é igual a 2 (fator de distância para configurações abertas).

$$E = 4,184 C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \quad (62)$$

$$E = 130,5804 \text{ J/cm}^2 = 31,2095 \text{ cal/cm}^2 \quad (63)$$

Por fim, define-se o valor do limite de arco ou distância de aproximação segura empregando-se (64).

$$D_B = \left[4,184 C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (64)$$

Onde $C_f = 1$; $x = 2$ e $E_B = 5 \text{ cal/cm}^2$. Portanto:

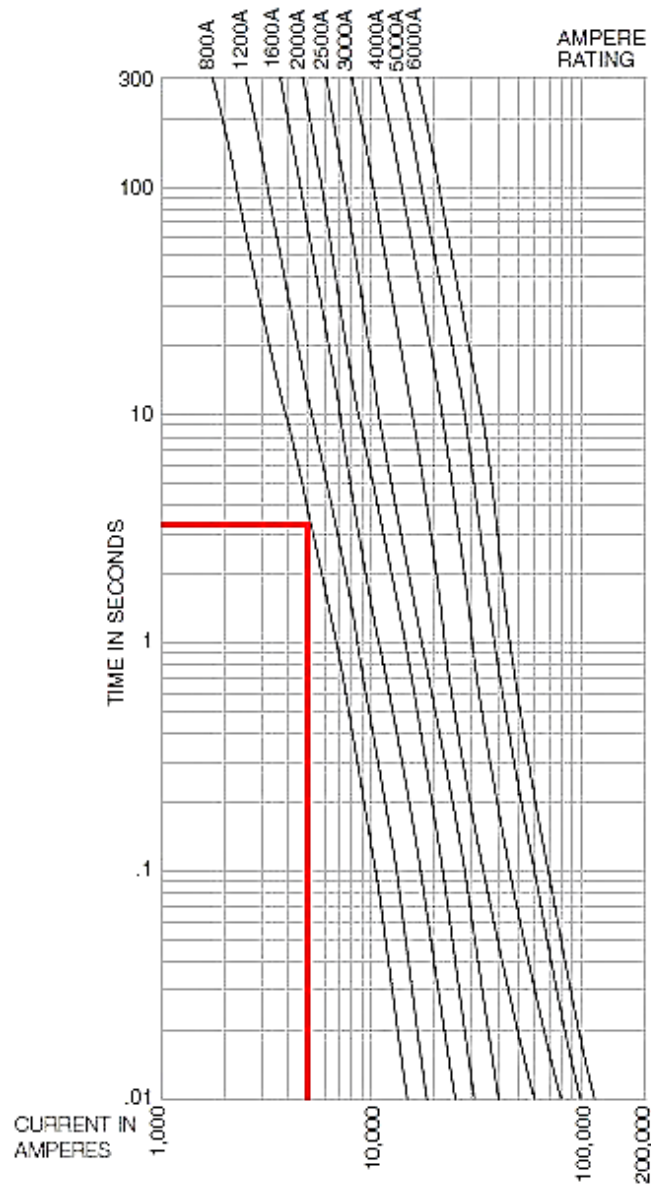
$$D_B = 1558,67 \text{ mm} \quad (65)$$

Os cálculos apresentados anteriormente devem ser refeitos considerando uma redução na corrente de arco, a fim de observar o efeito da diminuição da corrente no tempo de atuação do dispositivo de proteção. Conforme estabelecido, a corrente de arco reduzida deve ser 85% do valor apresentado em (56), ou seja:

$$I_{ar} = 5,0693 \text{ kA} \quad (66)$$

Com este valor de corrente de arco, o tempo de atuação do dispositivo de proteção será de 3,2 segundos, conforme a Figura 19. Da mesma forma que na análise anterior, a duração do arco é considerada igual ao tempo de atuação do fusível nessa situação.

Figura 19 – Curva tempo-corrente do fusível KRP-C_SP.



Fonte: Adaptado de Cooper Bussmann (2003).

Com isto, os valores do logaritmo da energia incidente normalizada, da energia incidente normalizada e da energia incidente são dados por (67), (68) e (69), respectivamente.

$$\log E_n = -0,0591 \quad (67)$$

$$E_n = 0,8727 \text{ J/cm}^2 \quad (68)$$

$$E = 233,6891 \text{ J/cm}^2 = 55,8530 \text{ cal/cm}^2 \quad (69)$$

A distância de aproximação segura é apresentada em (70).

$$D_B = 2085,13 \text{ mm} \quad (70)$$

Os resultados da aplicação do modelo da IEEE Std 1584-2002 são apresentados na Tabela 13. Ao se comparar os valores obtidos para a corrente de arco e para a corrente de arco reduzida, observa-se que a energia incidente e a distância de aproximação segura apresentam maiores valores quando obtidas a partir da corrente de arco reduzida. Esses valores (55,8530 cal/cm² e 2085,13 mm) devem ser considerados como os valores finais de energia incidente e de distância de aproximação segura obtidos nessa análise.

Tabela 13 – Resultados da aplicação do modelo do IEEE Std 1584-2002 para o Estudo de Caso 1.

Variáveis	Valores	Variáveis (considerando corrente de arco reduzida)	Valores
Corrente de arco (kA)	5,9639	Corrente de arco reduzida (kA)	5,0693
Duração do arco (s)	1,5	Duração do arco (s)	3,2
Energia incidente (cal/cm ²)	31,2095	Energia incidente (cal/cm ²)	55,8530
Distância de aproximação segura (mm)	1558,67	Distância de aproximação segura (mm)	2085,13

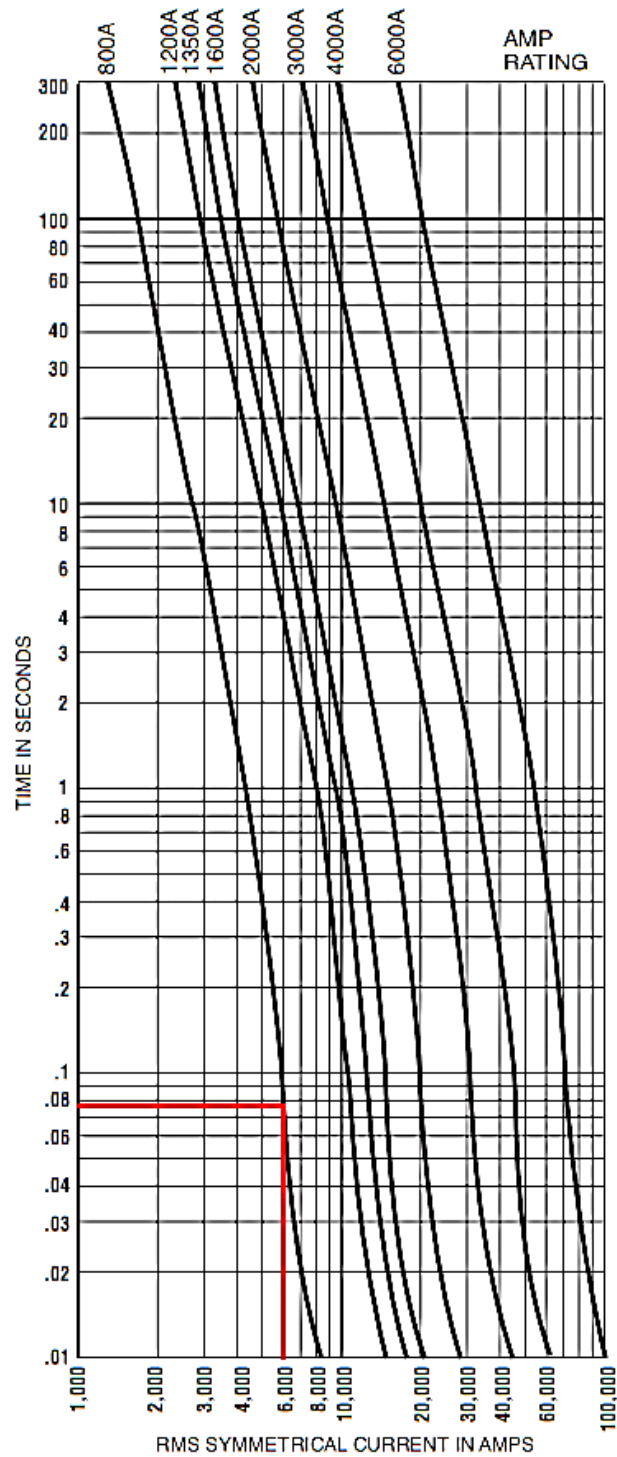
Fonte: Autoria própria.

O nível de energia incidente resultante da presente análise (55,8530 cal/cm²) é superior ao máximo nível de proteção térmica oferecido por vestimentas com classificação de arco categorizadas (40 cal/cm²). Diante disso, faz-se necessário adotar estratégias para diminuir o nível de energia incidente estimado. O ajuste do tempo de atuação do dispositivo de proteção é normalmente tomado como uma solução de mitigação, visto que uma atuação mais rápida da proteção implicará em uma energia incidente menor.

Empregando um dispositivo de proteção mais rápido, é possível extinguir a falta em um tempo menor. Ao se substituir o fusível anteriormente empregado pelo fusível modelo LCU, da fabricante Edison, a duração do arco passa a ser de 0,0775 segundos, conforme a Figura 20.

Essa troca de dispositivo não levou em consideração técnicas de proteção e seletividade, tendo como único objetivo sinalizar o efeito de um dispositivo mais veloz na estimativa de energia incidente.

Figura 20 – Curva tempo-corrente do fusível LCU.



Fonte: Adaptado de Edison (2014).

Com a redução no tempo de atuação da proteção em função da troca do dispositivo de proteção, a energia incidente e a distância de aproximação segura em função da corrente de arco passam a ser dadas por (71) e (72).

$$E = 6,7467 \text{ J/cm}^2 = 1,6125 \text{ cal/cm}^2 \quad (71)$$

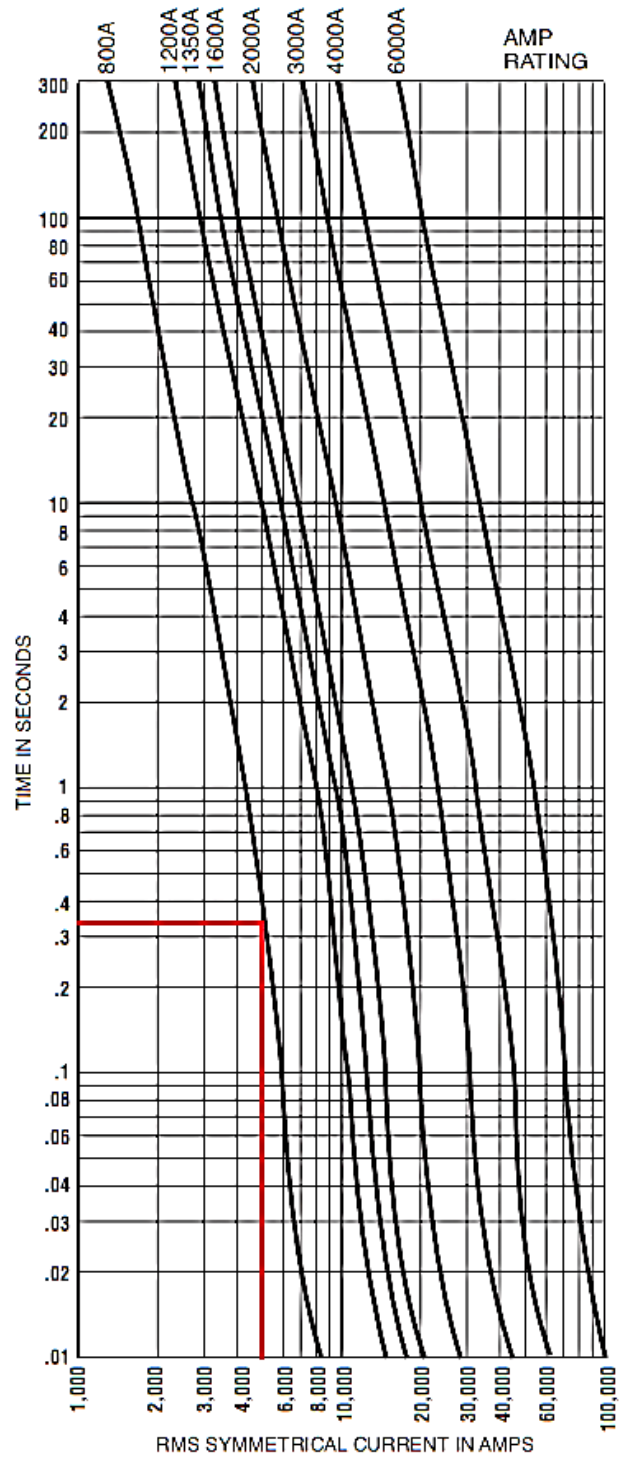
$$D_B = 354,29 \text{ mm} \quad (72)$$

Para a corrente de arco reduzida (5,0693 kA), o tempo de atuação da proteção passa a ser de 0,35 segundos, como mostrado na Figura 21. Com o emprego desse dispositivo, a energia incidente estimada e a distância de aproximação segura passam a ser dadas por (73) e (74), respectivamente.

$$E = 25,5598 \text{ J/cm}^2 = 6,1089 \text{ cal/cm}^2 \quad (73)$$

$$D_B = 689,59 \text{ mm} \quad (74)$$

Figura 21 – Curva tempo-corrente do fusível LCU.



Fonte: Adaptado de Edison (2014).

Ao se comparar os valores de energia incidente e de distância de aproximação segura obtidos a partir da corrente de arco e da corrente de arco reduzida após a seleção de um dispositivo de proteção mais rápido como técnica de mitigação, conforme apresentado na

Tabela 14, tem-se como resultado uma energia incidente estimada de 6,1089 cal/cm², além de uma distância de aproximação segura de 689,59 mm.

Tabela 14 – Resultados da aplicação do modelo do IEEE Std 1584-2002 para o Estudo de Caso 1 com o emprego de técnica de mitigação.

Variáveis	Valores	Variáveis (considerando corrente de arco reduzida)	Valores
Corrente de arco (kA)	5,9639	Corrente de arco reduzida (kA)	5,0693
Duração do arco (s)	0,0775	Duração do arco (s)	0,35
Energia incidente (cal/cm ²)	1,6125	Energia incidente (cal/cm ²)	6,1089
Distância de aproximação segura (mm)	354,29	Distância de aproximação segura (mm)	689,59

Fonte: Autoria própria.

Considerando o nível de energia incidente resultante, a vestimenta adequada para uma intervenção nesse sítio, com as condições estabelecidas na Tabela 12, será a de categoria 2, com proteção térmica de até 8 cal/cm². O aparato de proteção contra arco elétrico desta categoria inclui:

- Vestimenta:
 - Camiseta de manga longa AR e calças AR ou macacão AR com ATPV mínimo 8 cal;
 - Escudo facial AR ou capuz AR e balaclava AR com ATPV mínimo 8 cal;
 - Jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete com ATPV mínimo de 8 cal (opcional);
- Equipamentos de proteção:
 - Capacete;
 - Óculos de proteção;
 - Protetor auricular de inserção;
 - Luvas de couro para trabalho pesado, luvas AR com ATPV mínimo 8 cal ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro;
 - Calçado de couro;

4.1.2 Análise de Energia Incidente Empregando o Modelo IEEE Std 1584-2018

Conhecida a tensão de operação do nó em avaliação, deve-se empregar o modelo para sistemas com $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$. Bem como no modelo de 2002, o primeiro passo é definir

a corrente de arco elétrico. Esse valor se obtém em duas etapas: a primeira etapa define a corrente de arco intermediária, para V_{oc} igual a 600 V e a segunda, a corrente de arco final.

A corrente de arco intermediária é dada por (75).

$$I_{arc_Voc} = 10^{(k_1 + k_2 \log I_{bf} + k_3 \log G)} (k_4 I_{bf}^6 + k_5 I_{bf}^5 + k_6 I_{bf}^4 + k_7 I_{bf}^3 + k_8 I_{bf}^2 + k_9 I_{bf} + k_{10}) \quad (75)$$

Onde $k_1 = 0,111147$; $k_2 = 1,008$; $k_3 = -0,24$; $k_4 = 0$; $k_5 = 0$; $k_6 = -3,895E-09$; $k_7 = 1,641E-06$; $k_8 = -0,000197$; $k_9 = 0,002615$ e $k_{10} = 1,1$.

Assim, a corrente de arco intermediária resulta em (76):

$$I_{arc_600} = 8,2233 \text{ kA} \quad (76)$$

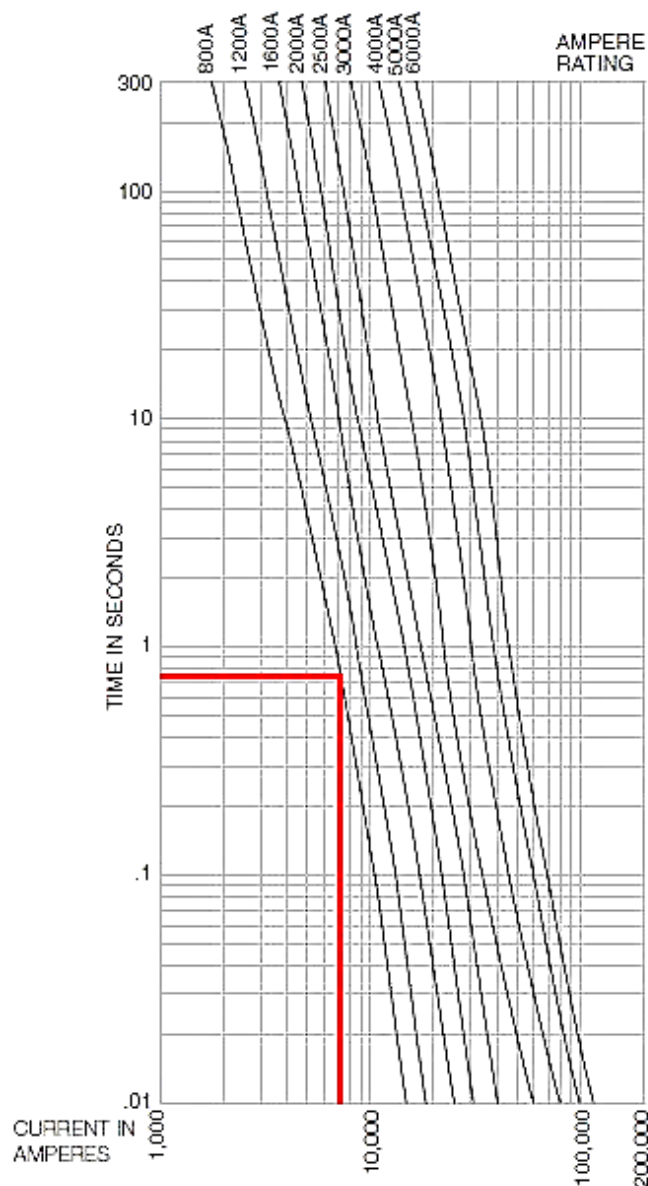
A corrente de arco final é dada por (77) e resulta em (78), conforme segue.

$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{0,6}{V_{oc}}\right)^2 \times \left[\frac{1}{(I_{arc_600})^2} - \left(\frac{0,6^2 - V_{oc}^2}{0,6^2 \times I_{bf}^2}\right) \right]}} \quad (77)$$

$$I_{arc} = 6,9135 \text{ kA} \quad (78)$$

Definida a corrente de arco e considerando-se o mesmo fusível utilizado para análise pelo método do IEEE Std 1584-2002 (KRP-C_SP), o tempo de atuação será de 750 milissegundos, conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Curva tempo-corrente do fusível KRP-C_SP.



Fonte: Adaptado de Cooper Bussmann (2003).

Conhecido o tempo de atuação da proteção, parte-se para a etapa da estimativa de energia incidente. Bem como ocorre para a corrente de arco, a obtenção do valor de energia incidente passa por duas etapas: a estimativa das energias incidente intermediária e final.

A energia incidente intermediária é calculada para V_{oc} igual a 600 V e é dada por (79), resultando em (80).

$$E_{\leq 600} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left[k_1 + k_2 \log G + \left(\frac{k_3 I_{\text{arc } 600}}{k_4 I_{\text{bf}}^7 + k_5 I_{\text{bf}}^6 + k_6 I_{\text{bf}}^5 + k_7 I_{\text{bf}}^4 + k_8 I_{\text{bf}}^3 + k_9 I_{\text{bf}}^2 + k_{10} I_{\text{bf}}} \right) + \frac{k_{11} \log I_{\text{bf}} + k_{12} \log D + k_{13} \log I_{\text{arc}} + \log \frac{1}{CF}}{1} \right]} \quad (79)$$

$$E_{\leq 600} = 267,6863 \text{ J/cm}^2 \quad (80)$$

Onde $k_1 = 3,470417$; $k_2 = 0,465$; $k_3 = -0,261863$; $k_4 = 0$; $k_5 = 0$; $k_6 = -3,895E-09$; $k_7 = 0,000001641$; $k_8 = -0,000197$; $k_9 = 0,002615$; $k_{10} = 1,1$; $k_{11} = 0$; $k_{12} = -1,99$ e $k_{13} = 1,04$. CF tem valor unitário, visto que a análise se aplica a um ambiente aberto.

A energia incidente final é calculada empregando (81) e resulta em (82).

$$E = E_{\leq 600} \quad (81)$$

$$E = 267,6863 \text{ J/cm}^2 = 63,7986 \text{ cal/cm}^2 \quad (82)$$

A determinação da distância de aproximação segura intermediária é feita empregando (83), onde os coeficientes k_1 a k_{13} e a constante CF são os mesmos aplicados à (79), resultando em (84). A distância de aproximação segura final é dada por (85) e resulta em (86).

$$AFB_{\leq 600} = 10^{\left[\frac{k_1 + k_2 \log G + \left(\frac{k_3 I_{\text{arc } 600}}{k_4 I_{\text{bf}}^7 + k_5 I_{\text{bf}}^6 + k_6 I_{\text{bf}}^5 + k_7 I_{\text{bf}}^4 + k_8 I_{\text{bf}}^3 + k_9 I_{\text{bf}}^2 + k_{10} I_{\text{bf}}} \right) + k_{11} \log I_{\text{bf}} + \frac{k_{13} \log I_{\text{arc}} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{T}}{-k_{12}}}{1} \right]} \quad (83)$$

$$AFB_{\leq 600} = 2249,39 \text{ mm} \quad (84)$$

$$AFB = AFB_{\leq 600} \quad (85)$$

$$AFB = 2249,39 \text{ mm} \quad (86)$$

Bem como para o modelo de 2002, o modelo de 2018 propõe refazer os passos de obtenção da duração do arco, bem como de estimativa de energia incidente e da distância de

aproximação segura considerando um segundo valor de corrente, denominado corrente de arco reduzida. Porém, diferente do modelo anterior, o presente modelo apresenta uma equação para se determinar o valor de corrente reduzida, dada por (87).

$$I_{\text{arc min}} = I_{\text{arc}} \times (1 - 0,5 \text{VarC}_f) \quad (87)$$

O coeficiente VarC_f é dado por (88).

$$\text{VarC}_f = k_1 V_{\text{oc}}^6 + k_2 V_{\text{oc}}^5 + k_3 V_{\text{oc}}^4 + k_4 V_{\text{oc}}^3 + k_5 V_{\text{oc}}^2 + k_6 V_{\text{oc}} + k_7 \quad (88)$$

Onde $k_1 = 0$; $k_2 = -3,1555\text{E}-06$; $k_3 = 0,0001682$; $k_4 = -0,0034607$; $k_5 = 0,034124$; $k_6 = -0,1599$ e $k_7 = 0,34629$.

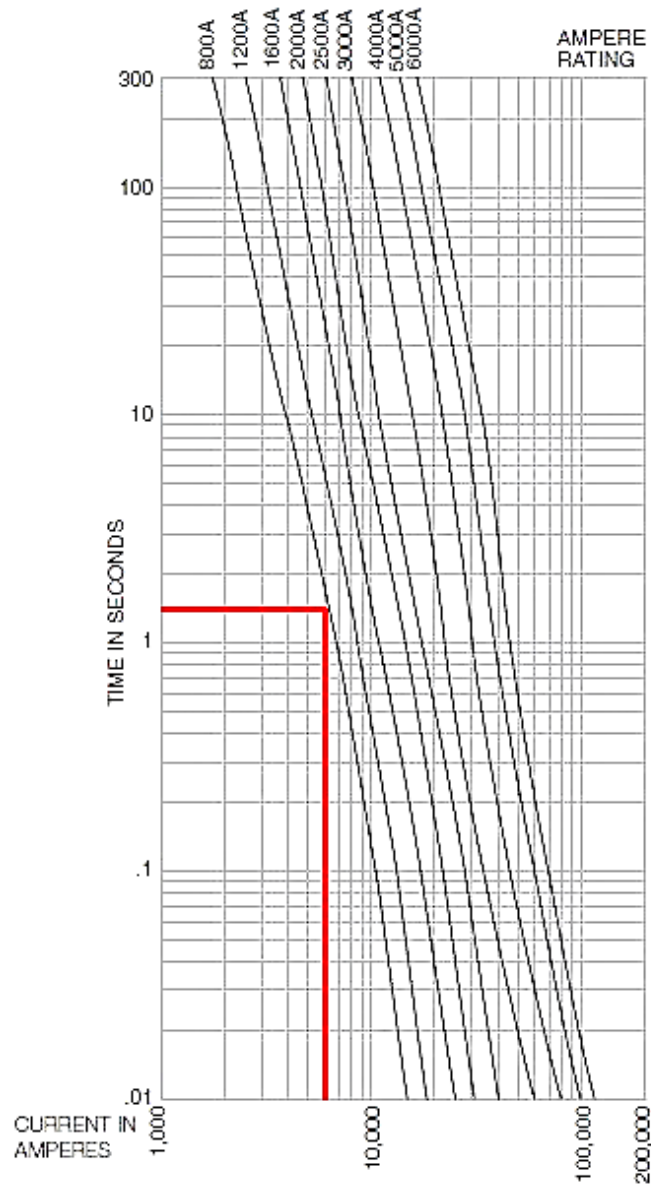
Assim, o coeficiente VarC_f resulta em (89) e a corrente de arco reduzida em (90).

$$\text{VarC}_f = 0,2770 \quad (89)$$

$$I_{\text{arc min}} = 5,9559 \text{ kA} \quad (90)$$

Considerando-se a corrente de arco reduzida calculada, o tempo de operação da proteção será de 1500 milissegundos, conforme a Figura 23. Conhecida a duração do arco, aplica-se (79), (81), (83) e (85) para se obter a energia incidente e a distância de aproximação segura considerando-se a corrente de arco reduzida, dadas por (91) e (92), respectivamente. Aqui é importante ressaltar que ambas as equações (79) e (83) empregam tanto a corrente de arco intermediária $I_{\text{arc}_{600}}$ quanto a corrente de arco I_{arc} , mas que no caso da presente análise, apenas o termo I_{arc} deve ser substituído por $I_{\text{arc min}}$, conforme orientação do modelo.

Figura 23 – Curva tempo-corrente do fusível KRP-C_SP.



Fonte: Adaptado de Cooper Bussmann (2003).

$$E = 458,4740 \text{ J/cm}^2 = 109,5779 \text{ cal/cm}^2 \quad (91)$$

$$\text{AFB} = 2947,79 \text{ mm} \quad (92)$$

A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos empregando-se o modelo do guia IEEE Std 1584-2018 para o presente estudo de caso. Com isso, é possível comparar os valores de energia incidente e de distância de aproximação segura obtidos considerando a corrente de arco e a corrente de arco reduzida, a fim de se determinar o resultado da aplicação do modelo.

Tabela 15 – Resultados da aplicação do modelo do IEEE Std 1584-2018 para o Estudo de Caso 1.

Variáveis	Valores	Variáveis (considerando corrente de arco reduzida)	Valores
Corrente de arco (kA)	6,9135	Corrente de arco reduzida (kA)	5,9559
Duração do arco (ms)	750	Duração do arco (ms)	1500
Energia incidente (cal/cm ²)	63,9786	Energia incidente (cal/cm ²)	109,5779
Distância de aproximação segura (mm)	2249,39	Distância de aproximação segura (mm)	2947,79

Fonte: Autoria própria.

Os valores apresentados na Tabela 15 mostram claramente o impacto do tempo de atuação da proteção no nível de energia incidente ao qual o trabalhador pode ser exposto. Nessa situação, a duração do arco para a corrente de arco reduzida é o dobro do tempo que o dispositivo levaria para atuar se a corrente de arco tivesse seu valor normal, o que implica em um aumento de cerca de 71,27% no nível de energia incidente.

Assim, os resultados de energia incidente e de distância de aproximação segura são os maiores valores obtidos entre a aplicação do modelo para corrente de arco e corrente de arco reduzida, os quais são uma energia incidente de 109,5779 cal/cm² e uma distância de aproximação segura de 2947,79 mm.

Sabe-se que as vestimentas e demais equipamentos de proteção com AR apresentadas em NFPA (2021) segundo o método de categorização de EPI protegem para exposições de até 40 cal/cm². Para níveis acima desse valor, ou se adota uma técnica de mitigação para reduzir os níveis de energia incidente ou o trabalho deverá ser feito desenergizado. Uma opção para reduzir a exposição do trabalhador é operar a uma maior distância do ponto analisado, isto é, aumentar a distância de trabalho.

Conforme a Tabela 12, a distância de trabalho é de 305 mm. O emprego de uma ferramenta, por exemplo, uma vara de manobra, permite ao trabalhador estar a pelo menos o dobro do ponto de falta, isto é, a 610 mm. Adotando-se um novo parâmetro de distância, a corrente de arco e o tempo de atuação do dispositivo não mudam, bem como a distância de aproximação segura, pois são independentes da distância de trabalho, alterando-se apenas a energia incidente.

Considerando-se a corrente de arco dada por (78), que implica em um tempo de atuação do dispositivo de proteção de 750 milissegundos, a energia incidente resulta em (93).

$$E = 67,3870 \text{ J/cm}^2 = 16,1059 \text{ cal/cm}^2 \quad (93)$$

Considerando-se a corrente de arco reduzida dada por (90), cuja duração de arco correspondente é de 1500 milissegundos, o valor reduzido de energia incidente é apresentado em (94).

$$E = 115,4157 \text{ J/cm}^2 = 27,5850 \text{ cal/cm}^2 \quad (94)$$

A Tabela 16 apresenta os resultados do modelo do IEEE Std 1584-2018 para este estudo de caso após o aumento da distância de trabalho como técnica de mitigação. A observação dos valores obtidos mostra o impacto da distância de trabalho na energia incidente, que é 74,8% menor que a energia incidente final sem o emprego dessa estratégia. Embora o efeito da distância de trabalho seja visto apenas no nível de energia incidente, essa é uma técnica de fácil aplicação, já que depende apenas do emprego de ferramentas.

Tabela 16 – Resultados da aplicação do modelo do IEEE Std 1584-2018 para o Estudo de Caso 1 com o emprego de técnica de mitigação.

Variáveis	Valores	Variáveis (considerando corrente de arco reduzida)	Valores
Corrente de arco (kA)	6,9135	Corrente de arco reduzida (kA)	5,9559
Duração do arco (ms)	750	Duração do arco (ms)	1500
Energia incidente (cal/cm ²)	16,1059	Energia incidente (cal/cm ²)	27,5850
Distância de aproximação segura (mm)	2249,39	Distância de aproximação segura (mm)	2947,79

Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, os resultados de energia incidente e de distância de aproximação segura são de 27,5850 cal/cm² e uma distância de aproximação segura de 2947,79 mm. Uma vez que a energia incidente é inferior a 40 cal/cm² no ponto avaliado, é possível selecionar uma vestimenta e outros EPIs adequados para o trabalho nesse ponto. De acordo com NFPA (2021), o EPI adequado será o de categoria 4, que protege para exposições de até 40 cal/cm², que inclui:

- Vestimenta:
 - Camiseta de manga longa com ATPV mínimo 40 cal (conforme requerido);
 - Calças com ATPV mínimo 40 cal (conforme requerido);
 - Macacão com ATPV mínimo 40 cal (conforme requerido);
 - Jaqueta e calças do traje com ATPV mínimo 40 cal (conforme requerido);
 - Capuz com ATPV mínimo 40 cal;

- Luvas com ATPV mínimo 40 cal ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro;
- Jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete com ATPV mínimo 40 cal (opcional);
- Equipamentos de proteção:
 - Capacete;
 - Óculos de proteção;
 - Protetor auricular de inserção;
 - Calçado de couro;

4.2 ESTUDO DE CASO 2

O segundo cenário simulado foi no mesmo sistema do estudo de caso anterior, mas agora para o lado de média tensão. O nó 633 opera em 4,16 kV e está orientado verticalmente, ao ar livre, além de também possuir a configuração estrela aterrada.

Os resultados de um curto-circuito trifásico franco no nó 633 foram obtidos a partir de uma simulação no *software* ATPDraw. O desbalanço entre fases característico dos sistemas de distribuição é observado a partir da diferença entre os valores de corrente em cada uma das fases. A fase A tem corrente de 4,5378 kA, enquanto as fases B e C apresentam correntes de 4,313 kA e 4,2122 kA, respectivamente.

Os dados necessários para a aplicação de ambos os modelos são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Parâmetros de aplicação do Estudo de Caso 2.

Parâmetros	Valores
Tensão de circuito aberto – V_{oc} (kV)	4,16
Corrente de curto-circuito trifásico franco – I_{bf} (kA)	4,5378
Espaçamento entre eletrodos – G (mm)	254
Distância de trabalho – D (mm)	305
Configuração dos eletrodos	VOA
Aterramento	Y-G

Fonte: A autoria própria.

4.2.1 Análise de Energia Incidente Empregando o Modelo IEEE Std 1584-2002

Em função do espaçamento entre condutores do cenário considerado ser maior que o máximo comportado pelo Modelo Empírico do IEEE Std 1584-2002, o modelo empregado na presente análise é o Modelo Teórico. Para este modelo, a corrente de arco elétrico é considerada igual à corrente de falta trifásica franca (I_{bf}) e, portanto, esta é utilizada para se definir a duração do arco.

Considerando-se a corrente elétrica igual 4,5378 kA e o fusível MV055-80E apresentado em Cooper Bussmann (2003), o tempo de atuação da proteção será de 0,0131 segundos. Tomando-se esse tempo como a duração do arco elétrico, é possível calcular a energia incidente a partir de (95) e a distância de aproximação segura com (96).

$$E = 2,142 \times 10^6 \text{V} \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{D^2} \right) \quad (95)$$

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 \text{V} \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{E_B} \right)} \quad (96)$$

Onde E_B equivale à 5 J/cm². Os resultados de (95) e (96) são dados por (97) e (98), respectivamente.

$$E = 5,6994 \text{ J/cm}^2 = 1,3622 \text{ cal/cm}^2 \quad (97)$$

$$D_B = 325,63 \text{ mm} \quad (98)$$

Nesse modelo não é feita a recomendação de se calcular a energia incidente e a distância de aproximação segura considerando-se a corrente de arco reduzida, visto que não há a estimativa de corrente de arco no mesmo. Assim, a Tabela 18 apresenta os resultados da análise de energia incidente para este estudo de caso considerando o modelo da IEEE Std 1584-2002. Os valores finais de energia incidente (1,3622 cal/cm²) e de distância de aproximação segura (325,63 mm) são os únicos calculados segundo o Modelo Teórico.

Tabela 18 – Resultados da aplicação do modelo do IEEE Std 1584-2002 para o Estudo de Caso 2.

Variáveis	Valores
Duração do arco (s)	0,0131
Energia incidente (cal/cm ²)	1,3622
Distância de aproximação segura (mm)	325,63

Fonte: Autoria própria.

O nível de energia incidente obtido nessa análise é superior a 1,2 cal/cm², que é o nível de energia incidente necessário para se causar uma queimadura de segundo grau. Isso significa que há necessidade de se utilizar uma vestimenta de proteção térmica, que especificamente nessa situação, deve ser de categoria 1, conforme NFPA (2021). A composição de vestimenta específica e os demais EPIs é:

- Vestimenta:
 - Camiseta de manga longa AR e calças AR ou macacão AR com ATPV mínimo 4 cal;
 - Escudo facial AR ou capuz AR com ATPV mínimo 4 cal;
 - Jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete com ATPV mínimo 4 cal (opcional);
- Equipamentos de proteção:
 - Capacete;
 - Óculos de proteção;
 - Protetor auricular de inserção;
 - Luvas de couro para trabalho pesado, luvas AR com ATPV mínimo 4 cal ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro;
 - Calçado de couro (opcional);

4.2.2 Análise de Energia Incidente Empregando o Modelo IEEE Std 1584-2018

Conhecida a tensão de operação do nó em avaliação, deve-se empregar o modelo para sistemas com $600 < V_{oc} < 15000$ V. (99) é empregada para se calcular a corrente de arco intermediária para V_{oc} igual a 600 V, 2700 V e 14300 V, cujos valores são apresentados em (100), (101) e (102).

$$I_{arc_Voc} = 10^{(k_1 + k_2 \log I_{bf} + k_3 \log G)} (k_4 I_{bf}^6 + k_5 I_{bf}^5 + k_6 I_{bf}^4 + k_7 I_{bf}^3 + k_8 I_{bf}^2 + k_9 I_{bf} + k_{10}) \quad (99)$$

Onde k_1 a k_{10} são constantes apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Constantes para obtenção das correntes de arco intermediárias (configuração VOA).

V_{oc}	600V	2700V	14300V
k₁	0,043785	-0,02395	0,005371
k₂	1,04	1,006	1,0102
k₃	-0,18	-0,0188	-0,029
k₄	0	-1,557E-12	-1,557E-12
k₅	0	4,556E-10	4,556E-10
k₆	-4,783E-09	-4,186E-08	-4,186E-08
k₇	1,962E-06	8,346E-07	8,346E-07
k₈	-0,000229	5,482E-05	5,482E-05
k₉	0,003141	-0,003191	-0,003191
k₁₀	1,092	0,9729	0,9729

Fonte: Adaptado de IEEE (2018).

$$I_{arc600} = 2,1682 \text{ kA} \quad (100)$$

$$I_{arc2700} = 3,7473 \text{ kA} \quad (101)$$

$$I_{arc14300} = 3,8130 \text{ kA} \quad (102)$$

As correntes de arco intermediárias são empregadas para calcular as correntes de interpolação dadas por (103), (104) e (105), que serão empregadas para se definir a corrente de arco final.

$$I_{arc_1} = \frac{(I_{arc2700} - I_{arc600})}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + I_{arc2700} \quad (103)$$

$$I_{arc_2} = \frac{(I_{arc14300} - I_{arc2700})}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + I_{arc14300} \quad (104)$$

$$I_{arc_3} = \frac{I_{arc_1}(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{I_{arc_2}(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (105)$$

As correntes de arco intermediárias resultantes são dadas por (106), (107) e (108). Uma vez que o nó avaliado tem tensão superior a 2,7 kV, a corrente de arco final será igual a I_{arc_2} , conforme apresentado em (109).

$$I_{\text{arc}_1} = 4,8452 \text{ kA} \quad (106)$$

$$I_{\text{arc}_2} = 3,7556 \text{ kA} \quad (107)$$

$$I_{\text{arc}_3} = 2,9981 \text{ kA} \quad (108)$$

$$I_{\text{arc}} = I_{\text{arc}_2} \quad (109)$$

$$I_{\text{arc}} = 3,7556 \text{ kA} \quad (110)$$

A partir da corrente de arco elétrico obtida, o tempo de atuação da proteção será de 19 ms, considerando o fusível MV055-80E como dispositivo de proteção. Com o dado de tempo obtido, é possível calcular os níveis de energia incidente intermediários para 600 V, 2700 V e 14300 V a partir de (111), (112) e (113).

$$E_{600} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left[k_1 + k_2 \log G + \left(\frac{k_3 I_{\text{arc}_600}}{k_4 I_{\text{bf}}^7 + k_5 I_{\text{bf}}^6 + k_6 I_{\text{bf}}^5 + k_7 I_{\text{bf}}^4 + k_8 I_{\text{bf}}^3 + k_9 I_{\text{bf}}^2 + k_{10} I_{\text{bf}}} \right) + \frac{1}{k_{11} \log I_{\text{bf}} + k_{12} \log D + k_{13} \log I_{\text{arc}_600} + \log \frac{1}{CF}} \right]} \quad (111)$$

$$E_{2700} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left[k_1 + k_2 \log G + \left(\frac{k_3 I_{\text{arc}_2700}}{k_4 I_{\text{bf}}^7 + k_5 I_{\text{bf}}^6 + k_6 I_{\text{bf}}^5 + k_7 I_{\text{bf}}^4 + k_8 I_{\text{bf}}^3 + k_9 I_{\text{bf}}^2 + k_{10} I_{\text{bf}}} \right) + \frac{1}{k_{11} \log I_{\text{bf}} + k_{12} \log D + k_{13} \log I_{\text{arc}_2700} + \log \frac{1}{CF}} \right]} \quad (112)$$

$$E_{14300} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left[k_1 + k_2 \log G + \left(\frac{k_3 I_{\text{arc}_14300}}{k_4 I_{\text{bf}}^7 + k_5 I_{\text{bf}}^6 + k_6 I_{\text{bf}}^5 + k_7 I_{\text{bf}}^4 + k_8 I_{\text{bf}}^3 + k_9 I_{\text{bf}}^2 + k_{10} I_{\text{bf}}} \right) + \frac{k_{11} \log I_{\text{bf}} + k_{12} \log D + k_{13} \log I_{\text{arc}_14300} + \log \frac{1}{\text{CF}}}{k_{11} \log I_{\text{bf}} + k_{12} \log D + k_{13} \log I_{\text{arc}_14300} + \log \frac{1}{\text{CF}}} \right]} \quad (113)$$

Onde k_1 a k_{13} são coeficientes que dependem da tensão V_{oc} intermediária e são apresentados na Tabela 20. CF é unitário, visto que se trata de uma configuração em ambiente aberto.

Tabela 20 – Constantes para obtenção dos níveis de energia incidente e distância de aproximação segura intermediários (configuração VOA).

V_{oc}	600V	2700V	14300V
k₁	0,679294	3,880724	3,405454
k₂	0,746	0,105	0,12
k₃	1,222636	-1,906033	-0,93245
k₄	0	-1,557E-12	-1,557E-12
k₅	0	4,556E-10	4,556E-10
k₆	-4,783E-09	-4,186E-08	-4,186E-08
k₇	1,962E-06	8,346E-07	8,346E-07
k₈	-0,000229	5,482E-05	5,482E-05
k₉	0,003141	-0,003191	-0,003191
k₁₀	1,092	0,9729	0,9729
k₁₁	0	0	0
k₁₂	-1,598	-1,515	-1,534
k₁₃	0,997	1,115	0,979

Fonte: Adaptado de IEEE (2018).

Os valores de energia incidente intermediários são apresentados em (114), (115) e (116). Esses valores serão empregados para se obter os valores das primeira, segunda e terceira interpolação de energia incidente, dados por (117), (118) e (119), os quais resultam em (120), (121) e (122), respectivamente.

$$E_{600} = 1,1233 \text{ J/cm}^2 \quad (114)$$

$$E_{2700} = 1,1239 \text{ J/cm}^2 \quad (115)$$

$$E_{14300} = 2,0770 \text{ J/cm}^2 \quad (116)$$

$$E_1 = \frac{(E_{2700} - E_{600})}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + E_{2700} \quad (117)$$

$$E_2 = \frac{(E_{14300} - E_{2700})}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + E_{14300} \quad (118)$$

$$E_3 = \frac{E_1(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{E_2(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (119)$$

$$E_1 = 1,1243 \text{ J/cm}^2 \quad (120)$$

$$E_2 = 1,2438 \text{ J/cm}^2 \quad (121)$$

$$E_3 = 1,3270 \text{ J/cm}^2 \quad (122)$$

Uma vez que a tensão do nó analisado é superior a 2,7 kV, a energia incidente final será igual à segunda interpolação da energia incidente (E_2), conforme apresentado em (123) e resultado dado por (124).

$$E = E_2 \quad (123)$$

$$E = 1,2438 \text{ J/cm}^2 = 0,2973 \text{ cal/cm}^2 \quad (124)$$

Para obter a distância de aproximação segura, (125), (126) e (127) são empregadas para calcular a distância de aproximação segura intermediária para 600 V, 2700 V e 14300 V, as quais empregam os mesmos coeficientes utilizados para energia incidente intermediária, apresentados na Tabela 20 e resultam em (128), (129) e (130), respectivamente.

$$AFB_{600} = 10 \left[\frac{k_1 + k_2 \log G + \left(\frac{k_3 I_{arc_600}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} \right) + k_{11} \log I_{bf} + k_{13} \log I_{arc_600} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{T}}{-k_{12}} \right] \quad (125)$$

$$AFB_{2700} = 10 \left[\frac{k_1 + k_2 \log G + \left(\frac{k_3 I_{arc_2700}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} \right) + k_{11} \log I_{bf} + k_{13} \log I_{arc_2700} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{T}}{-k_{12}} \right] \quad (126)$$

$$AFB_{14300} = 10 \left[\frac{k_1 + k_2 \log G + \left(\frac{k_3 I_{arc_14300}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} \right) + k_{11} \log I_{bf} + k_{13} \log I_{arc_14300} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{T}}{-k_{12}} \right] \quad (127)$$

$$AFB_{600} = 119,50 \text{ mm} \quad (128)$$

$$AFB_{2700} = 113,56 \text{ mm} \quad (129)$$

$$AFB_{14300} = 171,56 \text{ mm} \quad (130)$$

As interpolações para obter a distância de aproximação segura final são calculadas conforme (131), (132) e (133), cujos resultados são apresentados em (134), (135) e (136). Uma vez que o nó avaliado possui tensão superior a 2,7 kV, a distância de aproximação segura final é dada por (137), a qual resulta em (138).

$$AFB_1 = \frac{(AFB_{2700} - AFB_{600})}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + AFB_{2700} \quad (131)$$

$$AFB_2 = \frac{(AFB_{14300} - AFB_{2700})}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + AFB_{14300} \quad (132)$$

$$AFB_3 = \frac{AFB_1 (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{AFB_2 (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (133)$$

$$AFB_1 = 109,43 \text{ mm} \quad (134)$$

$$AFB_2 = 120,86 \text{ mm} \quad (135)$$

$$AFB_3 = 128,80 \text{ mm} \quad (136)$$

$$AFB = AFB_2 \quad (137)$$

$$AFB = 120,86 \text{ mm} \quad (138)$$

O processo de estimação de energia incidente e distância de aproximação segura deve ser repetido considerando a corrente de arco reduzida, conforme orientação do guia IEEE Std 1584-2018. Para o modelo para sistemas com $600 < V_{oc} < 15000 \text{ V}$, o fator de correção da variação da corrente de arco é aplicado às correntes intermediárias, pois dessa forma o valor de corrente de arco reduzida incluirá esse fator de redução.

As correntes intermediárias reduzidas são dadas por (139), (140) e (141), considerando que o coeficiente $VarC_f$ é calculado empregando-se por (142).

$$I_{arc \text{ min_}600} = I_{arc600} \times (1 - 0,5VarC_f) \quad (139)$$

$$I_{arc \text{ min_}2700} = I_{arc2700} \times (1 - 0,5VarC_f) \quad (140)$$

$$I_{arc \text{ min_}14300} = I_{arc14300} \times (1 - 0,5VarC_f) \quad (141)$$

$$VarC_f = k_1 V_{oc}^6 + k_2 V_{oc}^5 + k_3 V_{oc}^4 + k_4 V_{oc}^3 + k_5 V_{oc}^2 + k_6 V_{oc} + k_7 \quad (142)$$

Onde $k_1 = 9,5606E-07$; $k_2 = -5,1543E-05$; $k_3 = 0,0011161$; $k_4 = -0,01242$; $k_5 = 0,075125$; $k_6 = -0,2358$ e $k_7 = 0,33696$.

O coeficiente $VarC_f$ resulta em (143) e as correntes de arco intermediárias reduzidas calculadas são mostradas em (144), (145) e (146).

$$VarC_f = 0,0368 \quad (143)$$

$$I_{arc \text{ min_}600} = 2,1283 \text{ kA} \quad (144)$$

$$I_{arc \text{ min_}2700} = 3,6783 \text{ kA} \quad (145)$$

$$I_{\text{arc min}_{14300}} = 3,7429 \text{ kA} \quad (146)$$

Os primeiro, segundo e terceiro termos da interpolação da corrente de arco são calculados como em (103), (104) e (105), respectivamente, apenas se trocando os termos $I_{\text{arc}600}$ por $I_{\text{arcmin}_{600}}$, $I_{\text{arc}2700}$ por $I_{\text{arcmin}_{2700}}$ e $I_{\text{arc}14300}$ por $I_{\text{arcmin}_{14300}}$. Os resultados dos termos de interpolação são apresentados em (147), (148) e (149).

Da mesma forma que ocorre para a corrente de arco, em função da tensão do nó avaliado, a corrente de arco reduzida final será igual ao segundo termo da interpolação, conforme (150) e resulta em (151).

$$I_{\text{arc min}_1} = 4,7560 \text{ kA} \quad (147)$$

$$I_{\text{arc min}_2} = 3,6865 \text{ kA} \quad (148)$$

$$I_{\text{arc min}_3} = 2,9429 \text{ kA} \quad (149)$$

$$I_{\text{arc min}} = I_{\text{arc min}_2} \quad (150)$$

$$I_{\text{arc min}} = 3,6865 \text{ kA} \quad (151)$$

A redução na corrente de arco acarreta um aumento de 1 milissegundo no tempo de atuação do dispositivo, de modo que a duração do arco passa a ser de 20 milissegundos.

Para o cálculo da energia incidente reduzida, aplica-se (111), (112) e (113) para a energia incidente intermediária com V_{oc} igual a 600 V, 2700 V e 14300 V, respectivamente, substituindo-se as correntes de arco intermediárias pelas correntes de arco reduzidas intermediárias. Os resultados das energias incidentes reduzidas intermediárias são apresentados em (152), (153) e (154).

$$E_{\text{min}_{600}} = 1,1190 \text{ J/cm}^2 \quad (152)$$

$$E_{\text{min}_{2700}} = 1,2247 \text{ J/cm}^2 \quad (153)$$

$$E_{\min_{14300}} = 2,1913 \text{ J/cm}^2 \quad (154)$$

As interpolações se calculam como em (117), (118) e (119), agora se considerando as energias incidentes reduzidas intermediárias dadas em (152), (153) e (154), resultando em (155), (156) e (157). Como a tensão do nó avaliado é superior a 2,7 kV, a energia incidente reduzida final, cujo resultado é apresentado em (158), será igual ao segundo termo da interpolação E_2 .

$$E_{\min_1} = 1,2983 \text{ J/cm}^2 \quad (155)$$

$$E_{\min_2} = 1,3464 \text{ J/cm}^2 \quad (156)$$

$$E_{\min_3} = 1,3799 \text{ J/cm}^2 \quad (157)$$

$$E = 1,3464 \text{ J/cm}^2 = 0,3218 \text{ cal/cm}^2 \quad (158)$$

Para obtenção da distância de aproximação segura, bem como feito para a estimativa de energia incidente, são empregadas (125), (126) e (127) considerando-se as correntes de arco reduzidas intermediárias para se obter os valores de distância de aproximação segura reduzidos, dados em (159), (160) e (161).

$$AFB_{600} = 119,21 \text{ mm} \quad (159)$$

$$AFB_{2700} = 120,19 \text{ mm} \quad (160)$$

$$AFB_{14300} = 177,65 \text{ mm} \quad (171)$$

Aplica-se (131), (132) e (133) para calcular os três termos de interpolação utilizados no cálculo da distância de aproximação segura reduzida final. Os resultados dos termos interpolação são dados por (172), (173) e (174) e a distância de aproximação segura reduzida é dada por (175).

$$AFB_{\min_1} = 120,86 \text{ mm} \quad (172)$$

$$AFB_{\min_2} = 127,42 \text{ mm} \quad (173)$$

$$AFB_{\min_3} = 131,98 \text{ mm} \quad (174)$$

$$AFB = 127,42 \text{ mm} \quad (175)$$

A fim de se comparar os dados obtidos a partir da corrente de arco e a partir da corrente de arco reduzida, a Tabela 21 compila os resultados da análise deste estudo de caso empregando o modelo do IEEE Std 1584-2018. O valor final de energia incidente é de 0,3218 cal/cm², enquanto a distância de aproximação segura é igual a 127,42 mm. Pode-se atribuir o baixo valor de energia incidente a dois fatores: a curta duração do arco e a disposição dos eletrodos na vertical.

Tabela 21 – Resultados da aplicação do modelo do IEEE Std 1584-2018 para o Estudo de Caso 2.

Variáveis	Valores	Variáveis (considerando corrente de arco reduzida)	Valores
Corrente de arco (kA)	3,7556	Corrente de arco reduzida (kA)	3,6865
Duração do arco (ms)	19	Duração do arco (ms)	20
Energia incidente (cal/cm ²)	0,2973	Energia incidente (cal/cm ²)	0,3218
Distância de aproximação segura (mm)	120,86	Distância de aproximação segura (mm)	127,42

Fonte: Autoria própria.

O nível de energia incidente obtido é inferior ao limiar de 1,2 cal/cm², isto é, uma exposição a este nível de energia sem proteção não implicará em uma queimadura de segundo grau e, portanto, não há exigência de se utilizar uma vestimenta de proteção térmica e demais EPIs com tratamento contra arco elétrico.

4.3 ESTUDO DE CASO 3

O terceiro cenário simulado foi um arco elétrico originado por um curto-circuito trifásico franco na barra 888 do sistema 34-Bus. Essa barra está no lado de baixa tensão do transformador de linha do sistema e opera em 4,16 kV, possuindo a configuração estrela aterrada. Os condutores estão orientados horizontalmente e dispostos ao ar livre.

Os resultados do curto-circuito trifásico franco na barra 888 foram obtidos a partir de uma simulação no *software* ATPDraw. Dada a natureza desbalanceada das redes de distribuição, as três fases apresentam valores distintos de corrente de curto-circuito: a fase B tem maior corrente, 715,11 A, enquanto as fases A e C, tem correntes de 704,17 kA e 692,37 A. Os dados necessários para a aplicação de ambos os modelos são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Parâmetros de aplicação do Estudo de Caso 3.

Parâmetros	Valores
Tensão de circuito aberto – V_{oc} (kV)	4,16
Corrente de curto-circuito trifásico franco – I_{bf} (kA)	0,7151
Espaçamento entre eletrodos – G (mm)	254
Distância de trabalho – D (mm)	305
Configuração dos eletrodos	HOA
Aterramento	Y-G

Fonte: Autoria própria.

4.3.1 Análise de Energia Incidente Empregando o Modelo IEEE Std 1584-2002

Em função do espaçamento entre os eletrodos considerado, a análise de energia incidente para este estudo de caso será feita da mesma forma que para o Estudo de Caso 2, isto é, aplica-se (95) para determinar a energia incidente e (96) para a distância de aproximação segura.

Empregando-se o mesmo dispositivo de proteção utilizado no Estudo de Caso 2, a duração do arco será de 0,5280 segundos para a corrente de falta 0,7151 kA. Com este tempo, estima-se a energia incidente e a distância de aproximação segura, dadas por (176) e (177).

$$E = 36,1668 \text{ J/cm}^2 = 8,6441 \text{ cal/cm}^2 \quad (176)$$

$$D_B = 820,29 \text{ mm} \quad (177)$$

A Tabela 23 apresenta os resultados da análise de energia incidente para este estudo de caso considerando o modelo do IEEE Std 1584-2002. O nível de energia incidente de 8,6441 cal/cm² torna o uso de vestimenta de proteção térmica e de outros EPIs mandatório, visto que ultrapassa o limite de queimadura de segundo grau de 1,2 cal/cm², dado pela curva de Stoll.

Tabela 23 – Resultados da aplicação do modelo do IEEE Std 1584-2002 para o Estudo de Caso 3.

Variáveis	Valores
Duração do arco (s)	0,5280
Energia incidente (cal/cm ²)	8,6441
Distância de aproximação segura (mm)	820,29

Fonte: Autoria própria.

O aparato de proteção contra arcos que o trabalhador deverá utilizar para intervenções nesse sítio são de categoria 3, conforme a NFPA (2021), que protege para exposições de até 25 cal/cm² e inclui os seguintes itens:

- Vestimenta:
 - Camiseta de manga longa AR com ATPV mínimo 25 cal (conforme requerido);
 - Calças AR com ATPV mínimo 25 cal (conforme requerido);
 - Macacão AR com ATPV mínimo 25 cal (conforme requerido);
 - Jaqueta e calças do traje AR com ATPV mínimo 25 cal (conforme requerido);
 - Capuz do traje AR com ATPV mínimo 25 cal;
 - Luvas AR com ATPV mínimo 25 cal ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro;
 - Jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete com ATPV mínimo 25 cal (opcional);
- Equipamentos de proteção:
 - Capacete;
 - Óculos de segurança ou óculos de proteção;
 - Protetor auricular de inserção;
 - Calçado de couro.

4.3.2 Análise de Energia Incidente Empregando o Modelo IEEE Std 1584-2018

Uma vez que tensão de operação barra em avaliação é de 4,16 kV, deve-se empregar o modelo para sistemas com $600 < V_{oc} < 15000$ V, da mesma forma que no Estudo de Caso 2.

A corrente de arco é determinada em duas etapas. Emprega-se (99) para determinar as correntes de arco intermediárias para 600 V, 2700 V e 14300 V, considerando os coeficientes dados na Tabela 24, uma vez que nesta análise os condutores estão dispostos horizontalmente ao ar livre.

Tabela 24 – Constantes para obtenção das correntes de arco intermediárias (configuração HOA).

V_{oc}	600V	2700V	14300V
k₁	0,111147	0,000435	0,000904
k₂	1,008	1,006	0,999
k₃	-0,24	-0,038	-0,02
k₄	0	0	0
k₅	0	0	0
k₆	-3,895E-09	7,859E-10	7,859E-10
k₇	1,641E-06	-1,914E-07	-1,914E-07
k₈	-0,000197	-9,128E-06	-9,128E-06
k₉	0,002615	-0,0007	-0,0007
k₁₀	1,1	0,9981	0,9981

Fonte: Adaptado de IEEE (2018).

As correntes intermediárias são apresentadas em (178), (179) e (180). Esses valores devem ser aplicados em (103), (104) e (105) para se obter os três valores de interpolação a serem empregados na definição da corrente de arco. Esses valores são dados em (181), (182) e (183).

$$I_{\text{arc}600} = 0,2687 \text{ kA} \quad (178)$$

$$I_{\text{arc}2700} = 0,5774 \text{ kA} \quad (179)$$

$$I_{\text{arc}14300} = 0,6401 \text{ kA} \quad (180)$$

$$I_{\text{arc}_1} = 0,7921 \text{ kA} \quad (181)$$

$$I_{\text{arc}_2} = 0,5853 \text{ kA} \quad (182)$$

$$I_{\text{arc}_3} = 0,4416 \text{ kA} \quad (183)$$

A corrente de arco final, dada em (184), será igual a segunda interpolação da corrente de arco, uma vez que a barra analisada tem tensão superior a 2,7 kV.

$$I_{\text{arc}} = 0,5853 \text{ kA} \quad (184)$$

Considerando a corrente de arco elétrico obtida, o tempo de atuação do dispositivo de proteção MV055-80E será de 788 milissegundos.

Com isso, é possível calcular os valores de energia incidente intermediários a partir de (111), (112) e (113), considerando-se os coeficientes dados na Tabela 25 e CF unitário. Esses valores, apresentados em (185), (186) e (187) são empregados nas expressões (117), (118) e (119) para calcular os três termos de interpolação da energia incidente, dados em (188), (189) e (190). Bem como ocorre para a corrente de arco, em função da tensão da barra, a energia incidente resultante será igual ao segundo termo da interpolação de energia incidente e resulta em (191).

Tabela 25 – Constantes para obtenção dos níveis de energia incidente e distância de aproximação segura intermediários (configuração HOA).

V_{oc}	600V	2700V	14300V
k₁	3,470417	3,616266	2,04049
k₂	0,465	0,149	0,177
k₃	-0,261863	-0,761561	1,005092
k₄	0	0	0
k₅	0	0	0
k₆	-3,895E-09	7,859E-10	7,859E-10
k₇	0,000001641	-1,914E-07	-1,914E-07
k₈	-0,000197	-9,128E-06	-9,128E-06
k₉	0,002615	-0,0007	-0,0007
k₁₀	1,1	0,9981	0,9981
k₁₁	0	0	-0,05
k₁₂	-1,99	-1,639	-1,633
k₁₃	1,04	1,078	1,151

Fonte: Adaptado de IEEE (2018).

$$E_{600} = 18,1287 \text{ J/cm}^2 \quad (185)$$

$$E_{2700} = 21,1643 \text{ J/cm}^2 \quad (186)$$

$$E_{14300} = 24,6493 \text{ J/cm}^2 \quad (187)$$

$$E_1 = 23,2748 \text{ J/cm}^2 \quad (188)$$

$$E_2 = 21,6029 \text{ J/cm}^2 \quad (189)$$

$$E_3 = 20,4406 \text{ J/cm}^2 \quad (190)$$

$$E = 21,6029 \text{ J/cm}^2 = 5,1632 \text{ cal/cm}^2 \quad (191)$$

Os coeficientes da Tabela 25 também são empregados para se obter as distâncias de aproximação segura intermediárias, calculadas a partir de (125), (126) e (127). Os valores obtidos (192), (193) e (194) são aplicados nas expressões (131), (132) e (133), resultando em (195), (196) e (197), os três termos da interpolação da distância de aproximação segura.

$$AFB_{600} = 581,43 \text{ mm} \quad (192)$$

$$AFB_{2700} = 733,71 \text{ mm} \quad (193)$$

$$AFB_{14300} = 808,10 \text{ mm} \quad (194)$$

$$AFB_1 = 839,59 \text{ mm} \quad (195)$$

$$AFB_2 = 743,08 \text{ mm} \quad (196)$$

$$AFB_3 = 675,98 \text{ mm} \quad (197)$$

Em função da tensão da barra em análise, a distância de aproximação segura resultante (198) é igual ao segundo termo da interpolação.

$$AFB = 743,08 \text{ mm} \quad (198)$$

Conforme orientação do guia IEEE Std 1584-2018, a estimativa de energia incidente e de distância de aproximação segura deve ser refeita considerando-se a corrente de arco reduzida. As correntes de arco reduzidas intermediárias são obtidas como em (139), (140) e (141) e dependem do fator de correção da variação da corrente de arco, dado por (142). Para o presente estudo de caso, considerar os coeficientes $k_1 = 0$, $k_2 = -3,1555E-06$, $k_3 = 0,0001682$,

$k_4 = -0,0034607$, $k_5 = 0,034124$, $k_6 = -0,1599$ e $k_7 = 0,34629$. O fator de correção resulta em (199).

$$\text{Var}C_f = 0,0698 \quad (199)$$

As correntes de arco reduzidas intermediárias são dadas por (200), (201) e (202).

$$I_{\text{arc min}_{600}} = 0,2594 \text{ kA} \quad (200)$$

$$I_{\text{arc min}_{2700}} = 0,5575 \text{ kA} \quad (201)$$

$$I_{\text{arc min}_{14300}} = 0,6181 \text{ kA} \quad (202)$$

As correntes de arco reduzidas intermediárias são empregadas para calcular os três termos da interpolação da corrente de arco reduzida e seus valores resultantes são apresentados em (203), (204) e (205). Em função da tensão da barra analisada, a corrente de arco reduzida será igual ao segundo termo da interpolação e é apresentada em (206).

$$I_{\text{arc min}_1} = 0,7648 \text{ kA} \quad (203)$$

$$I_{\text{arc min}_2} = 0,5651 \text{ kA} \quad (204)$$

$$I_{\text{arc min}_3} = 0,4264 \text{ kA} \quad (205)$$

$$I_{\text{arc min}} = 0,5651 \text{ kA} \quad (206)$$

A partir do valor da corrente de arco reduzida obtido, é possível determinar o tempo de duração do arco elétrico. Considerando-se o fusível MV055-80E, o tempo de atuação da proteção será de 845 milissegundos.

Com isso, é possível determinar a energia incidente reduzida. Para tanto, os valores de energia incidente reduzida intermediários são dados por (207), (208) e (209). A partir destes, é possível se calcular os três termos da interpolação de energia incidente reduzida, os quais são empregados para se definir a energia incidente reduzida final. Os primeiro, segundo e terceiro

termos da interpolação são dados em (210), (211) e (212) e a energia incidente reduzida final é dada em (213), sendo igual ao segundo termo da interpolação.

$$E_{\min_600} = 18,8830 \text{ J/cm}^2 \quad (207)$$

$$E_{\min_2700} = 22,9562 \text{ J/cm}^2 \quad (208)$$

$$E_{\min_14300} = 23,6401 \text{ J/cm}^2 \quad (209)$$

$$E_{\min_1} = 25,7880 \text{ J/cm}^2 \quad (210)$$

$$E_{\min_2} = 23,0123 \text{ J/cm}^2 \quad (211)$$

$$E_{\min_3} = 21,1333 \text{ J/cm}^2 \quad (212)$$

$$E = 23,0423 \text{ J/cm}^2 = 5,5072 \text{ cal/cm}^2 \quad (213)$$

As distâncias de aproximação segura reduzidas intermediárias são apresentadas em (214), (215) e (216) e são empregadas para calcular os três termos da interpolação da distância de aproximação segura reduzida final. Esses termos são apresentados em (217), (218) e (219).

$$AFB_{\min_600} = 593,46 \text{ mm} \quad (214)$$

$$AFB_{\min_2700} = 771,01 \text{ mm} \quad (215)$$

$$AFB_{\min_14300} = 787,68 \text{ mm} \quad (216)$$

$$AFB_{\min_1} = 894,45 \text{ mm} \quad (217)$$

$$AFB_{\min_2} = 773,11 \text{ mm} \quad (218)$$

$$AFB_{\min_3} = 688,75 \text{ mm} \quad (219)$$

Em função da tensão da barra em análise, a distância de aproximação segura reduzida final (220) é igual ao segundo termo da interpolação.

$$AFB = 773,11 \text{ mm} \quad (220)$$

A Tabela 26 permite comparar os resultados obtidos empregando-se a corrente de arco e a corrente de arco reduzida. A redução de aproximadamente 3,46% na corrente de arco levou a um aumento de 57 milissegundos no tempo de atuação da proteção, implicando em um aumento de em torno de 6,67% no nível de energia incidente.

Tabela 26 – Resultados da aplicação do modelo do IEEE Std 1584-2018 para o Estudo de Caso 3.

Variáveis	Valores	Variáveis (considerando corrente de arco reduzida)	Valores
Corrente de arco (kA)	0,5853	Corrente de arco reduzida (kA)	0,5651
Duração do arco (ms)	788	Duração do arco (ms)	845
Energia incidente (cal/cm ²)	5,1632	Energia incidente (cal/cm ²)	5,5072
Distância de aproximação segura (mm)	743,08	Distância de aproximação segura (mm)	773,11

Fonte: Autoria própria.

Os valores de energia incidente e distância de aproximação segura finais (5,5072 cal/cm² e 773,11 mm) são dados em função da corrente de arco reduzida, em função do aumento no tempo de atuação do dispositivo de proteção. Para o nível de energia incidente considerado, é se faz necessária a adoção de vestimentas de proteção térmica e demais EPIs de categoria 2. O detalhamento do aparato de proteção ao trabalhador inclui:

- Vestimenta:
 - Camiseta de manga longa AR e calças AR ou macacão AR com ATPV mínimo 8 cal;
 - Escudo facial AR ou capuz AR e balaclava AR com ATPV mínimo 8 cal;
 - Jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete com ATPV mínimo 8 cal (opcional);
- Equipamentos de proteção:
 - Capacete;
 - Óculos de proteção;
 - Protetor auricular de inserção;

- Luvas de couro para trabalho pesado, luvas AR com ATPV mínimo 8 cal ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro;
- Calçado de couro.

4.4 RESUMO DOS RESULTADOS E COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS

A Tabela 27 apresenta os resultados de energia incidente e de distância de aproximação segura para os três estudos de caso avaliados empregando os modelos de 2002 e de 2018 da IEEE Std 1584. Os resultados do Estudo de Caso 1 após a aplicação das técnicas de mitigação não estão apresentados nesta tabela, bem como os dados de corrente de arco para o Estudo de Caso 2 e o Estudo de Caso 3, visto o emprego do Modelo Teórico para análise segundo o IEEE Std 1584-2002.

Tabela 27 – Resumo dos resultados dos estudos de caso analisados.

Estudo de Caso	Variável	Modelo		Variação (2018/2002)
		2002	2018	
1	Corrente de arco (kA)	5,0693	5,9559	+17,49%
	Energia incidente (cal/cm ²)	55,8530	109,5779	+96,19%
	Distância de aproximação segura (mm)	2085,13	2947,79	+41,37%
2	Energia incidente (cal/cm ²)	1,3622	0,3218	-76,38%
	Distância de aproximação segura (mm)	325,63	127,42	-60,87%
3	Energia incidente (cal/cm ²)	8,6441	5,5072	-36,29%
	Distância de aproximação segura (mm)	820,29	773,11	-5,75%

Fonte: Autoria própria.

Nas três situações avaliadas, os resultados são decorrentes das correntes de arco reduzidas, visto que a redução na corrente de arco leva a um aumento no tempo de atuação do dispositivo de proteção, comprovando, portanto, a relação direta entre a duração do arco elétrico e o nível de energia incidente.

A maior diferença entre os níveis de energia incidente estimados pelos modelos de 2002 e 2018 ocorre no cenário do Estudo de Caso 1, no qual se utilizou os dois modelos empíricos e em que os condutores se encontram arranjados horizontalmente. Tal resultado vai de encontro a observações da literatura, onde se indica que a energia incidente é maior quando os eletrodos estão horizontalmente dispostos. Uma vez que o modelo de 2002 não contempla a diferença de orientação, este pode ser apontado como um fator de diferenciação entre os modelos.

Por fim, vale destacar as diferenças encontradas entre os valores obtidos nos Estudos de Caso 2 e 3 estão atreladas ao uso do Modelo Teórico quando empregado o IEEE Std 1584-2002, em função deste modelo ser derivado do trabalho de Lee (1982). Essa hipótese pode ser corroborada caso fosse utilizado o modelo empírico nessa situação. Mesmo que os espaçamentos entre os condutores dos cenários estejam fora dos limites de aplicação, no Estudo de Caso 2 a diferença entre o valor de energia incidente obtido pelo modelo de 2018 e pelo modelo de 2002 seria de -42,87% e, no Estudo de Caso 3, ao invés de haver uma diminuição, haveria um aumento de +84,21% do modelo de 2002 para o modelo de 2018.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Entre os riscos associados à ocorrência de um arco elétrico, o risco térmico é geralmente considerado o mais relevante, visto que a maior parte dos acidentes decorrentes desse tipo de evento envolvem queimaduras elétricas. A possibilidade de ocorrência de um arco elétrico é antecipada a partir de um processo denominado análise de risco de arco elétrico, o qual contempla a análise de energia incidente, que trata especialmente do potencial risco térmico associado ao arco.

A análise de energia incidente busca estimar os níveis de energia incidente que podem ocorrer em um determinado sítio, propondo estratégias de proteção ao trabalhador e ao patrimônio. Em especial no que tange à proteção do trabalhador, a estimativa de energia incidente é empregada para definir vestimentas de proteção térmica e outros equipamentos de proteção que permitam ao colaborador trabalhar em ambiente energizado com segurança.

Os modelos de estimativa de energia incidente são bastante conhecidos na literatura, como os métodos de Lee e de Doughty-Neal, porém o modelo provido pelo guia IEEE Std 1584 é o mais difundido, visto a abrangência de seus parâmetros de aplicação.

O presente trabalho propôs realizar uma análise de energia incidente em redes-teste de distribuição empregando as versões de 2002 e de 2018 da IEEE Std 1584 como modelo de estimativa de energia incidente. Quando necessário, propôs técnicas de mitigação e selecionou vestimentas de proteção térmica e outros EPIs adequados para os cenários analisados.

Os estudos de caso apresentados são teóricos e foram desenvolvidos com o intuito de mostrar a aplicabilidade dos modelos e da metodologia proposta. Ainda assim, a avaliação dos resultados ratifica uma das premissas mais célebres quanto à análise de energia incidente: a relação direta entre o tempo de atuação da proteção e o nível de energia incidente no ponto de análise. Isso se reflete na quantidade de técnicas de redução de energia incidente associadas à dispositivos de proteção. Além disso, a orientação dos eletrodos se mostra influente nos níveis de energia incidente, como já reportado na literatura, o que pode ser verificado a partir da diferença entre os resultados obtidos empregando o modelo de 2002, o qual não fazia essa diferenciação, e o modelo de 2018.

Embora seja efetivo dentro de sua abrangência, o modelo do IEEE Std 1584 ainda apresenta limitações quanto à aplicação em redes de distribuição. Por ser limitado a aplicações de até 15 kV, esse método não pode ser empregado na análise de energia incidente para redes de distribuição de média tensão em sua totalidade, as quais ocorrem no Brasil em tensões

maiores como, por exemplo, 23,1 kV. Ademais, o intervalo de valores de espaçamento entre eletrodos suportado pelo modelo está em desconformidade com as normas brasileiras, o que também pode ser apontado como uma dificuldade encontrada para a análise desse tipo específico de sistema elétrico.

Por fim, conclui-se que a análise de energia incidente inclui não somente a aplicação de um modelo de estimativa, mas também a avaliação de dispositivos de proteção, proposição de processos e seleção de equipamentos de proteção.

Como resultado da pesquisa desenvolvida ao longo de curso de mestrado, foram publicados artigos em eventos nacionais e internacionais, a saber:

- CAMPONOGARA, M.; BERNARDON, D. P. Evaluation of automatic generation control modes using ANATEM software. In: 2019 IEEE PES INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES CONFERENCE – LATIN AMERICA (ISGT LATIN AMERICA), Gramado – RS. **Anais...** Gramado – RS: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895280.
- CAMPONOGARA, M. et al. Impact of electrodes configuration on incident energy analysis using IEEE Std 1584. In: 2020 IEEE PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION – LATIN AMERICA (T&D LA), Montevideo, Uruguay. **Anais...** Montevideo: IEEE, 2020. DOI: 10.1109/TDLA47668.2020.9326224.
- CAMPONOGARA, M. et al. Avaliação de energia incidente utilizando o software ATPDraw e a IEEE Std 1584-2018. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA 2020 (CBA), Porto Alegre – RS. **Anais...** Porto Alegre – RS: SBA, 2020. DOI: 10.48011/asab.v2i1.1699.
- CAMPONOGARA, M. et al. IEEE 13-node incident energy analysis using online platform. In: 13TH SEMINAR ON POWER ELECTRONICS AND CONTROL (SEPOC 2021), Santa Maria – RS. **Anais...** Santa Maria – RS: 2021.

Além disso, aponta-se como proposta de continuidade para este trabalho estender o alcance da estimativa de energia incidente para os demais níveis de tensão dos sistemas de distribuição de energia elétrica, tanto em redes aéreas quanto subterrâneas, além de subestações de distribuição, considerando-se faltas do tipo fase-terra, as quais são as mais predominantes nesses sistemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN BURN ASSOCIATION. **National Burn Repository 2017 Update: Report of Data From 2008-2017**. Chicago – IL, Estados Unidos, 2017. Disponível em: <https://cdn.ymaws.com/ameriburn.site-ym.com/resource/collection/4C72F10C-24FD-401C-8608-417BFAB10138/2017_ABA_NBR_Annual_Report.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2020.

AMMERMAN, R. F. et al. Comparative study of arc modeling and arc flash incident energy exposures. In: 2008 55TH IEEE PETROLEUM AND CHEMICAL INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE, Cincinnati – OH, Estados Unidos. **Anais...** Cincinnati: IEEE, 2008. DOI: 10.1109/PCICON.2008.4664001.

ARNOLDO, B. D. et al. Electrical injuries: a 20-year review. **Journal of Burn Care & Rehabilitation**: v. 25, n. 6, p. 479-484, nov./dec. 2004. DOI: 10.1097/01.bcr.0000144536.22284.5c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16384: Segurança em eletricidade: recomendações e orientações para trabalho seguro em serviços em eletricidade**. Rio de Janeiro, 2020. 56 p.

ATPDRAW. **ATPDraw**. Disponível em: <<https://www.atpdraw.net/>>. Acesso em: 3 jun. 2020.

BRANDÃO, C. et al. Electrical burns: a retrospective analysis over a 10-year period. **Ann Burns Fire Disasters**: v. 30, n. 40, p. 268-271, dec. 2017. PMID: PMC6033477.

BRASIL. Ministério da Economia. Portaria n. 915, de 30 de julho de 2019. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 31 jul. 2019. Disponível em: <https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_Legislacao/SST_Legislacao_Portarias_2019/Portaria-SEPTR-n.-915---aprova-a-nova-NR-01.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2021.

_____. Ministério do Trabalho. Portaria n. 3.124, de 08 de junho de 1978. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 6 jul. 1978. Disponível em: <https://sit.trabalho.gov.br/portal/images/SST/SST_normas_regulamentadoras/NR-10.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2021.

_____. Ministério do Trabalho. Portaria n. 12, de 06 de junho de 1983. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 14 jun. 1983. Disponível em: <https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_Legislacao/SST_Legislacao_Portarias_1983/Portaria-n.-12-Altera-NR-7-8-9-10-12-13-14-e-Anexo-VII-da-15.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2021.

_____. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria n. 25, de 15 de outubro de 2001. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 out. 2001. Disponível em: <https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_Legislacao/SST_Legislacao_Portarias_2001/Portaria-n.-25-Nova-NR-06.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2021.

_____. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria n. 598, de 7 de dezembro de 2004. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 28 dez. 2004. Disponível em:

<https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_Legislacao/SST_Legislacao_Portarias_2004/Portaria-n.-598-Nova-NR-10.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2021.

_____. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria n. 194, de 7 de dezembro de 2010. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 8 dez. 2010. Disponível em: <https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_Legislacao/SST_Legislacao_Portarias_2010/Portaria-n.-194-Altera-NR-06.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2021.

_____. Ministério do Trabalho e Previdência Social. Portaria n. 508, de 29 de abril de 2016. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2 mai. 2016. Disponível em: <https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_Legislacao/SST_Legislacao_Portarias_2016/Portaria-MTPS-n.-508-Altera-NR-10---Corrige-Anexos-nos-itens.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2021.

BURNS, R. J.; BAKER, A. D.; HRNCIR, D. E. Current-limiting arc flash quenching system for improved incident energy reduction. **IEEE Transactions on Industry Applications**: v. 55, n. 2, p. 2138-2143, mar./apr. 2019. DOI: 10.1109/TIA.2018.2876639.

COOPER BUSSMANN. **Circuit Protection Solutions**. Disponível em: <<https://www.mouser.com/catalog/supplier/library/pdf/Cooperfullcatalog.pdf>>. Acesso em: 1 abr. 2021.

DAS, J. C. **Arc flash hazard analysis and mitigation**. Piscataway – NJ, Estados Unidos: IEEE Press, 2012.

DOAN, D. R. Arc flash calculations for exposures to dc systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**: v. 46, n. 6, p. 2299-2302, nov./dez. 2010. DOI: 10.1109/TIA.2010.2070480.

DOUGHTY, R. L. et al. Testing update on protective clothing and equipment for electric arc exposure. In: IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY 44TH ANNUAL PETROLEUM AND CHEMICAL INDUSTRY CONFERENCE, Banff – AB, Canadá. **Anais...** Banff: IEEE, 1997. DOI: 10.1109/PCICON.1997.648199.

DOUGHTY, R. L.; NEAL, T. E.; FLOYD, H. L. Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600 V power distribution systems. In: IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY 45TH ANNUAL PETROLEUM AND CHEMICAL INDUSTRY CONFERENCE, Indianapolis – IN, Estados Unidos. **Anais...** Indianapolis: IEEE, 1998. DOI: 10.1109/PCICON.1998.728000.

DUNKI-JACOBS, J. R. The escalating arcing ground-fault phenomenon. **IEEE Transactions on Industry Applications**: v. IA-22, n. 6, p. 1156-1161, nov. 1986. DOI: 10.1109/TIA.1986.4504848.

EDISON. **Circuit Protection Products**. Disponível em: <<https://usermanual.wiki/Pdf/1000318087Catalog.1127861704/view>>. Acesso em: 1 abr. 2021.

EUROPEAN EMTP-ATP USERS GROUP (EEUG). **Welcome to EEUG**. Disponível em: <<https://www.emtp.org/>>. Acesso em: 20 mar. 2021.

HODGSON, D. L.; SHIPP, D. Arc-flash incident energy reduction using zone selective interlocking. **IEEE Transactions on Industry Applications**: v. 46, n. 3, p. 1243-1251, mai./jun. 2010. DOI: 10.1109/TIA.2010.2046284.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations (IEEE Std 1584-2002). 2002. DOI: 10.1109/IEEESTD.2002.94138.

_____. **IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations (IEEE Std 1584-2018)**. 2018. DOI: 10.1109/IEEESTD.2018.8563139.

_____. National Electrical Safety Code (R) (NEC C2:2017). 2016. DOI: 10.1109/IEEESTD.2016.7526279.

_____. **Preprint Proposals for the 2022 Edition of the National Electrical Safety Code (NEC (R))**. 2019. Doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8753791.

_____. **Resources**. Disponível em: <<https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>>. Acesso em: 25 jul. 2020.

KAUFMANN, R. H.; PAGE, J. C. Arcing fault protection for low-voltage power distribution system – nature of the problem. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems**: v. 79, n. 3, p. 160-165, apr. 1960. DOI: 10.1109/AIEEPAS.1960.4500717.

KINDERMANN, G. **Curto-circuito**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.

LEE, R. H. The other electrical hazard: electric arc blast burns. **IEEE Transactions on Industry Applications**: v. IA-18, n. 3, p. 246-251, mai. 1982. DOI: 10.1109/TIA.1982.4504068.

LUZ, D. P. et al. Electrical burns: a retrospective analysis across a 5-year period. **Burns**: v. 35, n. 7, p. 1015-1019, nov. 2009. DOI: 10.1016/j.burns.2009.01.014.

MOHAMMADI, A. A. et al. A survey on 30 months electrical burns in Shiraz University of Medical Sciences Burn Hospital. **Burns**: v. 34, n. 1, p. 111-113, feb. 2008. DOI: 10.1016/j.burns.2006.12.007.

MOHLA, D. C. et al. Mitigating electric shock and arc flash – a total system approach for personnel and equipment protection. In: 57TH ANNUAL PETROLEUM AND CHEMICAL INDUSTRY CONFERENCE (PCIC), San Antonio – TX, Estados Unidos. **Anais...** San Antonio: IEEE, 2010. DOI: 10.1109/PCIC.2010.5666833.

NEAL, T. E.; BINGHAM, A. H.; DOUGHTY, R. L. Protective clothing guidelines for electric arc exposure. In: 1996 IAS PETROLEUM AND CHEMICAL INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE, Philadelphia – PA, Estados Unidos. **Anais...** Philadelphia: IEEE, 1996. DOI: 10.1109/PCICON.1996.564912.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **Standard for Electrical Safety in the Workplace (NFPA 70E-2021)**. Quincy – MA, Estados Unidos: NFPA, 2020.

PAUL, S.; JEWELL, W. Optimization methodology for minimizing the arc flash incident energy. In: 2018 IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY ANNUAL MEETING (IAS), Portland – OR, Estados Unidos. **Anais...** Portland: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/IAS.2018.8544668.

PRIGMORE, J.; SCHAFFER, J. S. Triggered current limiters – their arc flash mitigation and damage limitation capabilities. **IEEE Transactions on Power Delivery**: v. 32, n. 2, p. 1114-1122, apr. 2017. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2602098.

SHIELDS, F. J. The problem of arcing faults in low-voltage power distribution systems. **IEEE Transactions on Industry and General Applications**: v. IGA-3, n. 1, p. 15-25, jan. 1967. DOI: 10.1109/TIGA.1967.4180734.

SHIPP, D.; WOOD, D. Mitigating arc-flash exposure. **IEEE Industry Applications Magazine**: v. 17, n. 4, p. 28-37, jul./aug. 2011. DOI: 10.1109/MIAS.2010.939627.

SHORT, T. A.; EBLEN, M. L. Medium-voltage arc flash in open air and padmounted equipment. **IEEE Transactions on Industry Applications**: v. 48, n. 1, p. 245-253, jan./feb. 2012. DOI: 10.1109/TIA.2011.2175679.

STANBACK, H. I. Predicting damage from 277-V single phase to ground arcing faults. **IEEE Transactions on Industry Applications**: v. IA-13, n. 4, p. 307-314, jul. 1977. DOI: 10.1109/TIA.1977.4503412.

U. S. BUREAU OF LABOR STATISTICS. **Survey of Occupational Injuries and Illnesses Data - 2019 Data**. Disponível em: <<https://www.bls.gov/iif/soii-data.htm>>. Acesso em: 16 fev. 2021.

WESTEX. **The Difference Between Arc Rated (AR) and Flame Resistant (FR)**. Disponível em: <<https://www.westex.com/blog/the-difference-between-ar-and-fr/>>. Acesso em: 7 mar. 2021.

WU, A. Y. Modified medium-voltage arc-flash incident energy calculation method. **IEEE Transactions on Industry Applications**: v. 46, n. 5, p. 1866-1872, sep./oct. 2010. DOI: 10.1109/TIA.2010.2059640.