



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DIEGO ARIMATÉIA DE ALMEIDA JERÔNIMO

**ESTUDOS PARA MITIGAR OS NÍVEIS DE ENERGIA INCIDENTE ORIGINADA
POR ARCO ELÉTRICO EM UMA INSTALAÇÃO INDUSTRIAL DE 6,9 KV/ 480 V**

FORTALEZA

2021

DIEGO ARIMATÉIA DE ALMEIDA JERÔNIMO

ESTUDOS PARA MITIGAR OS NÍVEIS DE ENERGIA INCIDENTE ORIGINADA POR
ARCO ELÉTRICO EM UMA INSTALAÇÃO INDUSTRIAL DE 6,9 KV/ 480 V

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Amaral Câmara

FORTALEZA
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- J54e Jerônimo, Diego Arimatéia de Almeida.
Estudos para mitigar os níveis de energia incidente originada por arco elétrico em uma instalação industrial de 6,9 kV/ 480 V / Diego Arimatéia de Almeida Jerônimo. – 2021.
142 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Raphael Amaral Câmara.
1. Arco elétrico. 2. Arco voltaico. 3. Energia incidente. 4. Risco. 5. Mitigação. I. Título.

CDD 621.3

DIEGO ARIMATÉIA DE ALMEIDA JERÔNIMO

ESTUDOS PARA MITIGAR OS NÍVEIS DE ENERGIA INCIDENTE ORIGINADA POR
ARCO ELÉTRICO EM UMA INSTALAÇÃO INDUSTRIAL DE 6,9 KV/ 480 V

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 31/08/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raphael Amaral Câmara (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Caio César Cavalcante Bezerra Menezes

A Deus.

À minha mãe (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, ao Sagrado Coração de Jesus, ao Imaculado Coração da Virgem Maria e aos meus santos de devoção Santa Teresa de Los Andes, São Padre Pio e Beato Carlo Acutis, pela intercessão.

Ao professor Dr. Raphael Amaral pela orientação desse trabalho.

Ao professor Dr. Raimundo Furtado Sampaio e ao engenheiro Caio César, participantes da banca examinadora, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos meus amigos da faculdade, entre eles: Francisco Edilberto (*in memoriam*), Izac Oliveira, Lucas Severo, Filipe Virgolino, Janderson, Luis Henrique, Luis Carlos, Naum Barros, Yuri Maia, Manoel Rubem, Alan Batista, Luis Walter, Helber, Haroldo, Carlos Henrique, Breno Freitas, Paulo Victor, pelo apoio, pelas muitas horas de estudos em grupo, auxílios nos estudos das provas, nos projetos e nos relatórios. Como dizem “Ninguém Se Forma Sozinho”.

Ao Vasco, pelas xerox das provas antigas.

Aos técnicos e ex-técnicos do DEE, Ernande Eugênio Campelo Morais, Eliézer Ribeiro da Silva Brandão e Jorge Antônio Morais Silveira.

À secretária e ex-secretários do DEE, Adely Ribeiro Meira Corrêa, Emiliano Santos e Isabel Moraes, que, ao longo desses anos, prestaram grande assistência aos alunos.

Aos professores, entre eles: Ruth Leão, Fernando Antunes, Carlos Gustavo, Kleber Lima, Natália Barroso, José Belo, Tomáz Nunes, Alexandre Fernandes, Fátima Sombra, Tobias Fernandes, Cunha, Abraão, Luis Gustavo, Raimundo Furtado, Sérgio Daher, Bismark, Ailson, Alyssom Amorim, Ricardo Jardel, George Thé, Francisco Hélio, Simone Lopes, Silvia Regina pela maestria no ensino.

Ao meu supervisor do estágio na empresa AST Engenharia de Segurança Industrial, o engenheiro eletricista Caio César, por todo ensinamento que agregou bastante na minha vivência profissional.

Aos meus amigos de batalha, entre eles: Emanoela Araújo, Danielle Sousa, Carlos Eduardo, Eliziário Braga, Tally e familiares pelo apoio e orações.

Ao André Daiki, por toda mentoria, ajuda e tira dúvidas de como desenvolver meu Trabalho de Conclusão de Curso.

Ao meu amigo Adrian que me ajudou na tradução do resumo para o espanhol.

Menção honrosa aos professores do Youtube Fernando Grings, engenheiro Pablo Guimarães e ao engenheiro Luis Cesar Emanuelli, que me auxiliaram bastante através de suas aulas em momentos cruciais na minha faculdade.

“Deus alegria infinita.”

Santa Teresa de Los Andes

“Nada te perturbe,
Nada te espante,
Pois tudo passa
Só Deus não muda.
A paciência
Tudo alcança
Quem a Deus tem,
Nada lhe falta,
Só Deus basta.”

Santa Teresa de Ávila

RESUMO

O arco elétrico é um fenômeno da eletricidade que pode ocorrer de maneira inesperada e indesejada em circuitos elétricos energizados, provocado por curto-circuito, podendo liberar calor intenso. Caso o sistema elétrico não apresente métodos adequados para redução e proteção, pode haver grande risco de acidentes envolvendo queimaduras graves e até óbito, e em materiais, pode causar danos e incêndios. Considerando esses riscos e a necessidade de segurança, com a presente pesquisa, objetivou-se realizar um estudo sobre energia incidente causada por arco elétrico em uma instalação industrial e recomendar propostas para mitigar o nível de energia incidente e dimensionar as vestimentas retardantes a chama e EPIs resistentes a arco. Trata-se de uma pesquisa de tipologia qualitativa classificada como aplicada e estudo de caso, na qual se abordou: sobre o estudo do fenômeno do arco elétrico, suas causas, consequências e características; sobre os principais métodos de cálculo da energia incidente; sobre as principais normas nacionais e internacionais que expõem sobre o arco elétrico, a energia incidente e a segurança em eletricidade. Ademais, foram apresentadas algumas técnicas para reduzir a energia incidente e minimizar os danos provocados pelo arco elétrico. Além da revisão bibliográfica, foi realizado um estudo de caso junto a uma indústria, com objetivo de calcular os níveis de energia incidente, conforme norma IEEE 1584, de 2018, dimensionar os equipamentos de proteção individual contra arco, conforme norma NFPA 70E, de 2021, analisar possíveis propostas de mitigação, aplicar um método para reduzir os níveis e comparar com o sistema atual. Como resultado, foi apresentado que a recomendação técnica indicada foi capaz de mitigar os níveis de energia incidente de toda unidade industrial. Auxiliando na economia de investimentos em equipamentos de proteção individual resistentes a arco elétrico, na redução do risco dos operadores em sofrer acidentes, aumentando a sua segurança, e na diminuição dos danos nos painéis elétricos.

Palavras-chave: Arco elétrico. Arco voltaico. Energia incidente. Risco. Proteção. Mitigação.

RESUMEN

El arco eléctrico es un fenómeno eléctrico que se puede pasar de manera inesperada e indeseada en circuitos eléctricos energizados, causado por un cortocircuito, que puede liberar un calor intenso. Si el sistema eléctrico no presenta los métodos adecuados de reducción y protección, puede existir un gran riesgo de accidentes con quemaduras graves e incluso la muerte, y en los materiales, puede provocar daños e incendios. Teniendo en cuenta estos riesgos y la necesidad de seguridad en esta investigación, el objetivo que se planteó fue el de realizar un estudio sobre la energía incidente provocada por un arco eléctrico en una instalación industrial y recomendar propuestas para mitigar el nivel de energía incidente y determinar la ropa ignífuga y EPP resistentes al arco. Se trata de una investigación de tipología cualitativa clasificada como aplicada y de caso de estudio que abordó: el estudio del fenómeno del arco eléctrico, sus causas, consecuencias y características; sobre los principales métodos de cálculo de la energía incidente; sobre las principales normas nacionales e internacionales que exponen sobre arco eléctrico, energía incidente y seguridad en la electricidad. Además, se presentaron algunas técnicas para reducir la energía incidente y minimizar los daños provocados por el arco eléctrico. Además de la revisión de la literatura, se realizó un estudio de caso con una industria con el fin de calcular los niveles de energía incidente, según la norma IEEE 1584, 2018, dimensionar el equipo de protección individual contra arco, según la norma NFPA 70E, 2021, analizar posibles propuestas de mitigación, aplicar un método para reducir niveles y comparar con el sistema actual. Por ende, el resultado demostró que la recomendación técnica indicada fue capaz de mitigar los niveles de energía incidente de toda el unidad industrial. Ayuda a ahorrar inversiones en ropa y equipos de protección personal resistentes a los arcos eléctricos, reduciendo el riesgo de que los operadores sufran accidentes, aumentando su seguridad y disminuyendo los daños en los cuadros eléctricos.

Palabras clave: Arco eléctrico. Arco voltaico. Energía incidente. Riesgo. Protección. Mitigación.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração de um arco elétrico.	25
Figura 2 – Exemplos de Configuração de eletrodo de arco aberto.....	28
Figura 3 – Eletrodo do arco dentro de uma configuração fechada e exemplo de descarga.....	29
Figura 4 – Configuração de eletrodo de arco móvel e movimento do arco.....	30
Figura 5 – Configuração de eletrodo de arco ejetado e exemplos.....	31
Figura 6 – Exemplos de arco rastreador.	32
Figura 7 – Classificação das queimaduras na pele.	33
Figura 8 – Distribuição de queimaduras em vítimas de acidente por arco elétrico.....	34
Figura 9 – Exemplos de vítimas por queimaduras ocasionadas por arco elétrico.	35
Figura 10 – Transferência de calor da fonte de arco para um objeto receptor de calor.	37
Figura 11 – Diagrama fasorial da tensão e corrente de arco.	38
Figura 12 – Relação tempo-temperatura, tolerância do tecido humano.	39
Figura 13 – Aumento da temperatura da pele em 0,1 s para várias distâncias.....	40
Figura 14 – Arranjos para teste de arco em configuração aberta e configuração fechada.	44
Figura 15 – Ensaios em configurações VCB, VCBB e HCB.....	50
Figura 16 – Ensaios em configurações VOA e HOA.....	50
Figura 17 – Limites de aproximação.	74
Figura 18 – Exemplo de placa de segurança – Risco de choque e arco elétrico.	78
Figura 19 – Hierarquia de controle de riscos (adaptado da NFPA 70E, 2021).	82
Figura 20 – Importância do tempo de eliminação da falta.	83
Figura 21 – RLCCs instalados em série com os circuitos alimentadores, em série com circuitos de saída e seccionando uma barra.	85
Figura 22 – Componentes do dispositivo pirotécnico.	85
Figura 23 – Componentes do protetor de limitação de corrente.....	86
Figura 24 – Aplicação do WFR no sistema.....	87
Figura 25 – Ajustes com relés digitais, utilizando-se três estágios.	89
Figura 26 – Ajuste da corrente de Short-Time Delay abaixo da corrente de arco.	89
Figura 27 – Aplicação dos relés diferenciais de barramento.....	90
Figura 28 – Aplicação do ZSI no sistema.....	92
Figura 29 – Comparativo de sistemas sem e com relé detector de arco após a ação de um arco elétrico.	93
Figura 30 – Funcionamento do relé dentro de um painel elétrico.	94

Figura 31 – Relé detector de luz de arco instalado com relé contra sobrecorrente.	94
Figura 32 – Instalação dos sensores ótico e pontuais do fabricante SEL.	95
Figura 33 – Aplicação do sensor ótico do relé detector de arco.	95
Figura 34 – Exemplo do sistema de ventilação e distribuição dos compartimentos de um painel resistente a arco interno.	97
Figura 35 – Características construtivas de um painel resistente a arco.	97
Figura 36 – Compartimentações internas de um painel resistente a arco.	98
Figura 37 – Representação da energia incidente em uma vestimenta de proteção.	100
Figura 38 – Vestimentas de proteção e EPIs contra arco elétrico a partir do Método da Categoria de EPI para arco elétrico.	102
Figura 39 – Vestimentas de proteção e EPIs contra arco elétrico a partir Método da Análise de Energia Incidente.	104
Figura 40 – Diagrama unifilar simplificado da indústria em estudo.	107
Figura 41 – Disjuntor de proteção de circuito em 6,9 kV dentro do cubículo blindado.	113
Figura 42 – Painel elétrico de 480 V.	113
Figura 43 – Modelo de placa de sinalização para energia incidente entre 1,2 a 12 cal/cm ²	138
Figura 44 – Modelo de placa de sinalização para energia incidente acima de 12 cal/cm ²	139
Figura 45 – Modelo de placa de sinalização para energia incidente acima de 40 cal/cm ²	139

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação do tipo de arco elétrico.	27
Quadro 2 – Correlação entre configuração dos eletrodos e equipamentos.	51
Quadro 3 – Seleção de vestimentas retardantes a chama e EPIs resistentes a arco quando o Método de Análise de Energia Incidente é usado.	70
Quadro 4 – Categoria dos EPIs para arco elétrico para sistemas de corrente alternada.	71
Quadro 5 – Equipamentos de proteção necessários para cada categoria de EPI.	73
Quadro 6 – Limitação dos métodos de cálculo.	75
Quadro 7 – Orientações para aplicação de vestimentas de proteção contra os efeitos térmicos de um arco elétrico.	79
Quadro 8 – Cubículos blindados de entrada do sistema.	141
Quadro 9 – Cubículos blindados que alimentam os motores.	141
Quadro 10 – Cubículos blindados de entrada das salas elétricas.	142
Quadro 11 – Cubículos blindados que alimentam os transformadores.	142
Quadro 12 – Cubículos blindados que alimentam os transformadores.	142
Quadro 13 – Cubículos blindados que alimentam os transformadores.	142
Quadro 14 – Cubículos blindados que alimentam os transformadores.	143
Quadro 15 – Painéis elétricos de baixa tensão.	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potência do Arco x Distância.	40
Tabela 2 – Classes de equipamentos e distâncias típicas entre condutores.	49
Tabela 3 – Classes de equipamentos e distâncias de trabalho típicas.	52
Tabela 4 – Coeficientes para Equação (11).	55
Tabela 5 – Coeficientes para Equação (20).	57
Tabela 6 – Guia para determinar altura e largura equivalente de invólucro.	59
Tabela 7 – Coeficientes para as equações (24) e (25).	60
Tabela 8 – Coeficientes para Equações (26), (29), (38) e (41).	63
Tabela 9 – Coeficientes para Equações (27) e (39).	63
Tabela 10 – Coeficientes para Equações (28) e (40).	63
Tabela 11 – Resultados obtidos das correntes de curto-circuito trifásico de cada cubículo blindado e painel elétrico e os tempos de atuação dos dispositivos de proteção.	111
Tabela 12 – Características dos painéis em análise e distância de trabalho.	114
Tabela 13 – Resultados obtidos das correntes de arco intermediárias, das interpolações, dos valores finais e da corrente de arco reduzida.	115
Tabela 14 – Resultados obtidos das correntes de arco intermediárias, finais e da corrente de arco reduzida.	116
Tabela 15 – Resultados obtidos dos fatores de correção para o tamanho do invólucro de cada painel.	118
Tabela 16 – Resultados obtidos das energias incidentes intermediárias, das interpolações e dos valores finais.	118
Tabela 17 – Resultados obtidos da energia incidente dos painéis elétricos.	119
Tabela 18 – Resultados obtidos dos limites de aproximação segura intermediários, das interpolações e dos valores finais.	121
Tabela 19 – Resultados obtidos dos limites de aproximação segura dos painéis elétricos. ...	122
Tabela 20 – Resultados da categoria de EPI a partir do Método de Análise de Energia Incidente.	122
Tabela 21 – Resultados obtidos da corrente de arco, da energia incidente, do limite de aproximação segura e da categoria de EPI de cada painel.	124
Tabela 22 – Resultados obtidos com a utilização de relés detectores de arco elétrico.	127
Tabela 23 – Comparação dos resultados entre a instalação industrial com o sistema de proteção atual e com relé detector de arco.	128
Tabela 24 – Estudo de curto-circuito cedido pela indústria.	140

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRACOPEL	Associação Brasileira de Conscientização dos Perigos de Eletricidade
AFB	Arch-Flash Boundary
ATPV	Arc Thermal Performance Value
BT	Baixa Tensão
CCM	Centro de Comandos de Motores
CDC	Centro de Distribuição de Cargas
CF	Correction Factor
DLCC	Dispositivo Limitador de Corrente de Curto-circuito
EES	Equivalent Enclosure Size
EPC	Equipamento de Proteção Coletivo
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ETAP	Electrical Power System Analysis Software
HCB	Horizontal Conductors in a Box
HOA	Horizontal Conductors in Open Air
IEC	Internacional Electrotechnical Commision
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISSA	International Social Security Association
MT	Média Tensão
NBR	Norma Brasileira
NFPA	National Fire Protection Association
NR	Norma Regulamentadora
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
RLCC	Reator Limitador de Corrente de Curto-circuito
SEL	Schweitzer Engineering Laboratories
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TC	Transformador de Corrente
VarCf	Variation Arc Current Correction Factor
VCB	Vertical Conductors in a Box
VCBB	Vertical Conductors in a Box with an insulating Barrier
VOA	Vertical Conductors in Open Air

WFR

Waveform Recogniton

ZSI

Zone Selective Interlocking

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Justificativa	19
1.2	Objetivos.....	20
1.3	Metodologia	21
1.4	Estrutura do trabalho.....	22
2	ESTUDO SOBRE ARCO ELÉTRICO E ENERGIA INCIDENTE	23
2.1	O arco elétrico	23
2.2	Causas do arco elétrico.....	24
2.3	Características de um arco elétrico.....	24
2.3.1	<i>Fases do fenômeno do arco elétrico.....</i>	<i>26</i>
2.4	Energia incidente	26
2.5	Classificação do arco elétrico.....	27
2.5.1	<i>Arco ao ar livre.....</i>	<i>28</i>
2.5.2	<i>Arco em ambiente enclausurado.....</i>	<i>29</i>
2.5.3	<i>Arco em movimento.....</i>	<i>30</i>
2.5.4	<i>Arco ejetado.....</i>	<i>30</i>
2.5.5	<i>Arco rastreador.....</i>	<i>31</i>
2.6	Consequências de um arco elétrico	32
3	MÉTODOS DE CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE E ABORDAGENS NORMATIVAS SOBRE ARCO ELÉTRICO	36
3.1	Método de cálculo de Ralph H. Lee	36
3.2	Método proposto por Doughty-Neal	43
3.3	Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Std 1584: 2018	46
3.3.1	<i>Etapa 1: coleta de dados da instalação e do sistema.....</i>	<i>47</i>
3.3.2	<i>Etapa 2: determinar os modos de operação do sistema.....</i>	<i>47</i>
3.3.3	<i>Etapa 3: determinar a corrente de falta franca.....</i>	<i>48</i>
3.3.4	<i>Etapa 4: determinar a distância típica e tamanho do invólucro com base nas tensões do sistema e nas classes dos equipamentos.....</i>	<i>48</i>
3.3.5	<i>Etapa 5: determinar a configuração dos eletrodos do equipamento.....</i>	<i>49</i>
3.3.6	<i>Etapa 6: determinar a distância de trabalho.....</i>	<i>52</i>
3.3.7	<i>Etapa 7: determinar a corrente do arco elétrico.....</i>	<i>53</i>
3.3.7.1	<i>Cálculo da corrente de arco elétrico para tensões entre 600 V e 15000 V.....</i>	<i>53</i>

3.3.7.2	<i>Cálculo da corrente de arco elétrico para tensões entre 208 V e 600 V</i>	56
3.3.7.3	<i>Corrente de arco reduzida</i>	56
3.3.8	<i>Etapa 8: determinar a duração do arco elétrico</i>	57
3.3.9	<i>Etapa 9: calcular a energia incidente</i>	58
3.3.9.1	<i>Determinação do Fator de Correção do tamanho do invólucro</i>	58
3.3.9.2	<i>Determinação da energia incidente</i>	61
3.3.10	<i>Etapa 10: determinar o limite de aproximação segura</i>	64
3.4	National Fire Protection Association (NFPA) – 70E: 2021	67
3.4.1	<i>Risco de arco elétrico</i>	67
3.4.2	<i>Avaliação de risco de arco elétrico</i>	68
3.4.3	<i>Análise de energia incidente</i>	69
3.4.4	<i>Vestimentas de proteção e EPIs contra arco elétrico</i>	69
3.4.4.1	<i>Método da Análise de Energia Incidente</i>	70
3.4.4.2	<i>Método da Categoria de EPI para Arco Elétrico</i>	71
3.4.5	<i>Limites de aproximação</i>	74
3.4.6	<i>Limitações dos métodos de cálculo</i>	75
3.5	Norma Regulamentadora nº 10 Segurança em Instalações Elétricas e Serviços com Eletricidade	75
3.6	ABNT NBR 16384-2020: Segurança em eletricidade	77
3.6.1	<i>As recomendações da norma ABNT NBR 16384 com face ao arco elétrico</i>	77
4	MÉTODOS E DISPOSITIVOS PARA REDUÇÃO E PROTEÇÃO DO ARCO ELÉTRICO	80
4.1	Gerenciamento de risco	80
4.2	Redução dos níveis da corrente de curto-circuito	83
4.2.1	<i>Instalação de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito (DLCCs)</i>	84
4.2.1.1	<i>Reatores limitadores de curto-circuito</i>	84
4.2.1.2	<i>Dispositivos pirotécnicos</i>	85
4.2.1.3	<i>Protetor de limitação de corrente</i>	86
4.2.2	<i>Instalação de disjuntores de baixa tensão com WFR (Waveform Recogniton)</i>	87
4.3	Redução do tempo de eliminação do arco	88
4.3.1	<i>Estudo de seletividade cronológica</i>	88
4.3.2	<i>Instalação de relés diferenciais de barramento</i>	90
4.3.3	<i>Intertravamento seletivo de zona</i>	91
4.3.4	<i>Instalação de relés de proteção contra arco elétrico</i>	92

4.4	Painéis resistentes a arco elétrico	96
4.5	Vestimentas e equipamento de proteção individual (EPI) contra arco elétrico....	98
4.5.1	<i>Seleção de vestimentas e EPIs contra queimaduras causadas por arco elétrico</i>	<i>100</i>
5	ESTUDO DE CASO	106
5.1	Descrição da instalação industrial.....	108
5.2	Coleta de dados e determinação do modo de operação da indústria	110
5.3	Estudo de curto-circuito e dos tempos de atuação dos dispositivos de proteção	110
5.4	Determinando as características dos painéis, eletrodos e distância de trabalho	112
5.5	Cálculo das correntes de arco elétrico	114
5.5.1	<i>Calculando a corrente de arco dos cubículos blindados de 6,9 kV</i>	<i>114</i>
5.5.2	<i>Calculando a corrente de arco dos painéis elétricos de 480 V</i>	<i>116</i>
5.6	Cálculo da energia incidente.....	116
5.6.1	<i>Calculando o fator de correção para o tamanho do invólucro</i>	<i>117</i>
5.6.2	<i>Calculando a energia incidente dos cubículos blindados de 6,9 kV.....</i>	<i>118</i>
5.6.3	<i>Calculando a energia incidente dos painéis elétricos de 480 V</i>	<i>119</i>
5.7	Determinando o limite de aproximação segura	120
5.7.1	<i>Calculando o limite de aproximação segura dos cubículos blindados de 6,9 kV</i>	<i>120</i>
5.7.2	<i>Calculando o limite de aproximação segura dos painéis elétricos de 480 V</i>	<i>121</i>
5.8	Determinação das vestimentas retardantes a chama e EPIs resistentes a arco ..	122
5.9	Elaboração das placas de sinalização.....	124
5.10	Análise dos resultados obtidos e propostas de mitigação.....	124
5.11	Análise e comparação dos resultados.....	128
6	CONCLUSÃO	130
	REFERÊNCIAS	133
	APÊNDICE A – Elaboração das placas de sinalização.....	138
	ANEXO A – Estudo de curto-circuito	140
	ANEXO B – Estudo de seletividade	141

1 INTRODUÇÃO

O arco elétrico, geralmente chamado de arco voltaico ou *arc flash*, é um fenômeno da eletricidade que ocorre quando a corrente elétrica se propaga em um meio isolante, como o ar, rompe o dielétrico, produz uma descarga de plasma e causa grande destruição (MARDEGAN, 2012). Ele acontece de maneira inesperada e indesejada, após falhas dentro do Sistema Elétrico de Potência (SEP), como um curto-circuito, ou através de um chaveamento, durante atividades com circuitos elétricos energizados, defeitos na instalação elétrica, ou intervenções de animais, independentemente do nível de tensão.

O risco associado ao arco elétrico é muito grave, pois esse fenômeno provoca diversas consequências, como energia térmica com calor intenso, liberação de partículas de metais fundidos que podem conduzir corrente de arco, pressão sonora elevada, estilhaços, ar quente, e luminosidade intensa, pode causar queimaduras e sequelas irreversíveis ou morte, explosões, danos materiais, parada de processo produtivo, entre outros. Por causa dos efeitos devastadores do arco elétrico às pessoas e aos equipamentos, foram estabelecidos textos normativos que abordam sobre o risco de arco elétrico em atividades com eletricidade.

Nos Estados Unidos, por exemplo, as principais normas são a IEEE 1584 (2018) “*Guide for performing arc-flash hazard calculations*” (Guia para realizar cálculos de risco de arco elétrico – tradução nossa), que apresenta um método de cálculo de energia incidente, e a NFPA 70E (2021) “*Standard for Electrical Safety in the Workplace*” (Norma para Segurança Elétrica no Local de Trabalho – tradução nossa), que estabelece práticas de segurança para proteger os trabalhadores da área de eletricidade e recomenda vestimentas retardantes a chama e Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) resistentes a arco elétrico adequados.

No Brasil, as normas que abordam sobre segurança em eletricidade são a NR-10 (BRASIL, 2019) “Segurança em Instalações Elétricas e Serviços com Eletricidade”, que obriga na prevenção de acidentes e aborda a segurança e saúde dos trabalhadores de eletricidade, e que, em 2020, foi apresentada uma consulta pública da nova edição da norma, no qual o assunto sobre arco elétrico é bastante tratado, e a ABNT NBR 16384 (ABNT, 2020), “ABNT NBR 16384: 2020 Segurança em eletricidade; Recomendações e orientações para trabalho seguro em serviços com eletricidade”, que fornece orientações para segurança em eletricidade. Entretanto, ainda não há uma norma brasileira para cálculo de energia incidente para todos os cenários elétricos existentes.

Neste contexto, de acordo com Pereira (2020), diversas empresas, indústrias e concessionárias, quando se referem ao risco de arco elétrico, limitam-se somente ao uso das

vestimentas e EPIs resistentes ao arco. Além disso, alguns não realizam os cálculos de energia incidente, ou calculam de forma errônea, utilizando métodos de cálculo inadequados ou desatualizados, implicando na utilização de EPIs com categoria de energia incidente inadequada em diversos cenários elétricos existentes, podendo arriscar a segurança dos trabalhadores.

Apesar do grande número de acidentes causados pela exposição ao arco elétrico e da sua gravidade, e do crescente contingente de estudos sobre esse tema, ainda há negligência com relação ao arco voltaico comparado com o risco de choque elétrico, como a deficiência de investimentos em treinamentos específicos, em equipamentos para reduzir o nível de energia incidente, também o uso inadequado de equipamento de proteção individual contra os efeitos do arco elétrico, e a carência de análise dos níveis de energia incidente nas instalações elétricas (MARDEGAN; PARISE, 2018a).

Ademais, algumas organizações não adotam medidas de gestão de risco para exposição ao arco, como o estudo dos níveis de energia incidente, quando aplicável, focando mais nas medidas preventivas contra o risco de choque elétrico, negligenciando na segurança dos trabalhadores que são expostos diretamente ao risco de arco voltaico, em atividades laborais em eletricidade, que podem sofrer acidentes provocados por esse risco (PEREIRA, 2020).

Com base no exposto, delimita-se a pergunta-problema do trabalho: como a implantação de um sistema de gestão de riscos de arco elétrico bem executado – avaliar o risco de arco elétrico por meio do estudo de energia incidente e implementar medidas de controle para auxiliar na mitigação do risco – pode influenciar positivamente na segurança dos profissionais relacionada a acidentes de arco voltaico?

Toma-se como hipótese para essa pergunta que a implantação de um sistema de gestão de riscos de arco elétrico é importante para a saúde e segurança dos trabalhadores, para evitar e reduzir os acidentes provocados por esse fenômeno, pois esses incidentes causam um grande prejuízo para a empresa, tanto em tratamento hospitalar das possíveis vítimas, quanto em manutenção e substituição de equipamentos danificados, além do risco à saúde e à vida.

1.1 Justificativa

O fundamento da indústria na segurança elétrica e no reconhecimento de queimaduras de arco voltaico, destacou a necessidade de proteger os trabalhadores dos perigos provenientes desse fenômeno. Mesmo com as medidas de segurança em vigor, segundo G&W Eletric (2019a), estudos recentes sobre estatísticas de arco elétrico nos Estados Unidos, apontam que aproximadamente 30.000 incidentes com arco voltaico acontecem todos os anos, resultando

em 7.000 queimaduras, 2.000 hospitalizações e 400 mortes. Além disso, 80% das mortes de trabalhadores da área elétrica são causadas por queimaduras, não por choque elétrico, o que demonstra que a exposição ao risco do arco elétrico apresenta consequências devastadoras, principalmente ao ser humano.

Nesse contexto, além dos efeitos devastadores causados à saúde e à vida das pessoas, os danos por arco voltaico também podem criar um desastre econômico, envolvendo despesas médicas para um funcionário que sobrevive a uma explosão de um arco elétrico, reparos ou substituição dos equipamentos que sofreram danos, além de possíveis paradas de produção de uma indústria após um acidente, o que pode gerar prejuízos.

Além disso, segundo Mardegan e Parise (2018b), 65% dos acidentes com arco elétrico ocorrem quando os operadores estão realizando trabalho no painel energizado; 10% dos acidentes ocorrem quando o operador está em frente a um painel energizado, mas com a porta fechada, e acontece um curto-circuito devido a alguma falha no sistema, provocando um arco e atingido esse trabalhador; e 25% dos acidentes com arco voltaico ocorrem sem a presença de operador, ou seja, quando há um funcionamento normal do painel elétrico e acontece um arco elétrico. De acordo com essas estatísticas, 75% dos acidentes com arco elétrico acontecem com a presença de pessoas ou quando estão fazendo manutenção, perto dos barramentos energizados, ou quando estão em frente ao painel.

Desta forma, o presente estudo se justifica pela necessidade de discutir, difundir e estudar profundamente sobre as causas, as consequências, os tipos e os riscos envolvendo o arco elétrico, também de analisar os principais métodos de cálculo para calcular o nível da energia incidente, conhecer as metodologias e desenvolver procedimentos para proteger, reduzir e eliminar os níveis de energia incidente e mitigar os acidentes provocados por arco elétrico, em busca da melhoria contínua em segurança das pessoas no setor elétrico e evitando prejuízos nas empresas e gastos em despesas médicas das vítimas sobreviventes.

1.2 Objetivos

O Objetivo Geral do presente trabalho é analisar a energia incidente causada por arco elétrico em uma instalação industrial, recomendar propostas para mitigação do nível de energia incidente e determinar as vestimentas retardantes a chama e equipamentos de proteção individual resistentes a arco.

Os Objetivos Específicos desse trabalho são:

- Realizar revisão bibliográfica sobre o tema do arco elétrico;

- Realizar um estudo de caso em uma unidade industrial do Ceará, conforme as normas IEEE 1584: 2018, NFPA 70E: 2021, e ABNT NBR 16384: 2020;
- Determinar os níveis de energia incidente, o limite de aproximação segura e as especificações das vestimentas retardantes a chama e dos equipamentos de proteção individual resistentes a arco adequados;
- Propor recomendações para redução dos níveis de energia incidente;
- Realizar um novo estudo de caso, utilizando uma das recomendações propostas;
- Fazer uma comparação dos resultados obtidos do sistema atual com a proposta recomendada, para comprovar sua eficácia e eficiência.

1.3 Metodologia

O presente trabalho é caracterizado por uma pesquisa de tipologia qualitativa, cujo objetivo, segundo Reis (2008, p. 57), é “interpretar e dar significados aos fenômenos analisados”. Além disso, é classificado como aplicada, que, conforme Cooper e Schindler (2001, p. 32), tem seu uso dirigido à avaliação de oportunidades, solucionar problemas e providenciar um cenário favorável à tomada de decisões gerenciais imediatas. Ou seja, não tem cunho executivo, não visa, no tempo do curso do próprio estudo, à modificação da realidade, apenas propõe possíveis soluções. Também se enquadra em estudo de caso, caracterizado por ser uma técnica que consiste em selecionar um objeto a ser estudado (Reis, 2008), no caso, o foco do estudo é uma instalação industrial.

No presente trabalho, utilizaram-se três instrumentos de coleta: pesquisa bibliográfica, que proporcionou base para a Fundamentação Teórica, pesquisa documental – documentos que a indústria forneceu – e observação natural, realizada visitas aos ambientes da indústria para coleta de dados, como registros fotográficos, entre março e abril de 2021.

Para a realização dos procedimentos de estudo de caso, foram utilizadas as normas IEEE 1584 (2018), com o objetivo de calcular a energia incidente e limite de aproximação segura, e a NFPA 70E (2021), para determinar a categoria do EPI.

Foi desenvolvida uma planilha de cálculo no software Excel, exclusiva para esse sistema, utilizando os parâmetros específicos e equações para cada tipo de painel presente na indústria em estudo, de acordo com as normas IEEE 1584 (2018) e NFPA 70E (2021). Foi utilizado um diagrama unifilar atualizado, contendo todos os equipamentos da indústria, como os barramentos, transformadores, motores, entre outros. Além disso, foram utilizados os valores

das correntes de curto-circuito trifásico e dos tempos de atuação dos dispositivos de proteção, a partir de documentos atualizados, fornecidos pela unidade industrial. A partir do registro fotográfico dos equipamentos dessa indústria, foram avaliadas as características fundamentais dos painéis elétricos, de acordo com a norma IEEE 1584 (2018).

A partir dessas informações coletadas e fornecidas pela unidade industrial, foi possível realizar o estudo de caso completo, avaliar e explicar os principais resultados, além de recomendar aos responsáveis dessa indústria soluções técnicas para mitigar os níveis de energia incidente elevados.

1.4 Estrutura do trabalho

A estrutura do trabalho é dividida nos seguintes capítulos:

No Capítulo 2, é apresentado o estudo sobre o arco elétrico, mostrando os conceitos, suas causas, suas características, as classificações, as consequências e sobre a energia incidente.

O Capítulo 3 trata dos métodos de cálculo de energia incidente propostos por Ralph Lee e por Douthy-Neal, além de apresentar a última versão da norma IEEE 1584, de 2018, com seu método de cálculo, bem como as normas NFPA 70E, de 2021, com foco na prática de segurança e proteção dos trabalhadores dos riscos do arco elétrico, ABNT NBR 16384, de 2020, com as recomendações de segurança contra os efeitos do arco voltaico, e a NR-10, com a sua última atualização de 2019, tratando sobre alguns pontos de proteção dos trabalhadores em atividades envolvendo arco elétrico.

No Capítulo 4, são apresentados alguns métodos e dispositivos para mitigar a energia incidente e proteger contra seus efeitos, além de abordar sobre a importância do gerenciamento de risco de arco elétrico para a segurança e saúde dos trabalhadores.

No Capítulo 5, é apresentado um estudo de caso em uma instalação industrial, aplicando a metodologia de cálculo da norma IEEE 1584 (2018), para determinar os níveis de energia incidente. Também são mostradas as especificações das vestimentas retardantes a chama e EPIs contra arco elétrico, de acordo com a norma NFPA 70E (2021). Além disso, são discutidas algumas soluções para reduzir os níveis de energia incidente, selecionando uma proposta de mitigação e realizando uma análise e comparação dos resultados.

Por fim, no Capítulo 6, é apresentada a conclusão do trabalho, mostrando as considerações finais, as melhorias proporcionadas pela realização do estudo de caso e propostas de continuidade do trabalho.

2 ESTUDO SOBRE ARCO ELÉTRICO E ENERGIA INCIDENTE

Neste capítulo, são apresentados os conceitos do fenômeno do arco elétrico e da energia incidente, suas causas, os fatores que afetam no nível do arco elétrico, suas classificações e suas consequências.

2.1 O arco elétrico

Para Mardegan e Parise (2018b), o arco elétrico é uma descarga que pode surgir quando acontecer uma falha de isolamento em um ponto energizado, rompendo o seu dielétrico, com referencial à terra, ou à massa, ou entre dois potenciais diferentes. Também apresenta o arco elétrico como sendo um fluxo de descarga entre dois eletrodos através de um meio isolante, como o gás ou vapor.

Um arco elétrico, ou arco voltaico, é o fluxo de corrente elétrica através do ar, de um condutor para outro, ou para a terra. Também é um fenômeno que ocorre quando há separação de dois terminais de um circuito, como um chaveamento, que é a interrupção de corrente de carga, sobrecarga ou defeito. Os arcos são geralmente iniciados por uma descarga causada por algum tipo de condutor que depois vaporiza, formando um arco (PIERRE *et al.*, 2015).

Segundo Lee (1982), o arco elétrico é causado devido a um curto-circuito que se desenvolve a partir de falha de isolamento ou mal contato elétrico. Este fenômeno é considerado cerca de quatro vezes mais quente que a superfície do sol. As queimaduras provocadas pelo arco elétrico podem ser fatais, dependendo da distância. Além disso, o tipo de roupa que a pessoa utiliza quando ocorre esse fato poderá piorar a gravidade das queimaduras no corpo.

Para Queiroz e Senger (2012a), um arco elétrico, que acontece normalmente em sistema trifásico, é definido como a passagem de corrente elétrica desordenada em um material não condutivo, como o ar, em alta velocidade, cerca de 100 m/s. Essa desordem é causada pela convecção, criando forças eletromagnéticas e movimentando os jatos de plasma, que alimentam nuvem de plasma, que é conduzida para fora, originando uma poeira de plasma.

De acordo com Mardegan e Parise (2018b), durante o fenômeno do arco elétrico, acontece transferência de calor proveniente do curto-circuito, entre fases e fase-terra, liberando uma elevada energia que provoca diversas consequências, como metal fundido, rápida expansão de ar quente, ondas sonoras, ondas de pressão, luz ultravioleta entre outros.

2.2 Causas do arco elétrico

Para Mardegan e Parise (2018b), alguns dos principais fatores que podem causar o arco elétrico, havendo redução da tensão de ruptura do ar e provocando curto-circuito, são: mau contato; sobrecarga; umidade; corrosão da isolação; poeiras; aproximação e queda de objetos; sobretensões de regime transitórias; erros humanos, como contatos acidentais com partes energizadas expostas; perfuração da isolação; abertura de disjuntores sem o meio de extinção; utilização inadequada de equipamentos; procedimentos de trabalho inadequados.

No caso de corrosão em peças de equipamento, pode enfraquecer o contato entre os terminais do condutor, aumentando a resistência do contato por meio da oxidação ou outra contaminação corrosiva. O calor é gerado nos contatos e faíscas podem ser produzidas (PIERRE *et al.*, 2015).

Diversas atividades podem provocar o curto-circuito e elevar a energia incidente, como por exemplo: trabalho em circuitos de potência energizados com tensão superior a 120 V; operação de contatores, disjuntores, chaves seccionadoras, gavetas e chaves-fusíveis com a porta do painel aberta; remoção de coberturas aparafusadas que exponham partes energizadas; abertura de coberturas com dobradiças que exponham barramentos ou partes energizadas (QUEIROZ; SENGER, 2012a).

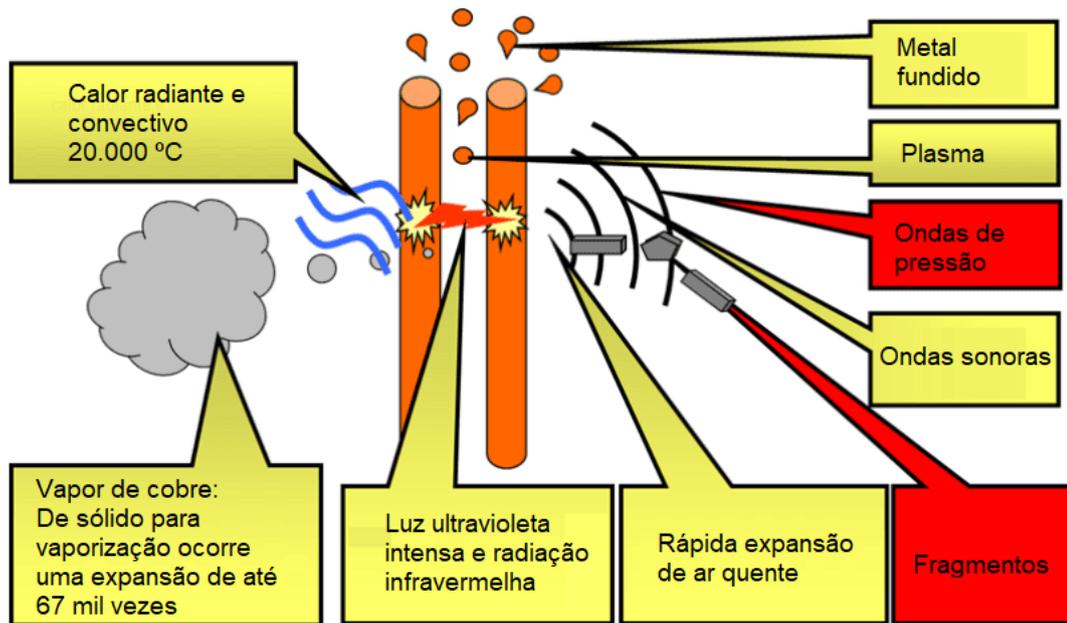
Em geral, a origem de um arco elétrico está relacionada a falhas de isolação, à corrente de curto-circuito, normalmente iniciada por curto monofásico e transformando rapidamente em curto trifásico e ao chaveamento em sistemas elétricos (QUEIROZ; SENGER, 2012a; MARDEGAN; PARISE, 2018b). Muitos fatores podem afetar a quantidade de energia térmica dissipada, como o tipo de arco, a corrente de falha, a duração do arco e a distância de um arco (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).

Ressalta-se que, diversos fatores que provocam o arco elétrico citados anteriormente não dependem da ação do operador exposto a esse risco. Ou seja, para garantir a integridade física do trabalhador, são necessárias medidas de controle de risco para diminuir os efeitos do arco elétrico e a utilização de equipamento de proteção individual adequado (ALMEIDA; GOECKING, 2009).

2.3 Características de um arco elétrico

Na Figura 1 são apresentados os efeitos e as características de um arco elétrico.

Figura 1 – Ilustração de um arco elétrico.



Fonte: adaptado de Electrical Safety (UK) (2021).

As principais características do arco elétrico são, segundo Mardegan e Parise (2018b): é não senoidal; atinge elevadas temperaturas de 10.000 °C a 20.000 °C; atinge o 4º estado da matéria, o plasma; abaixo de 150 V praticamente se auto extingue; em média, a tensão de arco atinge de 500 V a 1.000 V; a potência máxima instantânea pode chegar a 40 MW; tem características resistivas; a luminosidade do arco pode chegar a 2.000 vezes a luminosidade de uma lâmpada incandescente; a energia do arco se propaga no meio de maneira tridimensional.

Os principais efeitos do arco elétrico são: a temperatura é elevadíssima, provocando derretimento e queima de materiais; como a temperatura aumenta rapidamente, há uma grande expansão do ar e aumento da pressão, provocando um grande impacto; criação de vapores e gases contaminantes devido ao derretimento dos materiais; emissão de resíduos, em forma de partículas; há um grande efeito da luminosidade; ocorre um estampido, com uma magnitude de mais de 140 dB, devido ao rompimento do dielétrico (MARDEGAN; PARISE, 2018b).

O arco elétrico, ao iniciar, transforma-se em um fluxo de corrente que flui através dos vapores de plasma ionizados. Essa corrente de arco elétrico cria forças magnéticas, provocando uma poeira de plasma, consumindo os materiais do local. Esse vapor apresenta uma impedância maior do que um metal puro, provocando uma queda de tensão muito maior do que em um condutor sólido, além disso, a corrente de arco é menor do que corrente de curto-circuito (QUEIROZ; SENGER, 2012a).

2.3.1 Fases do fenômeno do arco elétrico

Segundo Queiroz, Senger e Moraes (2012), o fenômeno do arco elétrico é dividido em quatro fases: compressão, expansão, emissão e fase térmica.

A fase da compressão é iniciada quando houver a abertura do arco. O ar dentro do local é aquecido conforme o nível de energia liberada pelo arco, havendo aumento de pressão, a partir da corrente de curto-circuito e do comprimento do arco. O tempo de duração dessa fase varia de acordo com a energia do arco e do volume acumulado do ar (QUEIROZ; SENGER; MORAES, 2012).

Na fase da expansão, a pressão atinge seu máximo. O ar que estava comprimido começa a se expandir, a pressão reduz e a temperatura aumenta. Essa fase termina quando a pressão interna reduz para o valor inicial antes do início do arco (QUEIROZ; SENGER; MORAES, 2012).

Na terceira fase, a da emissão, há o aquecimento do ar que sobrou do interior do local, sendo expelido para longe, porém, com menor pressão comparado com as fases anteriores. A fase acaba quando a temperatura do ar alcança a do arco (QUEIROZ; SENGER; MORAES, 2012).

A última fase, a térmica, dura até a extinção do arco, ou seja, até a abertura de um dispositivo de proteção que interrompe a corrente de curto-circuito. A temperatura fica constante. A energia do arco vai para as partes do interior do local, provocando derretimento e vaporização dos componentes (QUEIROZ; SENGER; MORAES, 2012).

2.4 Energia incidente

A energia incidente, segundo as normas NFPA 70E (2021) e IEEE 1584 (2018), é a quantidade de energia térmica impressa em uma superfície, a uma certa distância da fonte, gerada durante um evento de arco elétrico.

A norma IEEE 1584 (2018) utiliza uma metodologia de cálculo para obter os níveis de energia incidente em algum ponto do sistema elétrico, com o objetivo de analisar melhor a situação de risco provocada por arco elétrico, e, assim, avaliar possíveis métodos para reduzir os níveis e proteger adequadamente os trabalhadores e o local de trabalho.

A energia incidente é expressa em calorias por centímetro quadrado (cal/cm^2) e em joules por centímetro quadrado (J/cm^2). Esse valor é utilizado na indústria para quantificar a gravidade do risco térmico do arco elétrico. Também serve para selecionar vestimentas

retardantes a chama e equipamento de proteção individual (EPI) resistentes a arco adequados (NFPA 70E, 2021).

De fato, para uma exposição de arco elétrico, com nível de energia incidente de até $1,2 \text{ cal/cm}^2$ (5 J/cm^2), a pele humana apresenta limite suportável de sobrevivência com queimadura de 2º grau. Acima desse valor, é necessária a adoção de medidas de redução do nível de energia irradiada no sistema, ou utilização de vestimentas de proteção, para atenuar os efeitos térmicos na pele humana (NFPA 70E, 2021).

2.5 Classificação do arco elétrico

A classificação do tipo de arco é baseada em vários fatores de diferenciação: geometria do eletrodo e comprimento da lacuna do arco; tensão nominal da instalação elétrica; forma de abertura de plasma de arco; arco no invólucro ou ao ar livre; dissipação de calor predominante radiante ou convectiva; arco estacionário ou em movimento; e contato com partes energizadas ou descarga de tensão (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).

O Quadro 1 resume os atributos do arco elétrico:

Quadro 1 – Classificação do tipo de arco elétrico.

Fatores	Arco ao ar livre	Arco em ambiente enclausurado	Arco em movimento	Arco ejetado	Arco rastreador
<i>Geometria do eletrodo e comprimento da lacuna do arco</i>	Linear	Linear ou paralela	Eletrodos paralelos longos	Eletrodos paralelos longos	Qualquer configuração de eletrodo
<i>Tensão nominal</i>	Média e Alta tensão	Baixa tensão	Média e Alta tensão	Média e Alta tensão	Média e Alta tensão
<i>Forma de abertura de plasma de arco</i>	Coluna cilíndrica	Coluna cilíndrica	Coluna cilíndrica	Coluna cilíndrica	Circular dependente de circunstâncias
<i>Invólucro</i>	Sem enclausuramento	Arco enclausurado	Sem enclausuramento	Sem enclausuramento	Sem enclausuramento
<i>Dissipação de calor radiante ou convectiva</i>	Predominantemente radiante	Mais convectivo do que radiante	Predominantemente radiante	Mais radiante do que convectivo	Cerne de corrente fluindo
<i>Estacionário ou em movimento</i>	Estacionário	Estacionário	Em movimento	Estacionário	Estacionário
<i>Contato com partes energizadas</i>	Sem contato	Sem contato	Sem contato	Sem contato	Contato e descarga

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

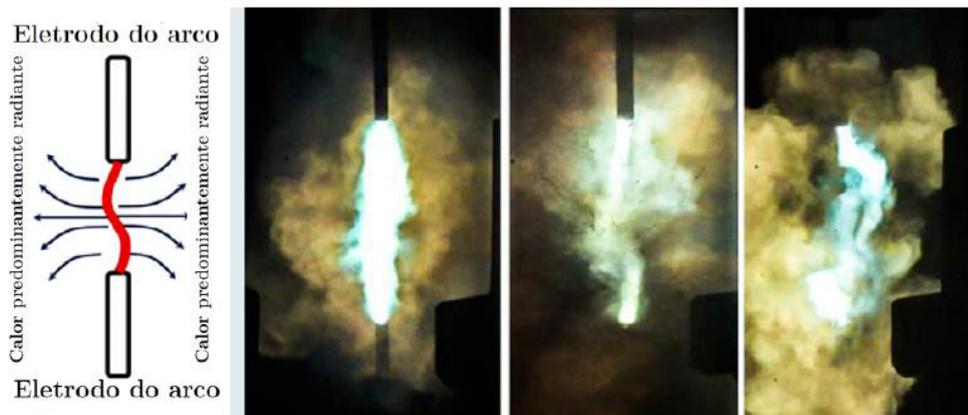
Segundo Golovkov, Schau e Burdge (2017), nem todos os arcos elétricos em equipamentos elétricos em redes de transmissão e distribuição industriais e de utilidades são iguais. As diferenças na configuração e no comportamento do arco determinam a forma como a energia térmica é distribuída.

De acordo com o Quadro 1, existem cinco tipos de arco elétrico: arco ao ar livre; arco em ambiente enclausurado; arco em movimento; arco ejetado e arco rastreador.

2.5.1 Arco ao ar livre

Conforme Golovkov, Schau e Burdge (2017), o arco elétrico ao ar livre é um arco que acontece em sistemas de média ou alta tensão, que queima ao ar livre sem nenhum invólucro ao seu redor. A geometria do eletrodo é linear ao ar livre, não provoca interação eletromagnética entre a corrente que flui nos eletrodos e a corrente no canal de plasma do arco elétrico, o que obrigaria o canal de plasma a ir para fora e para longe da lacuna do arco. As forças eletromagnéticas apenas causam a rotação dos jatos de arco na área do eletrodo, conforme Figura 2.

Figura 2 – Exemplos de Configuração de eletrodo de arco aberto.



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

Um arco ao ar livre é estável e durará até que um dispositivo de proteção remova a falha. A forma do canal de plasma pode ser descrita como um cilindro. A energia térmica é dissipada igualmente em todas as direções, predominantemente por meio da luz irradiada (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).

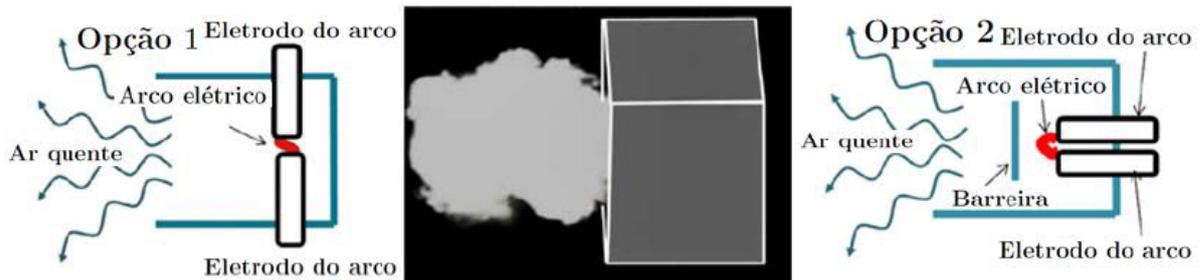
De acordo com Golovkov, Schau e Burdge (2017), um arco ao ar livre pode iniciar como resultado de: descarga da bucha no transformador de alta e média tensão (potência e

instrumento) ou disjuntor; descarga de um suporte e isoladores de suspensão de linhas de transmissão; descarga no barramento da subestação.

2.5.2 Arco em ambiente enclausurado

O arco em ambiente enclausurado acontece em sistema de baixa tensão quando o arco elétrico ocorre em um invólucro. A energia térmica é dissipada, embora apenas um lado esteja aberto para a tarefa executada. Os eletrodos de arco podem ser alinhados ou em paralelos com um pequeno espaço, conforme Figura 3. Um canal de plasma de arco não é visível, pois o plasma de arco está completamente dentro do invólucro e apenas a exaustão de ar extremamente quente por um lado aberto pode ser vista (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).

Figura 3 – Eletrodo do arco dentro de uma configuração fechada e exemplo de descarga.



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

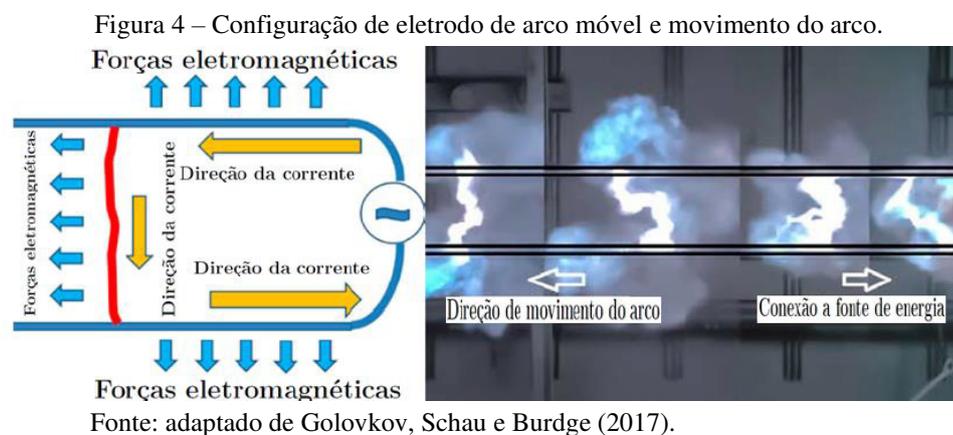
O arco em um invólucro é um arco estável. A energia térmica é dissipada através da luz irradiada e, sobretudo, como o calor convectivo de ar é muito quente, o ar quente emitido da caixa é concentrado em uma direção por meio da porta que está aberta ou quebrada (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).

O arco em um invólucro pode ocorrer nos seguintes tipos de equipamentos elétricos: painéis; centro de controle de motores; dispositivos de controle; desconexão por fusível; comutador e medidores elétricos. E pode iniciar como resultado da ruptura ou mau funcionamento do equipamento durante as operações de fechamento ou abertura, ou ações humanas não intencionais, como quedas de ferramentas em gabinetes (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).

A configuração do arco em um invólucro é o tipo mais comum em ambientes industriais. A maioria dos equipamentos elétricos de baixa tensão está contida em gabinetes, painéis ou outros tipos de estruturas elétricas (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).

2.5.3 Arco em movimento

O arco em movimento ocorre em sistema de média ou alta tensão em ambiente aberto, propagando-se entre dois condutores longos em paralelos. A corrente do arco que flui através do canal de plasma ionizado interage eletromagneticamente com as correntes de curto-circuito que fluem nos condutores. Como resultado, o canal de plasma é forçado a se mover ao longo dos condutores na direção oposta à fonte de energia, como em subestações, conforme Figura 4 (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).



Os arcos elétricos em movimento podem ser iniciados como uma descarga ou quebra de isolamento em linhas aéreas de média e alta tensão ou barramentos de subestação. O canal de plasma do arco em movimento geralmente está contido dentro da lacuna do arco entre os condutores paralelos, mas o plasma do arco não é estacionário. A dissipação da energia térmica é igual em todas as direções e a luz irradiada é semelhante ao arco ao ar livre, exceto que a fonte de luz irradiada está em movimento (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).

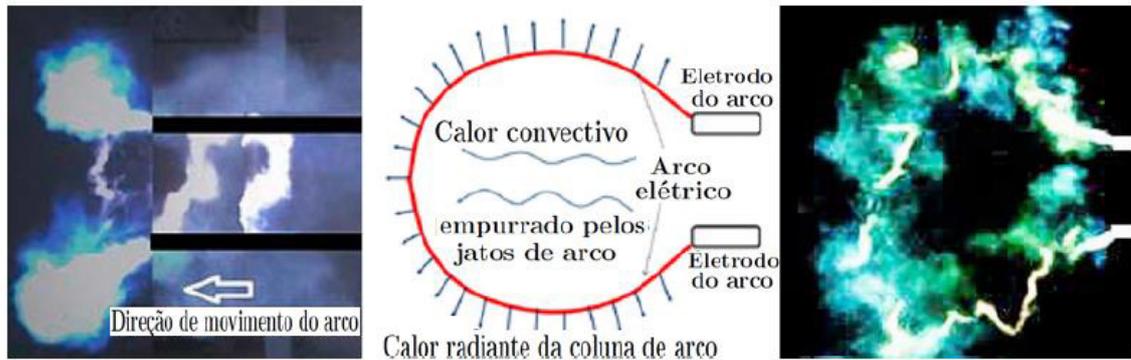
A velocidade do arco em movimento depende da magnitude da corrente de falta e pode exceder 160 km/h. Essa alta velocidade reduz o tempo de exposição potencial do arco quando um trabalhador está do lado da linha. Este tipo de exposição é muito mais perigoso devido ao contato direto com um canal de plasma que possui temperatura de 5.000 °C ou mais (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).

2.5.4 Arco ejetado

Arco ejetado normalmente acontece em sistema de média ou alta tensão formado nas pontas de condutores ou eletrodos em paralelos. A corrente de arco ejetada flui através do

canal de plasma ionizado e interage eletromagneticamente com as correntes de falta que fluem nos condutores. Como resultado, o canal de plasma do arco é forçado para fora do espaço entre os condutores; o canal é alongado e muda sua forma de uma coluna para quase um círculo, conforme Figura 5 (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).

Figura 5 – Configuração de eletrodo de arco ejetado e exemplos.



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

Conforme Golovkov, Schau e Burdge (2017), o alongamento do arco ejetado e a dissipação de energia térmica correspondente são geralmente direcionais. O arco ejetado é alongado na direção de uma continuação imaginária de eletrodos de arco paralelos.

O componente de energia radiante do canal de plasma e o componente de calor convectivo fortalecido pelos jatos de arco das pontas dos eletrodos são intensos. O componente condutor de calor provavelmente se tornará considerável porque o alongamento do canal do arco fornece temperaturas extremas de 5.000 °C nas proximidades ou em contato direto com a roupa de um trabalhador e outro EPI (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).

Apesar do arco ejetado não seja a configuração mais comum, é o tipo de arco mais perigoso, pois uma grande extensão do corpo humano estará sujeita a altas temperaturas provocadas pelo arco (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).

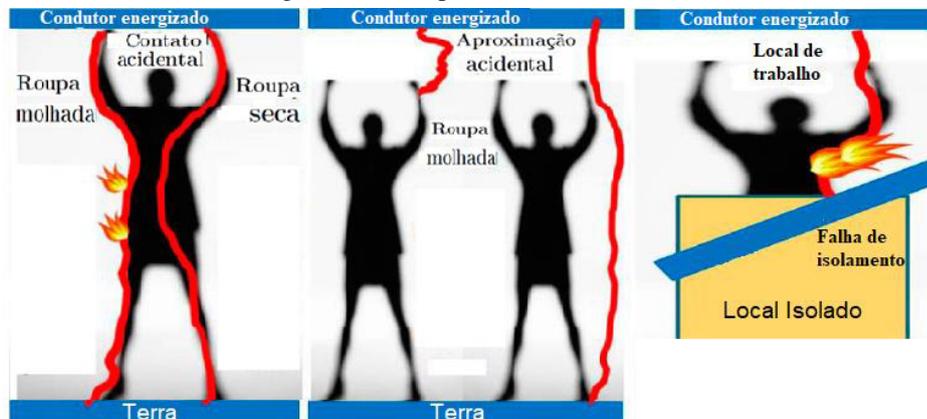
2.5.5 Arco rastreador

O arco rastreador pode ocorrer na superfície da pele de um operador, sob a roupa, após uma aproximação, um contato direto ou indireto com a parte energizada, como exemplificado na Figura 6. O evento de arco de rastreamento representa um risco duplo de eletrocussão e ignição de roupas que não sejam retardantes a chama. Vale salientar que as roupas retardantes a chama não oferecem proteção contra o fluxo de calor gerado pelo arco de

rastreamento, mas limita a extensão do dano, evitando a ignição (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).

Em contato direto acidental, poderá ocorrer o arco quando há toque com o condutor energizado. Quando a roupa estiver molhada e não for retardante a chama, ou a camada de baixo do trabalhador estão molhadas de suor ou chuva, poderá, acidentalmente, fazer a ligação à terra, causando descarga e a corrente de falta flui através da roupa molhada, causando ignição. Quando a roupa estiver seca e não for retardante a chama, a corrente de falta flui através do corpo, causando choque elétrico (GOLOVKOV; SCHAU; BURDGE, 2017).

Figura 6 – Exemplos de arco rastreador.



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

Golovkov, Schau e Burdge (2017) afirmam que quando ocorre aproximação de um condutor energizado a uma curta distância poderá causar descarga. A corrente elétrica atravessa o ar, gerando o arco elétrico, que flui para o corpo do trabalhador, onde causará a ignição de roupas que não sejam retardantes a chama. Esse evento iniciado como uma descarga ou como um arco permanecerá como um arco elétrico pelo ar ionizado.

2.6 Consequências de um arco elétrico

As faltas por arco elétrico criam muitos perigos, mas o maior risco são as queimaduras devido à exposição ao calor gerado pelo arco. Este calor pode causar queimaduras graves, até mesmo fatais, bem como inflamar roupas, outros materiais e objetos próximos. Além disso, os arcos elétricos podem produzir gotículas de metal fundido, radiação UV e ondas de pressão de ar explosivas (PIERRE *et al.*, 2015).

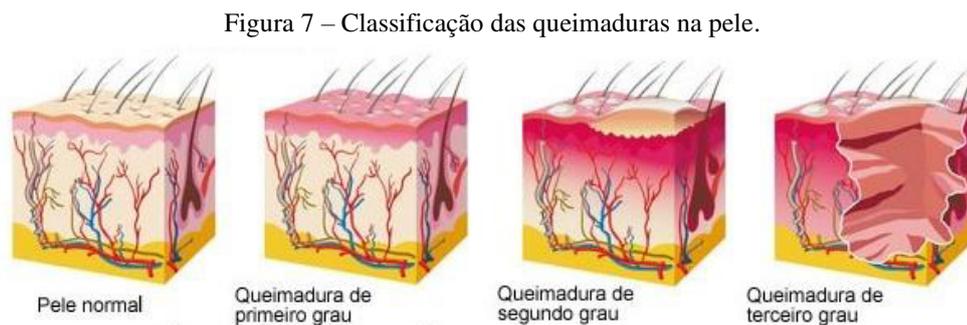
Para Mardegan e Parise (2018b), o fenômeno do arco elétrico apresenta diversas consequências: relacionadas aos danos pessoais, como possibilidade de óbito, queimaduras de

segundo e terceiro grau, perdas de membros, principalmente nas mãos, braços e face, intoxicação, devido aos gases tóxicos. Aos danos materiais em equipamentos e estruturas, além de perdas de mão de obra para manutenção, perda de produção. Portanto, deve-se prevenir para mitigar a origem do arco elétrico.

Dependendo da duração do arco elétrico, os danos podem variar. Para o tempo de até 35 ms, os danos às pessoas e equipamentos são irrelevantes. Para tempo de até 100 ms, há pequenos reparos, não causando danos sérios. Até 500 ms, poderá haver ferimentos sérios às pessoas e danos aos equipamentos (MARDEGAN; PARISE, 2018b).

Um dos maiores riscos da exposição ao arco elétrico para as pessoas são as queimaduras, principalmente de terceiro grau, pois, dependendo da magnitude da temperatura, haverá morte rapidamente das células e poderá haver o óbito (QUEIROZ; SENGER, 2012a).

Na Figura 7, são apresentadas as classificações das queimaduras na pele.



Fonte: Pinho (2010).

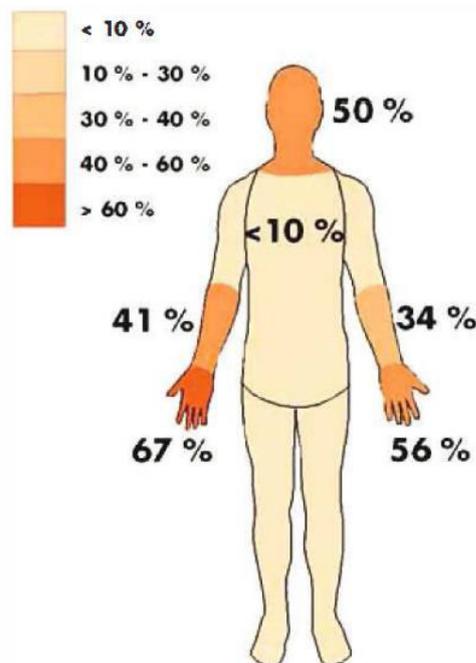
As queimaduras são lesões ocasionadas a partir de uma ação térmica direta ou indireta de uma fonte de calor excessivo ao corpo humano, danificando os tecidos e causando morte das células. Elas são divididas em três classes, quanto à sua profundidade (BRASIL, 2012):

- Primeiro grau (espessura superficial): compromete apenas a epiderme; sem formação de bolhas; apresenta vermelhidão, dor, edema e descama em 4 a 6 dias, não forma cicatrizes;
- Segundo grau (espessura parcial-superficial e profunda): compromete a epiderme e parte da derme, forma bolhas ou flictenas. Há regeneração espontânea. Quando superficial, a base da bolha é rósea, úmida e dolorosa, deixando sequelas discromia. Quando profunda, a base da bolha é branca, seca, indolor e menos dolorosa (profunda), pode deixar sequelas de cicatriz. A restauração das lesões ocorre entre 7 e 21 dias;

- Terceiro grau (espessura total): Afeta a epiderme, a derme e estruturas profundas. É indolor. Existe a presença de placa esbranquiçada ou enegrecida. Possui textura coriácea. Não há regeneração espontânea e necessita de enxertia de pele.

Hoagland (2012) apresentou um estudo sobre a frequência de queimaduras causada por acidentes graves com arco elétrico, feito pela organização *International Social Security Association* (ISSA), em 1998. Esse estudo mostrou que as distribuições das lesões térmicas foram, na maioria, nas mãos, braços e cabeça, conforme Figura 8.

Figura 8 – Distribuição de queimaduras em vítimas de acidente por arco elétrico.



Fonte: Hoagland (2012).

Ao analisar a distribuição das porcentagens, percebe-se que os trabalhadores avaliados utilizaram as calças e a camisa retardantes a chama, pois essas partes apresentaram menos de 10% de frequência de danos por queimadura. Vale ressaltar, que é importante utilizar todo equipamento de segurança individual adequado (MARDEGAN; PARISE, 2018b).

Além disso, a maioria dessas pessoas não estava usando luvas adequadas ou proteção facial, pois as frequências de danos apresentada nesses locais foram maiores. No entanto, vale destacar que apenas as queimaduras nas mãos e no rosto não oferecem risco de morte para as pessoas. Os trabalhadores que recebem mais de 50% das queimaduras corporais têm grande probabilidade de morrer. Neste estudo, houve aproximadamente 10% de óbitos (HOAGLAND, 2012).

Na Figura 9, são apresentadas duas situações em que houve vítimas devido a explosões por arco elétrico. Os trabalhadores não estavam utilizando equipamento de proteção individual adequado e, provavelmente, os dispositivos de proteção falharam na ocorrência do arco.

Figura 9 – Exemplos de vítimas por queimaduras ocasionadas por arco elétrico.



Fonte: Evans (2018); Pinheiro Junior (2014).

Na primeira foto, a vítima sofreu graves queimaduras, envolto em chama, após uma explosão de arco elétrico, que o arremessou a uma distância de seis metros. Por negligência da empresa em seguir protocolo de segurança, não houve desenergização. O trabalhador exerceu uma operação em um equipamento energizado, provavelmente não utilizava EPI adequado, e não havia dispositivos de proteção e redução de arco elétrico. O que ocasionou esse grave acidente (EVANS, 2018).

Na segunda foto, houve uma explosão por arco e a vítima não estava utilizando protetor facial e capacete, o que poderá provocar graves consequências na face, como cegueira, além das queimaduras de segundo ou terceiro grau (PINHEIRO JUNIOR, 2014).

Além disso, os níveis de danos em pessoas podem variar, dependendo da distância de trabalho. Conforme o trabalhador se aproxima da fonte energizada, maior a probabilidade de ocorrer graves acidentes, quando ocorre o arco elétrico, principalmente queimaduras incuráveis na face, no pescoço e nas mãos, além do rompimento dos tímpanos, podendo levar à surdez, e pressão nos peitos, que além de derrubar os trabalhadores violentamente, podem causar danos nos órgãos internos, como os pulmões (CRNKO; DYRES, 2000).

Portanto, o arco elétrico apresenta graves riscos às pessoas e aos equipamentos, podendo causar consequências catastróficas. Como enfatiza Resende (2016), é imprescindível realizar o estudo dos níveis de energia incidente na instalação elétrica, para avaliar os riscos e buscar soluções de controle de riscos e reduzir os efeitos do arco elétrico, evitando acidentes e protegendo os trabalhadores.

3 MÉTODOS DE CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE E ABORDAGENS NORMATIVAS SOBRE ARCO ELÉTRICO

Neste capítulo, serão apresentados os principais métodos de cálculo de energia incidente, seus históricos, suas características e suas limitações. Além disso, serão abordadas as principais normas internacionais e nacionais na área de segurança em eletricidade com foco no arco elétrico.

3.1 Método de cálculo de Ralph H. Lee

O Dr. Ralph H. Lee é considerado o “padrinho” do estudo do arco elétrico e da indústria de proteção contra queimaduras provocadas por esse fenômeno, pois contribuiu para avaliar os riscos e perigos provocados pelo arco voltaico às pessoas, por meio de métodos de cálculos teóricos (DESHAW, 2015).

Seu artigo “*The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns*” (O Outro Risco Associado à Eletricidade: Queimaduras por Explosão em Arco Elétrico – tradução nossa), publicado em 1982, é citado em toda a literatura do arco voltaico hoje. No entanto, antes da publicação desse artigo, os principais estudos de proteção do sistema elétrico eram sobre o curto-circuito e as sobrecorrentes (MARDEGAN; PARISE, 2018a).

O objetivo desse artigo foi observar se em uma determinada distância de trabalho poderá provocar queimadura curável ou incurável, a partir de uma potência de arco e da elevação de temperatura, em sistemas trifásicos, ao ar livre (LEE, 1982).

O artigo do Dr. Lee apresenta três partes principais (DESHAW, 2015):

- Modelar uma explosão de arco como uma esfera em expansão com energia incidente;
- Determinar se a explosão de arco causa queimaduras na pele “curáveis” ou “incuráveis”;
- Recomendar maneiras de proteger os trabalhadores.

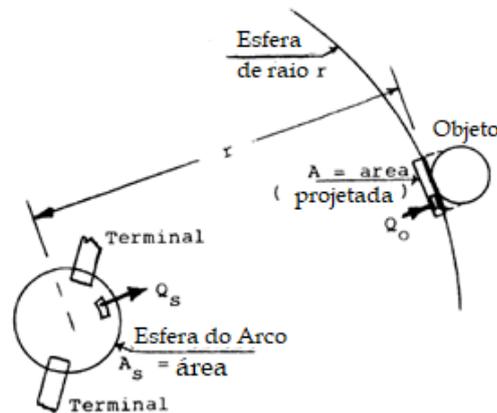
O Dr. Lee modelou o pior caso de arco ao qual um trabalhador pode ser exposto, considerando a transferência de calor irradiada da fonte para a superfície do objeto.

Lee (1982) considerou a temperatura do arco elétrico extremamente elevada, com valor médio de 20.000 K, podendo chegar a 50.000 K. Em comparação, a temperatura da superfície do sol é de cerca de 5.000 K, quatro vezes menor do que do arco elétrico.

A Figura 10 apresenta a fonte de arco elétrico como sendo uma esfera de energia

em expansão e o trabalhador como uma esfera no limite do raio de expansão. Dependendo da energia da explosão do arco e da localização dos trabalhadores, eles serão expostos a certa quantidade de energia. Essa energia faz com que a temperatura da pele aumente em certa intensidade (DESHAW, 2015).

Figura 10 – Transferência de calor da fonte de arco para um objeto receptor de calor.



Fonte: Adaptado de Lee (1982).

A Equação (1), de acordo com Lee (1982), representa o calor absorvido pela superfície a partir da emissão de calor da fonte, em uma dada distância:

$$Q_0 = \frac{Q_s \cdot A_s}{4\pi r^2} \cdot A_0 \quad (1)$$

Onde:

Q_s calor emitido da fonte, por unidade de área, em W;

A_s área total da superfície da fonte;

r distância do centro da fonte ao objeto;

A_0 área de superfície projetada do objeto ao longo de um plano normal à direção da fonte para o objeto;

Q_0 calor absorvido pela superfície projetada do objeto.

Quando o arco elétrico aumenta, maior a quantidade de tensão disponível do sistema será consumida nele, portanto, a tensão estará disponível para superar a impedância de alimentação e a corrente total diminuirá (LEE, 1982).

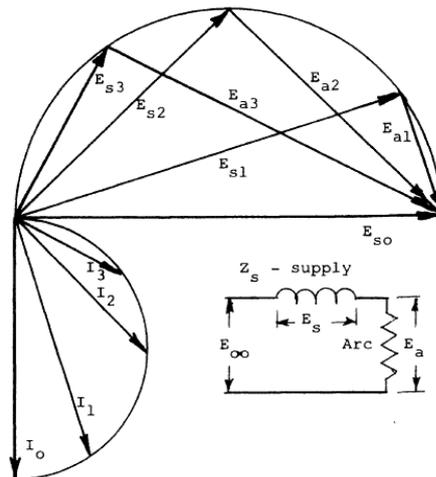
Lee (1982) modelou o sistema na ocorrência de um arco elétrico como sendo um circuito elétrico equivalente, como mostrado na Figura 11. O sistema apresenta tensão nominal

E_{∞} e impedância total Z_s , para condição de falta com arco elétrico. Há quatro condições de arco, uma de comprimento zero (falta franca), uma de comprimento curto (subscrito 1), uma de comprimento moderado (subscrito 2) e uma de comprimento maior (subscrito 3).

Como a impedância do arco é quase puramente resistiva e a impedância do sistema de alimentação quase puramente indutiva, as quedas de tensão no arco e no sistema de alimentação estão em quadratura para todos os comprimentos de arco. A soma fasorial das quedas de tensão do sistema E_s e do arco E_a , nas quatro condições, resulta sempre em E_{s0} , que também é igual a E_{∞} (LEE, 1982).

Além disso, para estas faixas de comprimentos de arco, a corrente total é representada pelos fasores I_0 , I_1 , I_2 e I_3 , todos perpendiculares e proporcionais à E_s correspondente, uma vez que estão relacionados pela constante Z_s , ($I = E_s/Z_s$) (LEE, 1982).

Figura 11 – Diagrama fasorial da tensão e corrente de arco.



Fonte: Lee (1982).

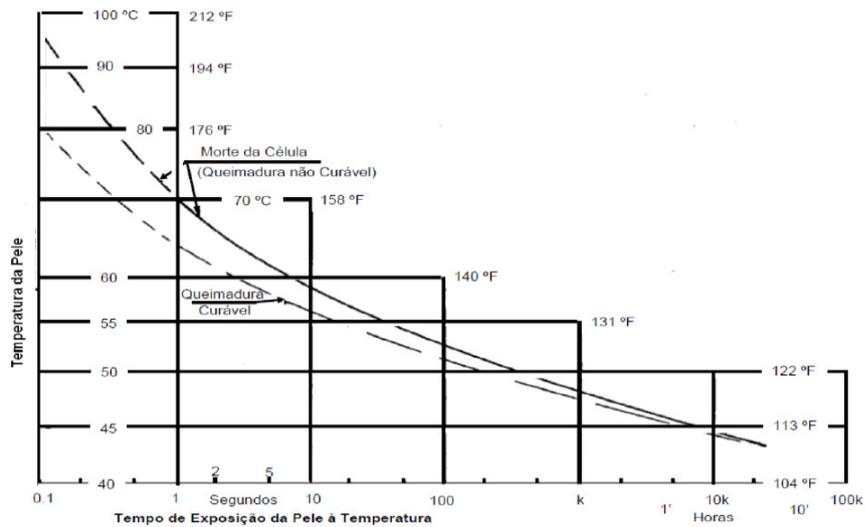
O ponto crucial do estudo analisa o aumento da temperatura da pele a partir da explosão do arco, e se a energia do arco elétrico causará ou não uma queimadura. Usando o básico de transferência de calor, Dr. Lee modelou umas curvas relacionando a temperatura e o tempo (DESHAW, 2015).

Na Figura 12, é apresentada a relação entre o tempo de exposição da pele à temperatura e a variação da temperatura da pele, com objetivo de observar o surgimento das queimaduras de segundo grau (LEE, 1982).

A curva superior mostra a queimadura não curável, morte celular, a partir da relação temperatura e tempo na pele, essa curva foi baseada no trabalho de Artz e Pruitts, que

desenvolveram uma curva com tempo a partir de 1 segundo, e Ralph Lee extrapolou para 0,1 s. A curva inferior representa a mesma relação, considerando as queimaduras curáveis. Essa curva foi baseada no trabalho de Stoll, que iniciou a curva em 1 segundo e Ralph Lee também extrapolou para 0,1 s (LEE, 1982).

Figura 12 – Relação tempo-temperatura, tolerância do tecido humano.



Fonte: adaptado de Lee (1982).

De acordo com o gráfico mostrado na Figura 12, para uma duração de 0,1 s, com a temperatura da pele acima de 96°C, haverá a destruição total do tecido, com queimaduras incuráveis. Com temperatura abaixo de 80 °C, a pele pode apresentar queimaduras curáveis. A 70 °C, apenas um segundo já é suficiente para causar a destruição total da célula (LEE, 1982).

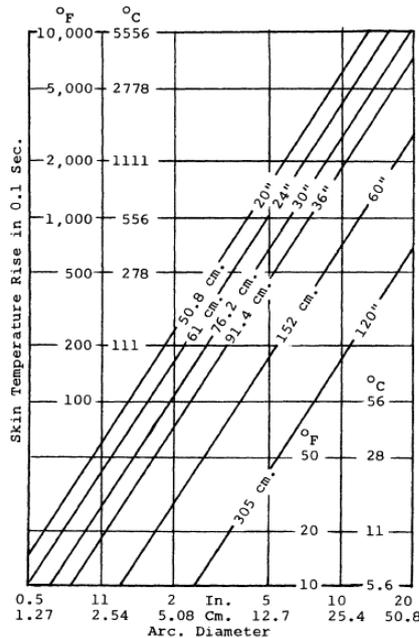
Outro assunto abordado no artigo é a recomendação do uso de roupas para proteção contra os efeitos do arco elétrico, como óculos de segurança, luvas de couro, capacete de proteção, capacete de proteção facial, roupas de proteção resistentes a chama, ou cobrindo roupas normais, pois durante uma explosão, há produção de gotículas de metal derretido. Na ocasião da elaboração do artigo, os equipamentos de proteção contra arco elétrico eram escassos se comparados com a proteção contra choques elétricos (LEE, 1982).

Segundo DeShaw (2015), a indústria de equipamentos de proteção individual contra o arco elétrico em sistema elétrico teve início a partir desse artigo. Além disso, de acordo com Doughty, Neal e Floyd (2000), como as medidas de proteção para prevenir ou limitar a exposição ao arco ainda não poderiam ser empregadas, naquela época, o uso de roupas resistentes ao fogo foi difundido ao longo do tempo na área elétrica.

No estudo, Lee (1982) apresentou o gráfico mostrado na Figura 13 e a Tabela 1,

tendo se baseado na exposição do arco elétrico em 0,1 s. Para determinadas distâncias, são associados valores de potências do arco que causam queimaduras curáveis e incuráveis (RESENDE, 2016). Para diferentes tempos de exposição, a temperatura precisa ser multiplicada pela proporção do tempo real de 0,1 s (LEE, 1982).

Figura 13 – Aumento da temperatura da pele em 0,1 s para várias distâncias.



Fonte: Lee (1982).

Na Tabela 1, é apresentada a relação distância-potência do arco para a queimadura curável (46 °C) e queimadura incurável (62 °C):

Tabela 1 – Potência do Arco x Distância.

Distância		Potência do arco – MW	
Polegada	cm	Curável	Incurável
20	50	5,2	7
24	61	7,5	10
30	76,2	11,8	16
36	81,4	17	23
60	152,4	47	64
120	304,8	189	256

Fonte: adaptado de Lee (1982).

A norma NFPA 70E (2021), em seu anexo D, apresenta equações básicas para calcular os limites de distância do arco elétrico e a energia incidente, para sistemas com tensões acima de 600 V, baseadas no artigo de Ralph Lee.

A corrente de curto-circuito trifásico nos terminais de um transformador é calculada conforme a Equação (2) (NFPA 70E, 2021):

$$I_{sc} = \frac{MVA_{Base} \cdot 10^6}{1,732 \cdot V} \cdot \left(\frac{100}{Z_{\%}} \right) \quad (2)$$

Onde:

- I_{sc} corrente de falta franca trifásica, em A;
 MVA_{Base} potência aparente do sistema base, em MVA;
 V tensão de linha, em V;
 $Z_{\%}$ impedância percentual do transformador.

Um valor típico para a potência máxima, em um arco trifásico, em MW, pode ser calculado usando a Equação (3) (NFPA 70E, 2021):

$$P = 1,732 \cdot V \cdot I_{sc} \cdot 10^{-6} \cdot 0,707^2 \quad (3)$$

Lee (1982) propôs equações da distância mínima do arco elétrico para queimadura curável, mostradas nas Equações (4) e (5) (NFPA 70E, 2021):

$$D_c = \sqrt{2,65 \cdot MVA_{bf} \cdot t} \quad (4)$$

$$D_c = \sqrt{53 \cdot MVA \cdot t} \quad (5)$$

O cálculo da distância mínima do arco elétrico para queimadura incurável é dado pelas Equações (6) e (7) (NFPA 70E, 2021):

$$D_f = \sqrt{1,96 \cdot MVA_{bf} \cdot t} \quad (6)$$

$$D_f = \sqrt{39 \cdot MVA \cdot t} \quad (7)$$

Onde:

- D_c distância entre a pessoa e a fonte do arco para queimadura curável (ou seja, temperatura da pele inferior a 80 °C), em pés;
- D_f distância entre a pessoa e a fonte do arco para queimadura incurável (ou seja, temperatura da pele acima de 96 °C), em pés;
- MVA_{bf} potência aparente da falta franca no ponto envolvido, em MVA;
- MVA potência aparente do transformador, em MVA; para transformadores com valores menores que 0,75 MVA, multiplica a potência do transformador por 1,25;
- t tempo de exposição do arco, em s.

A norma NFPA 70E (2021) apresenta o método de cálculo da energia incidente baseado no artigo de Ralph Lee, para uma análise de risco de arco elétrico. Os parâmetros necessários para realizar os cálculos são os seguintes:

- A corrente de curto-circuito trifásico disponível no equipamento;
- O tempo total de atuação do dispositivo de proteção (a montante do ponto de origem do arco) para corrente máxima de curto-circuito;
- A distância da fonte do arco;
- Tensão nominal de linha do sistema;

A Equação (8) pode ser usada para estimar a energia incidente produzida por um curto-circuito trifásico ao ar livre em sistemas com tensão acima de 600 V:

$$E = \frac{793 \cdot F \cdot V \cdot t_A}{D^2} \quad (8)$$

Onde:

- E energia incidente, em cal/cm²;
- F corrente de falta franca, em kA;
- V tensão de linha em kV;
- t_A tempo de duração do arco, em segundos;
- D distância de trabalho do ponto de arco elétrico, em polegadas.

Destaca-se que, o modelo proposto por Ralph Lee foi teórico, sem a utilização de ensaios em laboratório para comparar se os resultados dos valores são coerentes. O próprio

afirma que não se pode confiar nos cálculos, julgando-os conservadores, e que precauções de segurança devem ser tomadas (RESENDE, 2016).

Para o cálculo da máxima transferência de potência, ele considerou que a impedância do arco é a mesma da impedância da fonte, o que é raro ocorrer na prática, portanto, não existe a máxima transferência de potência mostrada na Equação (3). Além disso, o artigo considera que a energia elétrica é convertida completamente em energia incidente durante o arco elétrico. No entanto, há perdas da energia, como na fusão e na vaporização dos equipamentos (RESENDE, 2016).

Ademais, a metodologia de Ralph Lee não apresenta fórmulas de corrente de arco elétrico, e ele não observou os efeitos do arco elétrico dentro de configurações fechadas, como nos painéis elétricos, em que os níveis de energia incidente são considerados altos, e onde ocorre a maioria dos acidentes. O cálculo é feito somente para ambientes ao ar livre (RESENDE, 2016).

3.2 Método proposto por Doughty-Neal

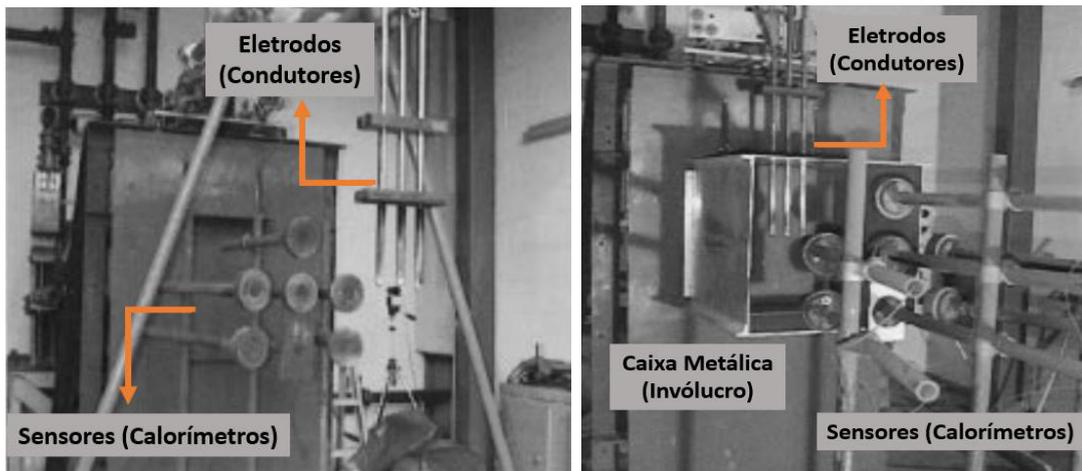
Desde 1982, quando Ralph Lee escreveu o artigo sobre o arco elétrico, engenheiros do setor industrial buscavam quantificar melhor o grau de risco para os operadores associados à exposição ao arco elétrico e as roupas de proteção adequadas para mitigar lesões graves (NEAL; BINGHAM; DOUGHTY, 1996).

Em 2000, foi publicado o artigo “*Predicting Incident Energy to Better Manage the Electric Arc Hazard on 600 V Power Distribution Systems*” (Previsão de energia incidente para gerenciar melhor o perigo de arco elétrico em sistemas de distribuição de energia de 600 V – tradução nossa), escrito por Richard L. Doughty, Thomas E. Neal e H. Landis Floyd (DOUGHTY; NEAL; FLOYD, 2000).

Ele é o terceiro de uma série de artigos com objetivo de aprimorar o estudo do arco elétrico e do desempenho de roupas expostas ao arco. O primeiro artigo foi “*Protective clothing guidelines for electric arc exposure*” (Diretrizes de roupas de proteção para exposição a arco elétrico – tradução nossa), de 1996; o segundo, “*Testing update on protective clothing & equipment for electric arc exposure*” (Atualização de teste sobre roupas e equipamentos de proteção para exposição ao arco elétrico – tradução nossa), de 1997 (RESENDE, 2016).

Foram feitos ensaios de laboratório, utilizando duas configurações diferentes com o auxílio de sensores. A configuração para ar livre e a configuração em cubículo fechado, com características de caixa cúbica de 20 polegadas ou 50,8 cm de lado, e aberta em uma extremidade, mostradas na Figura 14 (DOUGHTY; NEAL; FLOYD, 2000).

Figura 14 – Arranjos para teste de arco em configuração aberta e configuração fechada.



Fonte: adaptado de Doughty, Neal e Floyd (2000).

Este artigo documenta os resultados dos experimentos, em arranjos para configurações abertas e em uma caixa cúbica de 20 polegadas, e as modelagens matemáticas para estimar a energia incidente em sistemas trifásicos de tensão de até 600 V, ao ar livre ou fechada (DOUGHTY; NEAL; FLOYD, 2000).

Com efeito, os estudos de Doughty-Neal contribuíram para gerenciar melhor a exposição ao arco; estimar o valor da energia incidente mais realista, simplificando a tarefa de selecionar roupas de proteção adequadas para reduzir a gravidade das lesões (DOUGHTY; NEAL; FLOYD, 2000).

O Anexo D da norma NFPA 70E (2021) apresenta o método de cálculo da exposição à energia incidente baseado no artigo de Doughty-Neal. Os parâmetros necessários para os cálculos são os seguintes (NFPA 70E, 2021):

- A corrente de curto-circuito trifásico máximo e a corrente de falta mínima a qual o arco se sustentará;
- O tempo total de atuação do dispositivo de proteção (a montante do ponto de origem do arco);
- A distância do trabalhador do arco potencial para a tarefa a ser executada.

Para sistemas de 480 V, o nível mínimo aceito pela indústria para uma corrente de falta que faz o arco se sustentar é de 38% da corrente de curto-circuito trifásico máximo. A maior exposição à energia incidente pode ocorrer nesses níveis mais baixos, onde o dispositivo de sobrecorrente pode levar muito tempo para ser sensibilizado e abrir (NFPA 70E, 2021).

As distâncias de trabalho típicas usadas para cálculos de energia incidente são as seguintes (NFPA 70E, 2021):

- CCM de baixa tensão (até 600 V) e quadro de distribuição – 455 mm;
- CDC de baixa tensão (até 600 V) – 610 mm;
- CDC de média tensão (acima de 600 V) – 910 mm.

As Equações (9) e (10) podem ser usadas para prever a energia incidente produzida por um arco elétrico em sistemas trifásicos com tensão de até 600 V. Vale ressaltar que os resultados dessas equações nem sempre apresentam o pior caso. É essencial que as equações sejam utilizadas apenas dentro das limitações indicadas nas definições das variáveis apresentadas nas fórmulas (NFPA 70E, 2021).

A Equação (9) apresenta a energia incidente estimada para um arco ao ar livre:

$$E_{MA} = 5271 \cdot D_A^{-1,9593} \cdot t_A \cdot (0,0016 \cdot F^2 - 0,0076 \cdot F + 0,8938) \quad (9)$$

Onde:

- E_{MA} energia incidente máxima, em configurações abertas, em cal/cm²;
 D_A distância do arco ao indivíduo, em polegadas (para distância mínima de 18 polegadas ou 45,72 cm);
 t_A tempo de duração do arco, em segundos;
 F corrente de curto-circuito, em kA (na faixa de 16 kA a 50 kA).

A energia incidente estimada para um arco em configurações fechadas é dada pela Equação (10) (NFPA 70E, 2021):

$$E_{MB} = 1038,7 \cdot D_B^{-1,4738} \cdot t_A \cdot (0,0093 \cdot F^2 - 0,3453 \cdot F + 5,9675) \quad (10)$$

Onde:

- E_{MB} energia incidente máxima, em configurações fechadas, em cal/cm²;
 D_B distância do arco ao indivíduo, em polegadas (para distância mínima de 18 polegadas ou 45,72 cm);
 t_A tempo de duração do arco, em segundos;
 F corrente de curto-circuito, em kA (na faixa de 16 kA a 50 kA).

A Equação (10) é aplicada em painéis de controle e manobras, centros de controle de motores ou outros invólucros de equipamentos elétricos (NFPA 70E, 2021).

3.3 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Std 1584: 2018

A norma IEEE Std. 1584, “*Guide for performing arc-flash hazard calculations*” (Guia para realizar cálculos de risco de arco elétrico – tradução nossa), fornece modelos matemáticos para aplicar na determinação do limite de aproximação segura e energia incidente na ocorrência de arco elétrico em sistemas energizados de corrente alternada, ao qual os trabalhadores podem ser expostos durante seus trabalhos (IEEE 1584, 2018).

A primeira versão da norma foi publicada em 2002, após mais de 300 testes de arco elétrico em equipamentos fechados, realizados em laboratórios nos Estados Unidos, no final dos anos de 1990 até 2002. A partir desses testes, foram elaboradas equações empíricas para os cálculos da energia incidente e limite de aproximação segura (LANG; NEAL; WILKINS, 2007). Segundo Queiroz e Senger (2012d), os modelos matemáticos desenvolvidos foram baseados em análise estatística e ajuste de curvas a partir dos ensaios em laboratório.

Posteriormente, em 2018, a norma foi atualizada, resultado da colaboração entre as organizações internacionais NFPA e IEEE, para melhorar a exatidão dos cálculos de energia incidente e melhorar a maneira em que os cálculos refletem a situação real. Esse projeto teve quase de 2000 testes em laboratório (IEEE 1584, 2018).

O método é aplicável para sistemas elétricos com as seguintes faixas de parâmetros (IEEE 1584, 2018):

- Tensão trifásica entre 208 V a 15 kV;
- Frequência de 50 Hz ou 60 Hz;
- Corrente de curto-circuito trifásico simétrico: 500 A a 106 kA (para 208 V a 600 V) e 200 A a 65 kA (601 V a 15 kV);
- Espaçamento entre os condutores: 6,35 mm a 76,2 mm (para 208 V a 600 V) e 19,05 a 254 mm (para 601 V a 15 kV);
- Distâncias de trabalho maiores ou iguais a 305 mm;
- Tempo de eliminação da falta: Sem limite;
- Limites de dimensão do invólucro (gabinete):
 - Altura ou largura máxima: 1244,6 mm;
 - Área máxima de abertura: 1.549 m²;
 - Largura mínima: a largura do invólucro deve ser maior que quatro vezes a distância entre os condutores (eletrodos).

O modelo para cálculos de energia incidente é dividido em duas partes, dependendo da tensão do sistema, V_{oc} :

- Modelo para $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15.000 \text{ V}$;
- Modelo para $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$.

O processo de metodologia de cálculo da norma IEEE 1584 (2018) é realizado em 10 etapas, para determinar a energia incidente e limite de aproximação segura.

A partir dos cálculos da energia incidente, é possível determinar a periculosidade dos riscos do arco elétrico e dimensionar os EPIs para proteger os trabalhadores (QUEIROZ; SENGER, 2012c).

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

Segundo Mardegan e Parise (2018c), para a elaborar um estudo do risco de arco elétrico, calculando sua energia incidente, é necessário realizar, primeiramente, uma coleta de dados da instalação.

Deve-se recolher os diagramas unifilares e conferir em campo se estão atualizados de acordo com a configuração atual do sistema. Além disso, deve-se coletar as informações e características de todos os painéis de distribuição e de controle, das fontes de alimentação, dos equipamentos de proteção, dos CCMs, dos equipamentos de comutação etc. (IEEE 1584, 2018).

Nos equipamentos, como painéis e quadros de distribuição, pode ser necessário observar a sua construção, as suas características sobre o tamanho do invólucro e a configuração do eletrodo, e adquirir catálogos dos equipamentos ou, se possível, realizar medições, para cálculos mais detalhados (IEEE 1584, 2018).

Também, deve-se obter os estudos de curto-circuito e seletividade atualizados. Caso não haja, é preciso realizá-los, utilizando todos os dados coletados, por exemplo, características dos transformadores, geradores, motores, condutores, do modo de operação etc. Além de analisar os dispositivos de proteção usados, suas características, como as curvas de tempo-corrente e os tempos de atuação, para calcular a duração do arco (IEEE 1584, 2018).

3.3.2 Etapa 2: determinar os modos de operação do sistema

Esta etapa solicita determinar todos os modos de operação do sistema elétrico, analisar como o sistema funciona, se há geradores, se há paralelismo, se a concessionária fornece sozinha energia elétrica na rede etc. A seguir são mostrados alguns exemplos de modo de operação (IEEE 1584, 2018):

- Um ou mais alimentadores da concessionária em serviço;
- Disjuntor de interligação de barramento secundário da subestação da concessionária aberto ou fechado;
- Subestação da unidade com um ou dois alimentadores primários;
- Subestação da unidade com dois transformadores com ligação secundária aberta ou fechada;
- CCM com um ou dois alimentadores, um ou ambos energizados;
- Geradores funcionando em paralelo com a concessionária ou em espera;
- Sistema de comutação.

Para os cálculos de energia incidente, escolhe-se o modo de operação que apresenta os maiores valores de corrente de curto-circuito, considerando o pior caso (IEEE 1584, 2018).

3.3.3 Etapa 3: determinar a corrente de falta franca

O estudo de curto-circuito da instalação deve estar atualizado, considerando os dados do sistema e os modos de operação, para o estudo de arco voltaico. Caso não esteja disponível, será necessário realizá-lo para determinar os valores, podendo ser utilizado programas de simulação para modelagem do sistema (IEEE 1584, 2018).

Esse estudo pode incluir vários cálculos para contabilizar as contribuições de corrente de curto-circuito decrescentes do equipamento rotativo e o efeito sobre os tempos de abertura do dispositivo de proteção e a energia incidente resultante (IEEE 1584, 2018).

De fato, para o cálculo da corrente de curto-circuito, pode ser necessário estabelecer uma possível faixa de níveis de corrente de falta e calcular os tempos de trip do dispositivo de proteção de sobrecorrente (IEEE 1584, 2018).

3.3.4 Etapa 4: determinar a distância típica e tamanho do invólucro com base nas tensões do sistema e nas classes dos equipamentos

Nessa etapa, de acordo com o tipo de equipamento e com o nível de tensão, são estabelecidas a classe de equipamento, a distância típica entre condutores e as dimensões de invólucro, esses valores foram obtidos através de testes de laboratório (IEEE 1584, 2018).

A Tabela 2 apresenta diversas classes de equipamentos e fornece informações das suas distâncias típicas entre condutores e das suas dimensões dos invólucros.

Tabela 2 – Classes de equipamentos e distâncias típicas entre condutores.

Classe de equipamento	Distância típica entre condutores (mm)	Dimensões do invólucro (Altura x Largura x Profundidade)
Painel de distribuição de 15 kV	152	1143 mm × 762 mm × 762 mm
CCM de 15 kV	152	914,4 mm × 914,4 mm × 914,4 mm
Painel de distribuição de 5 kV	104	914,4 mm × 914,4 mm × 914,4 mm
Painel de distribuição de 5 kV	104	1143 mm × 762 mm × 762 mm
CCM de 5 kV	104	660,4 mm × 660,4 mm × 660,4 mm
Painel de distribuição de baixa tensão	32	508 mm × 508 mm × 508 mm
CCMs e painéis de distribuição rasos de baixa tensão	25	355,6 mm × 304,8 mm × ≤ 203,2 mm
CCMs e painéis de distribuição profundos de baixa tensão	25	355,6 mm × 304,8 mm × > 203,2 mm
Caixa de junção de cabos	13	355,6 mm × 304,8 mm × ≤ 203,2 mm
		ou 355,6 mm × 304,8 mm × > 203,2 mm

Fonte: adaptado de IEEE-1584 (2018).

A norma IEEE 1584 (2018) sugere esses valores, caso não seja possível fazer medições reais dos espaçamentos nos equipamentos, ou obter os dados dos fabricantes. Além disso, os valores podem variar em diferentes partes do equipamento.

3.3.5 Etapa 5: determinar a configuração dos eletrodos do equipamento

Nessa etapa, é necessário identificar o condutor do equipamento e a disposição do invólucro que mais se assemelham às configurações reais do eletrodo.

A norma IEEE 1584 (2018) apresenta três configurações de eletrodos para arranjos fechados. Vale ressaltar que para cada tipo de equipamento, como painéis elétricos, poderá haver condutores dispostos de maneira semelhante às configurações de eletrodo apresentadas no Quadro 2. É necessário observar essas semelhanças e classificá-lo.

Os painéis elétricos, por exemplo, podem conter configurações *Vertical Conductors in a Box* (VCB) (eletrodos verticais enclausurados – tradução nossa) e *Vertical Conductors in a Box with an insulating Barrier* (VCBB) (eletrodos verticais enclausurados terminados em uma barreira isolante – tradução nossa) (IEEE 1584, 2018).

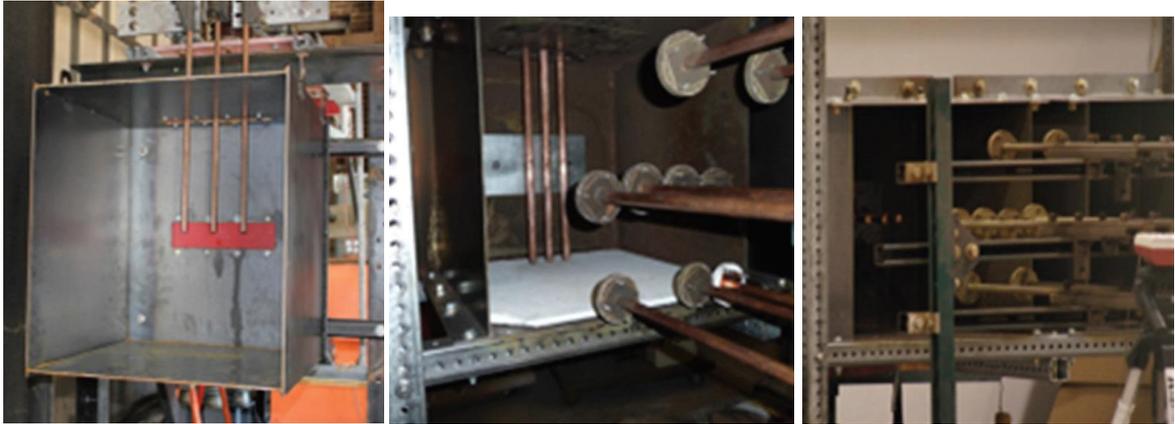
Outros equipamentos, como cubículos de média tensão, chaves seccionadoras e centro de comandos de motores, podem ter configurações, como *Horizontal Conductors in a Box* (HCB) (eletrodos horizontais enclausurados – tradução nossa) (IEEE 1584, 2018).

Nesse contexto, os condutores dentro de um cubículo podem apresentar mais de uma configuração de eletrodos. Dependendo do local que vai ser analisado, deve-se escolher o

pior caso, por exemplo, os disjuntores gerais dentro de painéis elétricos, pois os níveis de curto-circuito são maiores (IEEE 1584, 2018).

A Figura 15 mostra as três configurações dos eletrodos em cubículos durante os ensaios de laboratório.

Figura 15 – Ensaios em configurações VCB, VCBB e HCB.

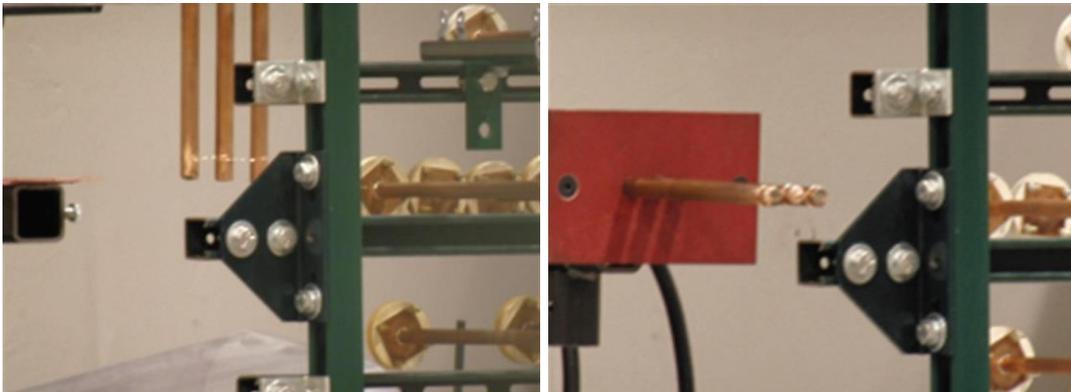


Fonte: IEEE 1584 (2018).

Para barramentos de cabos, que estão ao ar livre, a norma IEEE 1584 (2018) apresenta dois modelos: *Vertical Conductors in Open Air* (VOA) (condutores verticais ao ar livre – tradução nossa), e *Horizontal Conductors in Open Air* (HOA) (condutores horizontais ao ar livre – tradução nossa) (IEEE 1584, 2018).

A Figura 16 mostra as duas configurações dos eletrodos ao ar livre durante os ensaios de laboratório.

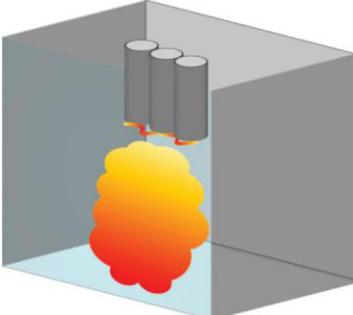
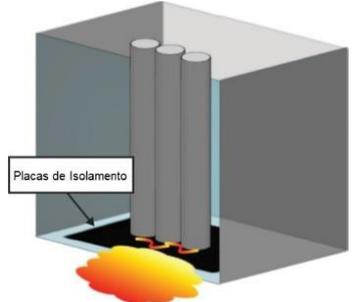
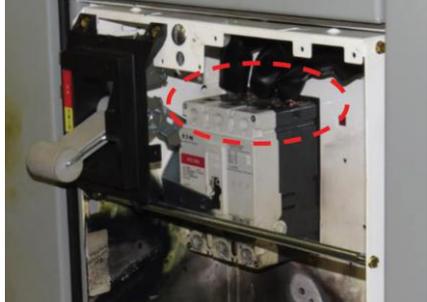
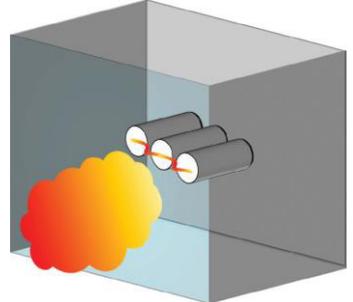
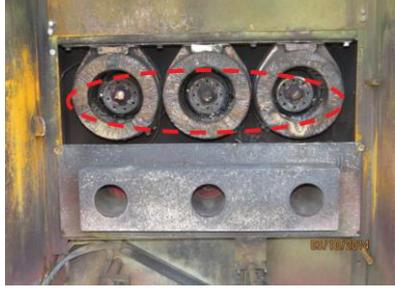
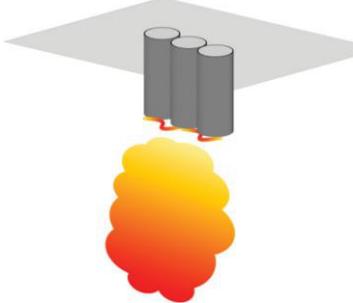
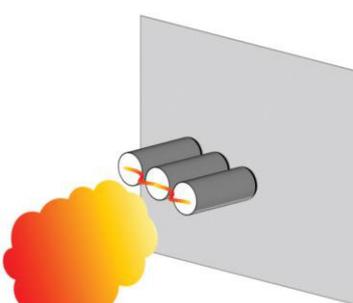
Figura 16 – Ensaios em configurações VOA e HOA.



Fonte: IEEE 1584 (2018).

O Quadro 2 apresenta correlação entre a configuração dos eletrodos e os equipamentos.

Quadro 2 – Correlação entre configuração dos eletrodos e equipamentos.

Configuração dos eletrodos	Configuração dos eletrodos em teste	Configuração dos eletrodos em equipamento
Condutores verticais; Eletrodos em caixa metálica; Enclausurado; (VCB)		
Condutores verticais; Eletrodos terminados em barreira isolante em caixa metálica; Enclausurado; (VCBB)		
Condutores horizontais; Eletrodos em caixa metálica; (HCB)		
Condutores verticais; Eletrodo ao ar livre (VOA)		
Condutores horizontais; Eletrodos ao ar livre (HOA)		

Fonte: adaptado de IEEE-1584 (2018).

Para identificar a configuração dos eletrodos para diferentes tipos de equipamentos, como painéis de distribuição de baixa tensão, CCMs de baixa tensão, quadro de distribuição de baixa tensão, e centro de distribuição de carga, deve-se determinar qual configuração de eletrodo é mais semelhante à situação real (IEEE 1584, 2018).

Por exemplo, se um disjuntor estiver presente, mas as travas do disjuntor não estiverem firmemente conectadas a um pino, então o HCB pode parecer a melhor solução. Mas, como o arco não pode sair direto para o trabalhador, o VCBB é uma solução melhor (IEEE 1584, 2018). Outro exemplo, se um disjuntor não estiver presente, e o equipamento é fechado com barramento horizontal e sem terminação, HCB é a melhor seleção. Caso o barramento termina nos contatos, VCB é a melhor seleção (IEEE 1584, 2018).

3.3.6 Etapa 6: determinar a distância de trabalho

De acordo com a norma IEEE 1584 (2018), a proteção contra arco voltaico é normalmente baseada no nível de energia incidente na cabeça e no torso da pessoa à distância de trabalho e não na energia incidente nas mãos ou braços. O grau de lesão em uma queimadura depende da porcentagem da pele da pessoa que foi queimada. A cabeça e o corpo representam uma grande porcentagem da área total da superfície da pele e os ferimentos nessas áreas são muito mais fatais do que as queimaduras nas extremidades.

A Tabela 3 apresenta diferentes classes de equipamentos e as distâncias de trabalho típicas correspondentes.

Tabela 3 – Classes de equipamentos e distâncias de trabalho típicas.

Classe de Equipamento	Distância de trabalho típica (mm)
Painel de distribuição de 15 kV	914,40
CCM de 15 kV	914,40
Painel de distribuição de 5 kV	914,40
CCM de 5 kV	914,40
Painel de distribuição de baixa tensão	609,60
CCMs e painéis de distribuição rasos de baixa tensão	457,20
CCMs e painéis de distribuição profundos de baixa tensão	457,20
Caixa de junção de cabos	457,20

Fonte: adaptado de IEEE-1584 (2018).

Segundo Queiroz e Senger (2012d), a distância de trabalho típica é o somatório da distância entre o trabalhador e a parte frontal do equipamento e da distância entre a parte frontal

do equipamento e a fonte de origem do arco elétrico, dentro do equipamento.

3.3.7 Etapa 7: determinar a corrente do arco elétrico

A norma IEEE 1584 (2018) fornece duas modelagens, dependendo da faixa de tensão, para os cálculos de energia incidente, corrente de arco elétrico e limite de aproximação segura, sendo o modelo para $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$ e outro modelo para $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15.000 \text{ V}$.

A corrente de arco elétrico é uma corrente de falta que flui através de um plasma de um arco elétrico. Ela depende da corrente de curto-circuito no local estudado. Vale ressaltar que a corrente de arco será menor do que a corrente de curto-circuito devido à impedância do arco. Arcos elétricos são menos prováveis em sistemas trifásicos operando em 240 V ou menos com uma corrente de falta inferior a 2.000 A (IEEE 1584, 2018).

A seguir, serão mostrados os modelos de cálculos das correntes de arco elétrico para diferentes intervalos de tensão.

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

Quando a tensão do sistema for $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15.000 \text{ V}$, deve-se, inicialmente, determinar as correntes de arco intermediárias usando a Equação (11) e os coeficientes $k1$ a $k10$ da Tabela 4, de acordo com a configuração dos eletrodos correspondente. Essas correntes são calculadas em três níveis de tensão: 600 V, 2.700 V e 14.300 V (IEEE 1584, 2018).

$$I_{arc_V_{oc}} = (10^{k1+k2 \cdot \log(I_{bf})+k3 \cdot \log(G)}) \cdot C1 \quad (11)$$

$$C1 = k4 \cdot I_{bf}^6 + k5 \cdot I_{bf}^5 + k6 \cdot I_{bf}^4 + k7 \cdot I_{bf}^3 + k8 \cdot I_{bf}^2 + k9 \cdot I_{bf} + k10 \quad (12)$$

Onde:

I_{bf} corrente de curto circuito trifásico simétrico, em kA;

I_{arc_600} corrente de arco para tensão do sistema $V_{oc} = 600 \text{ V}$, em kA;

I_{arc_2700} corrente de arco para tensão do sistema $V_{oc} = 2.700 \text{ V}$, em kA;

I_{arc_14300} corrente de arco para tensão do sistema $V_{oc} = 14.300 \text{ V}$, em kA;

G distância entre os condutores (gap), em mm;

$k1$ a $k10$ são coeficientes apresentados na Tabela 4;

\log logaritmo na base 10;

$C1$ variável auxiliar.

Posteriormente, as interpolações dos valores intermediários da corrente de arco são calculadas, utilizando as Equações (13), (14) e (15), e depois é determinado o valor final da corrente de arco (IEEE 1584, 2018).

$$I_{arc_1} = \frac{I_{arc_2700} - I_{arc_600}}{2,1} \cdot (V_{oc} - 2,7) + I_{arc_2700} \quad (13)$$

$$I_{arc_2} = \frac{I_{arc_14300} - I_{arc_2700}}{11,6} \cdot (V_{oc} - 14,3) + I_{arc_14300} \quad (14)$$

$$I_{arc_3} = \frac{I_{arc_1} \cdot (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{I_{arc_2} \cdot (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (15)$$

Onde:

I_{arc_1} primeiro termo da interpolação de I_{arc} para tensão do sistema entre 600 V e 2.700 V, em kA;

I_{arc_2} segundo termo da interpolação de I_{arc} para tensão do sistema maior que 2.700 V, em kA;

I_{arc_3} terceiro termo da interpolação de I_{arc} para tensão do sistema menor que 2.700 V, em kA;

V_{oc} tensão do sistema, em kV;

Se a tensão do sistema for $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 2.700 \text{ V}$, o valor final da corrente de arco será:

$$I_{arc} = I_{arc_3} \quad (16)$$

Se a tensão do sistema for $V_{oc} > 2.700 \text{ V}$, o valor final da corrente de arco é dado por:

$$I_{arc} = I_{arc_2} \quad (17)$$

A duração do arco pode ser determinada usando a I_{arc} . Esse tempo é usado para determinar a energia incidente e o limite de aproximação segura (IEEE 1584, 2018).

A Tabela 4 apresenta os coeficientes $k1$ a $k10$ para a Equação (11), para as três faixas de tensão e diferentes configurações de eletrodo.

Tabela 4 – Coeficientes para Equação (11).

C.E.	V _{oc}	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10
VCB	600 V	-0,04287	1,035	-0,083	0	0	-4,783e-09	1,962e-06	-0,000229	0,003141	1,092
	2700 V	0,0065	1,001	-0,024	-1,557e-12	4,556e-10	-4,186e-08	8,346e-07	5,482e-05	-0,003191	0,9729
	14300 V	0,005795	1,015	-0,011	-1,557e-12	4,556e-10	-4,186e-08	8,346e-07	5,482e-05	-0,003191	0,9729
VCBB	600 V	-0,017432	0,98	-0,05	0	0	-5,767e-09	2,524e-06	-0,00034	0,01187	1,013
	2700 V	0,002823	0,995	-0,0125	0	-9,204e-11	2,901e-08	-3,262e-06	0,0001569	-0,004003	0,9825
	14300 V	0,014827	1,01	-0,01	0	-9,204e-11	2,901e-08	-3,262e-06	0,0001569	-0,004003	0,9825
HCB	600 V	0,054922	0,988	-0,11	0	0	-5,382e-09	2,316e-06	-0,000302	0,0091	0,9725
	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	-5,043e-11	2,233e-08	-3,046e-06	0,000116	-0,001145	0,9839
VOA	600 V	0,043785	1,04	-0,18	0	0	-4,783e-09	1,962e-06	-0,000229	0,003141	1,092
	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-1584 (2018).

Com a escolha da configuração do eletrodo, deve-se selecionar a linha correspondente à configuração de eletrodo. Para tensão entre 600 V e 15000 V, são utilizadas as três faixas de tensão, para tensão entre 208 V e 600 V, utiliza-se apenas a faixa de 600 V.

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

Se a tensão do sistema for $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$, utiliza a Equação (11) para encontrar o valor intermediário (apenas 600 V) e a Equação (18) para encontrar o valor final da corrente de arco (IEEE 1584, 2018).

$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{0,6}{V_{oc}}\right)^2 \cdot \left[\frac{1}{I_{arc_600}^2} - \left(\frac{0,6^2 - V_{oc}^2}{0,6^2 \cdot I_{bf}^2}\right)\right]}} \quad (18)$$

Onde:

V_{oc} tensão do sistema, em kV;

I_{bf} corrente de curto circuito trifásico simétrico, em kA;

I_{arc} corrente de arco final, em kA;

I_{arc_600} corrente de arco para tensão do sistema $V_{oc} = 600 \text{ V}$, da Equação (11), em kA.

A duração do arco pode ser determinada usando a I_{arc} . Esse tempo é usado para determinar a energia incidente e o limite de aproximação segura (IEEE 1584, 2018).

3.3.7.3 Corrente de arco reduzida

A norma IEEE 1584 (2018) recomenda calcular a corrente de arco reduzida, para determinar se a variação da corrente de arco tem efeito sobre o tempo de operação dos dispositivos de proteção. Espera-se que no sistema de tensão entre 208 V e 600 V apresenta um impacto maior do que em tensão acima de 600 V (IEEE 1584, 2018).

Para determinar a corrente de arco reduzida, utilizam-se as Equações (19) e (20) e os coeficientes fornecidos pela Tabela 5.

$$I_{arc \text{ min}} = I_{arc} \cdot (1 - 0,5 \cdot VarC_f) \quad (19)$$

$$VarC_f = k1 \cdot V_{oc}^6 + k2 \cdot V_{oc}^5 + k3 \cdot V_{oc}^4 + k4 \cdot V_{oc}^3 + k5 \cdot V_{oc}^2 + k6 \cdot V_{oc} + k7 \quad (20)$$

Onde:

$VarC_f$ fator de correção de variação de corrente de arco;

- I_{arc} corrente de arco para tensão nominal do sistema, em kA;
- $I_{arc\ min}$ corrente de arco reduzida baseada no fator de correção de variação de corrente de arco, em kA;
- V_{oc} tensão do sistema, em kV;
- $k1$ a $k7$ são coeficientes que estão reproduzidos na Tabela 5.

A Tabela 5 apresenta os coeficientes $k1$ a $k7$, de acordo com as configurações de eletrodos.

Tabela 5 – Coeficientes para Equação (20).

C.E.	k1	K2	k3	k4	k5	k6	k7
VCB	0	-0,000001426	0,000083137	-0,0019382	0,022366	-0,12645	0,30226
VCBB	1,14e-03	-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	9,56e-03	-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-1584 (2018).

Com a escolha da configuração do eletrodo, deve-se selecionar a linha correspondente da Tabela 5 e aplicar os valores dos coeficientes na Equação (19).

A norma IEEE 1584 (2018) orienta calcular a duração do arco, a energia incidente e o limite de aproximação segura com base na corrente de arco reduzida $I_{arc\ min}$ para levar em conta o efeito da variação da corrente de arco na operação dos dispositivos de proteção.

A energia incidente final ou o limite de aproximação segura final vai ser o maior dos dois valores calculados, tanto para o cálculo com I_{arc} , quanto para $I_{arc\ min}$ (IEEE 1584, 2018).

3.3.8 Etapa 8: determinar a duração do arco elétrico

Segundo a norma IEEE 1584 (2018), a duração do arco é o tempo que a fonte de energia a montante da corrente de arco cessa de fornecer energia ou corrente para o local onde ocorre a corrente de arco elétrico. A duração da corrente do arco elétrico depende, normalmente, do tempo de disparo de um dispositivo de proteção de sobrecorrente temporizado, como relés e disjuntores (IEEE 1584, 2018).

Devem ser considerados, também, os dispositivos de proteção com tempos de operação definidos, como relés diferenciais, relés de detecção de arco elétrico etc. para determinar o tempo de operação (IEEE 1584, 2018).

Durante a coleta de dados em campo, é necessário obter as curvas de tempo-corrente dos dispositivos de proteção de sobrecorrente, ou o estudo de seletividade atualizados. Caso não haja, deve-se utilizar programas específicos ou catálogos disponíveis dos dispositivos de proteção para determinar a duração do arco (IEEE 1584, 2018).

Caso o tempo o tempo total de disparo do dispositivo de proteção for superior a 2 segundos, deve adotar o tempo de 2 segundos para os cálculos de energia incidente, pois, segundo a norma IEEE 1584 (2018), é provável que uma pessoa exposta à ação de um arco elétrico se afasta rapidamente.

3.3.9 Etapa 9: calcular a energia incidente

Nessa etapa, a norma IEEE 1584 (2018) apresenta alguns passos. O primeiro passo é determinar o fator de correção do tamanho do invólucro. Depois, calcular a energia incidente de acordo com o nível de tensão do sistema.

3.3.9.1 Determinação do Fator de Correção do tamanho do invólucro

As configurações fechadas VCB, VCBB e HCB foram baseadas em invólucro de 508 mm × 508 mm × 508 mm. A norma IEEE 1584 (2018) fornece instruções de como ajustar a energia incidente para invólucros menores e maiores usando o fator de correção.

Deve-se, inicialmente, determinar o tipo de invólucro. A norma IEEE 1584 (2018) apresenta dois tipos, o “Típico” e o “Raso”. O invólucro é considerado “Raso” quando as seguintes condições são atendidas simultaneamente:

- A tensão do sistema é inferior a 600 V;
- Tanto a altura quanto a largura são menores que 508 mm;
- A profundidade do invólucro é menor ou igual a 203,2 mm.

Se qualquer uma dessas condições não for atendida, o invólucro é considerado “Típico” (IEEE 1584, 2018).

Uma vez que o tipo de invólucro foi classificado, a altura e largura equivalentes precisam ser determinadas comparando seus valores com faixas específicas para cada uma das três configurações de eletrodo. Para certos intervalos, a largura e a altura equivalentes são determinadas usando as Equações (21) e (22) da seguinte forma (IEEE 1584, 2018):

$$W_1 = \left[660,4 + (W - 660,4) \cdot \left(\frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right] \cdot 25,4^{-1} \quad (21)$$

$$H_1 = \left[660,4 + (H - 660,4) \cdot \left(\frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right] \cdot 25,4^{-1} \quad (22)$$

Onde:

- H_1 altura equivalente do invólucro, em mm;
 W_1 largura equivalente do invólucro, em mm;
 H altura do invólucro, em mm;
 W largura do invólucro, em mm;
 V_{oc} tensão do sistema, em kV;
 A constante igual a 4, para eletrodos em arranjo VCB, e 10 para arranjos VCBB e HCB;
 B constante igual a 20, para eletrodos em arranjo VCB, 24 para arranjo VCBB e 22 para HCB.

A Tabela 6 fornece as diretrizes para determinar a altura e a largura equivalentes do invólucro para diferentes faixas de dimensões dos invólucros e configurações de eletrodo (IEEE 1584, 2018).

Tabela 6 – Guia para determinar altura e largura equivalente de invólucro.

C. E.	Intervalos	< 508 (mm)	≥ 508 e ≤ 660,4 (mm)	> 660,4 e ≤ 1244,6 (mm)	> 1244,6 (mm)
VCB	W_1	= 20 (se típico) $W_1 = 0,03937 \cdot W$ (se raso ^a)	= 0,03937 · W	Obtido com a Equação (21) e W	Obtido com a Equação (21) com W = 1244,6
	H_1	= 20 (se típico) $H_1 = 0,03937 \cdot H$ (se raso ^a)	= 0,03937 · H	= 0,03937 · H	= 49
VCBB	W_1	= 20 (se típico) $W_1 = 0,03937 \cdot W$ (se raso ^a)	= 0,03937 · W	Obtido com a Equação (21) e W	Obtido com a Equação (21) com W = 1244,6
	H_1	= 20 (se típico) $H_1 = 0,03937 \cdot H$ (se raso ^a)	= 0,03937 · H	Obtido com a Equação (22) e H	Obtido com a Equação (22) com H = 1244,6
HCB	W_1	= 20 (se típico) $W_1 = 0,03937 \cdot W$ (se raso ^a)	= 0,03937 · W	Obtido com a Equação (21) e W	Obtido com a Equação (21) com W = 1244,6
	H_1	= 20 (se típico) $H_1 = 0,03937 \cdot H$ (se raso ^a)	= 0,03937 · H	Obtido com a Equação (22) e H	Obtido com a Equação (22) com H = 1244,6

^a "Raso" apenas $V_{oc} < 600$ V e profundidade $\leq 203,2$ mm, caso contrário, o arranjo é "Típico".

Fonte: adaptado de IEEE-1584 (2018).

O próximo passo é determinar o tamanho equivalente do invólucro e o fator de correção do tamanho do invólucro. O tamanho equivalente do invólucro, ou *Equivalent*

Enclosure Size (EES), é determinado usando a Equação (23) (IEEE 1584, 2018):

$$EES = \frac{H_1 + W_1}{2} \quad (23)$$

Onde:

- H_1 altura equivalente do invólucro;
 W_1 largura equivalente do invólucro;
 EES tamanho do invólucro equivalente.

O fator de correção do tamanho do invólucro, ou *Correction Factor* (CF), é determinado utilizando a Equação (24) para invólucro do tipo “Típico”, e a Equação (25) para invólucro do tipo “Raso” (IEEE 1584, 2018):

$$CF = b1 \cdot EES^2 + b2 \cdot EES + b3 \quad (24)$$

$$CF = \frac{1}{b1 \cdot EES^2 + b2 \cdot EES + b3} \quad (25)$$

Onde:

- $b1$ a $b3$ coeficientes para as Equações (24) e (25) presentes na Tabela 7;
 CF fator de correção de tamanho de invólucro;
 EES tamanho do invólucro equivalente.

A Tabela 7 fornece os coeficientes $b1$ a $b3$ para a determinação do fator de correção do invólucro, para os tipos de invólucro “Típico” e “Raso” (IEEE 1584, 2018):

Tabela 7 – Coeficientes para as equações (24) e (25).

Tipo de Invólucro	Arranjo dos eletrodos	b1	b2	b3
Típico	VCB	-0,000302	0,03441	0,4325
	VCBB	-0,0002976	0,032	0,479
	HCB	-0,0001923	0,01935	0,6899
Raso	VCB	0,002222	-0,02556	0,6222
	VCBB	-0,002778	0,1194	-0,2778
	HCB	-0,0005556	0,03722	0,4778

Fonte: adaptado de IEEE-1584 (2018).

Uma vez que foi escolhida a configuração do eletrodo, classificado o tipo de invólucro, deve-se selecionar a linha correspondente da Tabela 7, e aplicar os valores correspondentes dos coeficientes na Equação (24) ou (25).

3.3.9.2 Determinação da energia incidente

Para determinar a energia incidente, inicialmente, são calculados os valores intermediários da energia incidente, utilizando as Equações (26), (27), (28) e (29) e as Tabelas 8, 9 e 10.

$$E_{600} = \frac{12,552}{50} \cdot T \cdot 10^{k1+k2 \cdot \log(G) + \frac{k3 \cdot I_{arc_600}}{C2} + C3 + k13 \cdot \log(I_{arc_600})} \quad (26)$$

$$E_{2700} = \frac{12,552}{50} \cdot T \cdot 10^{k1+k2 \cdot \log(G) + \frac{k3 \cdot I_{arc_2700}}{C2} + C3 + k13 \cdot \log(I_{arc_2700})} \quad (27)$$

$$E_{14300} = \frac{12,552}{50} \cdot T \cdot 10^{k1+k2 \cdot \log(G) + \frac{k3 \cdot I_{arc_14300}}{C2} + C3 + k13 \cdot \log(I_{arc_14300})} \quad (28)$$

$$E_{\leq 600} = \frac{12,552}{50} \cdot T \cdot 10^{k1+k2 \cdot \log(G) + \frac{k3 \cdot I_{arc_600}}{C2} + C3 + k13 \cdot \log(I_{arc})} \quad (29)$$

$$C2 = k4 \cdot I_{bf}^7 + k5 \cdot I_{bf}^6 + k6 \cdot I_{bf}^5 + k7 \cdot I_{bf}^4 + k8 \cdot I_{bf}^3 + k9 \cdot I_{bf}^2 + k10 \cdot I_{bf} \quad (30)$$

$$C3 = k11 \cdot \log(I_{bf}) + k12 \cdot \log(D) + \log\left(\frac{1}{CF}\right) \quad (31)$$

Onde:

E_{600} energia incidente para tensão do sistema $V_{oc} = 600$ V, em J/cm²;

E_{2700} energia incidente para tensão do sistema $V_{oc} = 2.700$ V, em J/cm²;

E_{14300} energia incidente para tensão do sistema $V_{oc} = 14.300$ V, em J/cm²;

$E_{\leq 600}$ energia incidente para tensão do sistema $V_{oc} \leq 600$ V, em J/cm²;

T tempo de duração do arco, em ms;

G distância entre os condutores (gap), em mm;

I_{arc_600} corrente de arco para tensão do sistema para $V_{oc} = 600$ V, em kA;

I_{arc_2700} corrente de arco para tensão do sistema para $V_{oc} = 2.700$ V, em kA;

I_{arc_14300} corrente de arco para tensão do sistema para $V_{oc} = 14.300$ V, em kA;

I_{arc}	corrente de arco para tensão do sistema para $V_{oc} \leq 600$ V, em kA;
I_{bf}	corrente de curto circuito trifásico simétrico, em kA;
D	distância de trabalho, em mm;
CF	fator de correção de tamanho de invólucro ($CF= 1$ para configurações VOA e HOA dos eletrodos);
log	logaritmo na base 10;
$k1$ a $k13$	são coeficientes encontrados nas Tabelas 8, 9 e 10, respectivamente nesse trabalho. Para Equações (26) e (29), utiliza a Tabela 8. Para Equação (27), utiliza a Tabela 9. E para Equação (28), utiliza a Tabela 10.
$C2$ e $C3$	variáveis auxiliares.

Para a tensão do sistema de $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15.000 \text{ V}$, deve-se calcular primeiro as interpolações dos valores intermediários da energia incidente, utilizando as Equações (32), (33) e (34), e depois determinar o valor final da energia incidente (IEEE 1584, 2018).

$$E_1 = \frac{E_{2700} - E_{600}}{2,1} \cdot (V_{oc} - 2,7) + E_{2700} \quad (32)$$

$$E_2 = \frac{E_{14300} - E_{2700}}{11,6} \cdot (V_{oc} - 14,3) + E_{14300} \quad (33)$$

$$E_3 = \frac{E_1 \cdot (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{E_2 \cdot (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (34)$$

Onde:

E_1	primeiro termo da interpolação de E para tensão do sistema entre 600 V e 2.700 V, em J/cm ² ;
E_2	segundo termo da interpolação de E para tensão do sistema maior que 2.700 V, em J/cm ² ;
E_3	terceiro termo da interpolação de E para tensão do sistema menor que 2.700 V, em J/cm ² ;
V_{oc}	tensão do sistema, em kV;

Tabela 8 – Coeficientes para Equações (26), (29), (38) e (41).

600 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
VCB	0,753364	0,566	1,752636	0	0	-4,783e-09	0,000001962	-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

Fonte: adaptado de IEEE-1584 (2018).

Tabela 9 – Coeficientes para Equações (27) e (39).

2700 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
VCB	2,40021	0,165	0,354202	-1,557e-12	4,556e-10	-4,186e-08	8,346e-07	5,482e-05	-0,003191	0,9729	0	-1,569	0,9778
VCBB	3,870592	0,185	-0,736618	0	-9,204e-11	2,901e-08	-3,262e-06	0,0001569	-0,004003	0,9825	0	-1,742	1,09
HCB	3,486391	0,177	-0,193101	0	0	4,859e-10	-1,814e-07	-9,128e-06	-0,0007	0,9881	0,027	-1,723	1,055
VOA	3,880724	0,105	-1,906033	-1,557e-12	4,556e-10	-4,186e-08	8,346e-07	5,482e-05	-0,003191	0,9729	0	-1,515	1,115
HOA	3,616266	0,149	-0,761561	0	0	7,859e-10	-1,914e-07	-9,128e-06	-0,0007	0,9981	0	-1,639	1,078

Fonte: adaptado de IEEE-1584 (2018).

Tabela 10 – Coeficientes para Equações (28) e (40).

14300 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
VCB	3,825917	0,11	-0,999749	-1,557e-12	4,556e-07	-4,186e-08	8,346e-07	5,482e-05	-0,003191	0,9729	0	-1,568	0,99
VCBB	3,644309	0,215	-0,585522	0	-9,204e-11	2,901e-08	-3,262e-06	0,0001569	-0,004003	0,9825	0	-1,677	1,06
HCB	3,044516	0,125	0,245106	0	-5,043e-11	2,233e-08	-3,046e-06	0,000116	-0,001145	0,9839	0	-1,655	1,084
VOA	3,405454	0,12	-0,93245	-1,557e-12	4,556e-10	-4,186e-08	8,346e-07	5,482e-05	-0,003191	0,9729	0	-1,534	0,979
HOA	2,04049	0,177	1,005092	0	0	7,859e-10	-1,914e-07	-9,128e-06	-0,0007	0,9981	-0,05	-1,633	1,151

Fonte: adaptado de IEEE-1584 (2018).

Com a escolha da configuração do eletrodo, deve-se atentar para qual equação escolher de acordo com a tensão, bem como a tabela referente a ela e selecionar a linha correspondente à configuração.

Quando a tensão do sistema for $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 2.700 \text{ V}$, o valor final da energia incidente será:

$$E = E_3 \quad (35)$$

Quando a tensão do sistema for $V_{oc} > 2.700 \text{ V}$, o valor final da energia incidente será:

$$E = E_2 \quad (36)$$

Para a tensão do sistema de $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$, o valor final da energia incidente será: (IEEE 1584, 2018).

$$E = E_{\leq 600} \quad (37)$$

A energia incidente em (cal/cm^2) é obtida pela divisão de E (J/cm^2) por 4,184, pois $1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}$ (IEEE 1584, 2018).

Vale ressaltar que a norma IEEE 1584 (2018) orienta calcular a energia incidente a partir da corrente de arco reduzida, $I_{arc \text{ mín}}$, de acordo com a Etapa 7 da norma. A energia incidente final será o maior entre os dois valores calculados, tanto para a I_{arc} , quanto para $I_{arc \text{ mín}}$ (IEEE 1584, 2018).

3.3.10 Etapa 10: determinar o limite de aproximação segura

Além de calcular a energia incidente causada pelo arco elétrico, é importante conhecer a distância em que não se faz necessária a utilização da vestimenta de proteção.

A norma IEEE 1584 (2018) define o limite de aproximação segura, *Arch-Flash Boundary (AFB)*, como a distância entre a fonte do arco elétrico e o local em que a energia incidente é igual a $5,0 \text{ J}/\text{cm}^2$ ou $1,2 \text{ cal}/\text{cm}^2$ (limite da pele humana para queimaduras de 2º grau).

Para determinar o limite de aproximação segura, inicialmente, são calculados os valores intermediários, utilizando as Equações (38), (39), (40) e (41) e as Tabelas 8, 9 e 10.

$$AFB_{600} = 10^{\left[\frac{k_1 + k_2 \cdot \log(G) + \frac{k_3 \cdot I_{arc_600}}{C_2} + C_4 + k_{13} \cdot \log(I_{arc_600})}{-k_{12}} \right]} \quad (38)$$

$$AFB_{2700} = 10^{\left[\frac{k_1 + k_2 \cdot \log(G) + \frac{k_3 \cdot I_{arc_2700}}{C_2} + C_4 + k_{13} \cdot \log(I_{arc_2700})}{-k_{12}} \right]} \quad (39)$$

$$AFB_{14300} = 10^{\left[\frac{k_1 + k_2 \cdot \log(G) + \frac{k_3 \cdot I_{arc_14300}}{C_2} + C_4 + k_{13} \cdot \log(I_{arc_14300})}{-k_{12}} \right]} \quad (40)$$

$$AFB_{\leq 600} = 10^{\left[\frac{k_1 + k_2 \cdot \log(G) + \frac{k_3 \cdot I_{arc_600}}{C_2} + C_4 + k_{13} \cdot \log(I_{arc})}{-k_{12}} \right]} \quad (41)$$

$$C_4 = k_{11} \cdot \log I_{bf} + \log \left(\frac{1}{CF} \right) - \log \left(\frac{20}{T} \right) \quad (42)$$

Onde:

AFB_{600} limite de aproximação segura, quando $V_{oc} = 600$ V, em mm;

AFB_{2700} limite de aproximação segura, quando $V_{oc} = 2.700$ V, em mm;

AFB_{14300} limite de aproximação segura, quando $V_{oc} = 14.300$ V, em mm;

$AFB_{\leq 600}$ limite de aproximação segura, quando $V_{oc} \leq 600$ V, em mm;

T tempo de duração do arco, em ms;

G espaçamento entre os condutores (gap), em mm;

I_{arc_600} corrente de arco para tensão do sistema $V_{oc} = 600$ V, em kA;

I_{arc_2700} corrente de arco para tensão do sistema $V_{oc} = 2.700$ V, em kA;

I_{arc_14300} corrente de arco para tensão do sistema $V_{oc} = 14.300$ V, em kA;

I_{arc} corrente final de arco, quando $V_{oc} \leq 600$ V, em kA;

I_{bf} corrente de curto-circuito trifásico simétrica, em kA;

CF fator de correção para o tamanho de invólucro ($CF= 1$ para configurações VOA e HOA dos eletrodos);

\log logaritmo na base 10;

k_1 a k_{13} são coeficientes encontrados nas Tabelas 8, 9 e 10, respectivamente nesse trabalho. Para Equações (38) e (41), utiliza a Tabela 8; para Equação (39), utiliza a Tabela 9 e para Equação (40), utiliza a Tabela 10.

C_4 e C_2 variáveis auxiliares;

Para a tensão do sistema de $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15.000 \text{ V}$, deve-se calcular primeiro as interpolações dos valores intermediários dos limites de aproximação segura, utilizando as Equações (43), (44) e (45), e depois determinar o valor final (IEEE 1584, 2018).

$$AFB_1 = \frac{AFB_{2700} - AFB_{600}}{2,1} \cdot (V_{oc} - 2,7) + AFB_{2700} \quad (43)$$

$$AFB_2 = \frac{AFB_{14300} - AFB_{2700}}{11,6} \cdot (V_{oc} - 14,3) + AFB_{14300} \quad (44)$$

$$AFB_3 = \frac{AFB_1 \cdot (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{AFB_2 \cdot (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (45)$$

Onde:

AFB_1 primeiro termo da interpolação de AFB para tensão do sistema entre 600 V e 2.700 V, em mm;

AFB_2 segundo termo da interpolação de AFB para tensão do sistema maior que 2.700 V, em mm;

AFB_3 terceiro termo da interpolação de AFB para tensão do sistema menor que 2.700 V, em mm;

V_{oc} tensão do sistema, em kV;

Quando a tensão do sistema for $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 2.700 \text{ V}$, o valor final do limite de aproximação segura será:

$$AFB = AFB_3 \quad (46)$$

Quando a tensão do sistema for $V_{oc} > 2.700 \text{ V}$, o valor final do limite de aproximação segura será:

$$AFB = AFB_2 \quad (47)$$

Para a tensão do sistema de $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$, o valor final do limite de aproximação segura será:

$$AFB = AFB_{\leq 600} \quad (48)$$

Vale ressaltar que a norma IEEE 1584 (2018) orienta calcular o limite de aproximação segura a partir da corrente de arco reduzida, $I_{arc\ min}$, de acordo com a Etapa 7 da norma. O limite de aproximação segura final será o maior entre os dois valores calculados, tanto para a I_{arc} , quanto para $I_{arc\ min}$ (IEEE 1584, 2018).

3.4 National Fire Protection Association (NFPA) – 70E: 2021

A norma NFPA 70E, com o título “*Standard for Electrical Safety in the Workplace*” (Norma para Segurança Elétrica no Local de Trabalho – tradução nossa), foi lançada pela primeira vez em 1976, após a instituição *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) solicitar uma comissão de estudos para criar uma norma de segurança em eletricidade. Com o passar dos anos, a norma foi atualizando, passando por diversas revisões, sendo sua última versão lançada em 2021 (NFPA 70E, 2021).

De fato, o objetivo desta norma é fornecer orientações necessárias para criar um programa de segurança no local de trabalho com eletricidade, a fim de que os funcionários sejam capazes de selecionar e executar os procedimentos de segurança em relação aos perigos decorrentes do uso de eletricidade (NFPA 70E, 2021).

Essa norma é dividida em introdução e três capítulos: O Capítulo 1 se aplica para práticas de trabalho relacionadas à segurança; o Capítulo 2 refere-se aos requisitos de manutenção relacionados à segurança para instalações e equipamentos elétricos; e o Capítulo 3 complementa e modifica o Capítulo 1. Também há os anexos informativos, que não são obrigatórios (NFPA 70E, 2021).

3.4.1 Risco de arco elétrico

A norma NFPA 70E (2021) define o risco de arco elétrico como sendo uma fonte de possíveis lesões ou danos à saúde associados à liberação de energia causada por um arco elétrico.

Para a NFPA 70E (2021), a probabilidade de ocorrer um incidente com arco voltaico aumenta quando os condutores elétricos energizados são expostos ou quando esses estão dentro do equipamento fechado e uma pessoa esteja interagindo com o equipamento de tal maneira que possa causar um arco elétrico.

A definição de vestimentas retardantes a chama é um sistema completo de roupas e equipamentos que protege contra arco elétrico que cobre todo o corpo, exceto mãos e pés. Um traje contra arco voltaico pode incluir calças ou macacões, uma jaqueta ou macacão e um capuz do tipo apicultor com proteção facial (NFPA 70E, 2021).

A avaliação do arco é o valor atribuído aos materiais que descreve seu desempenho à exposição de uma descarga de arco elétrico. A classificação do arco é expressa em cal/cm² e é baseada no *Arc Thermal Performance Value* (ATPV) (Valor de Desempenho Térmico do Arco – tradução nossa). A norma informa que roupas ou equipamentos com classificação de arco indicam que foram testados quanto à exposição a arco, protegem contra esse fenômeno e são resistentes ao fogo (NFPA 70E, 2021).

3.4.2 Avaliação de risco de arco elétrico

Os objetivos de uma avaliação de risco de arco elétrico são (NFPA 70E, 2021):

- Identificar os perigos do arco voltaico;
- Estimar a probabilidade de ocorrência de ferimentos ou danos à saúde;
- Determinar se medidas de proteção adicionais são necessárias, incluindo o uso de EPI.

Para estimar a probabilidade e gravidade de ocorrência de lesão ou danos à saúde deve levar em consideração o seguinte (NFPA 70E, 2021):

- O projeto do equipamento elétrico, incluindo seu dispositivo de proteção contra sobrecorrente e seu tempo de operação;
- A condição de operação do equipamento elétrico e a condição de manutenção.

Caso as medidas de proteção adicionais forem necessárias, incluindo o uso do EPI, devem ser selecionadas e implementadas de acordo com a hierarquia de controle de risco, observando os seguintes (NFPA 70E, 2021):

- Seguranças adequadas para cada tipo de trabalho;
- O limite de aproximação segura do arco voltaico;
- O EPI a ser utilizado dentro do limite do arco voltaico.

O limite de aproximação segura do arco elétrico deve ser a distância na qual a energia incidente é igual a 1,2 cal/cm² (5 J/cm²), para obter informações de como estimar o limite, deve-se fazer cálculos adequados a partir de normas vigentes (NFPA 70E, 2021).

3.4.3 *Análise de energia incidente*

Para especificar as vestimentas e os EPIs necessários contra o arco elétrico, a norma NFPA 70E (2021) solicita para utilizar um método de cálculo de energia incidente. O nível de exposição à energia do incidente deve ser baseado na distância de trabalho das áreas do rosto e do peito do funcionário a partir de uma fonte de arco potencial para a tarefa específica a ser realizada (NFPA 70E, 2021).

A análise da energia incidente deve levar em consideração as características do dispositivo de proteção de sobrecorrente e seu tempo de eliminação da falta, incluindo esta condição de manutenção. Também deve ser atualizada quando ocorrerem mudanças no sistema de distribuição elétrica que possam afetar os resultados da análise. Além disso, deve ser revisada para precisão em intervalos não superiores a 5 anos (NFPA 70E, 2021).

No anexo D, da norma NFPA 70E (2021), de caráter informativo, são apresentados os principais métodos de cálculo de energia incidente: método proposto por Ralph Lee, por Douthy-Neal, também faz menção do método de cálculo da norma IEEE 1584 (2018) e de corrente contínua, proposto por Doan.

3.4.4 *Vestimentas de proteção e EPIs contra arco elétrico*

As vestimentas e os EPIs resistentes a arco devem ser usados pelo funcionário com base na exposição à energia incidente associada à tarefa específica. Para selecionar esses EPIs contra arco elétrico adequados, a norma NFPA 70E (2021) aplica dois métodos de seleção de vestimentas:

1. Método de Análise de Energia Incidente;
2. Método da Categoria de EPI para arco elétrico.

Para selecionar as vestimentas retardantes a chama e EPIs resistentes a arco elétrico adequados, deve-se utilizar um dos métodos, não ambos. Ao realizar uma análise de energia incidente para especificar a categoria do EPI, não se deve utilizar o Método da Categoria de EPI para arco elétrico (NFPA 70E, 2021).

No estudo de caso, utilizou-se o Método da Análise de Energia Incidente, para escolha dos EPIs.

3.4.4.1 Método da Análise de Energia Incidente

Esse método de seleção das vestimentas e EPIs é utilizado a partir do valor da energia incidente calculado.

O Quadro 3 identifica as vestimentas retardantes a chama e EPIs resistentes a arco, sendo consultado quando utilizam algum método de cálculo de energia incidente (NFPA 70E, 2021).

Quadro 3 – Seleção de vestimentas retardantes a chama e EPIs resistentes a arco quando o Método de Análise de Energia Incidente é usado.

Exposição à energia incidente igual a 1,2 cal/cm² até 12 cal/cm²	Exposição à energia incidente maior que 12 cal/cm²
1. Vestimenta resistente a arco, com suportabilidade igual ou superior à energia incidente estimada 2. Camisas e calças compridas ou macacão ou jaqueta resistente a arco voltaico 3. Protetor facial com proteção contra arco elétrico e balaclava com proteção contra arco elétrico ou capuz resistente a arco voltaico 4. Roupas externas com proteção contra arco (por exemplo, jaqueta, parka, capa de chuva, forro de capacete) 5. Luvas de couro resistentes, luvas resistentes a arco ou luvas isolantes de borracha com protetores de couro 6. Capacete 7. Óculos de segurança ou óculos de proteção 8. Proteção auditiva 9. Calçado de couro	1. Vestimenta resistente a arco, com suportabilidade igual ou superior à energia incidente estimada 2. Camisa e calça de manga comprida ou macacão ou terno de arco voltaico 3. Capuz resistente a arco elétrico 4. Roupas externas com proteção contra arco (por exemplo, jaqueta, parka, capa de chuva, forro de capacete) 5. Luvas de couro resistentes, luvas resistentes a arco ou luvas isolantes de borracha com protetores de couro 6. Capacete 7. Óculos de segurança ou óculos de proteção 8. Proteção auditiva 9. Calçado de couro

Fonte: adaptado de NFPA 70E (2021).

É vantajoso especificar ou selecionar equipamentos com classificação de arco acima do valor do arco que os trabalhadores serão expostos. O teste de roupas com classificação de arco é baseado em 50% de probabilidade de sucesso. Exceder o requisito mínimo pode aumentar substancialmente a probabilidade de sucesso (INDUSTRIAL TEST, 2020).

O equipamento de proteção individual necessário para proteger, conforme mostrado na etiqueta do mesmo, é normalmente baseado na distância de trabalho. Se alguma parte do corpo do trabalhador estiver mais próxima do equipamento do que a distância de trabalho indicada, é necessário um nível adicional de proteção, para evitar possível acidente (INDUSTRIAL TEST, 2020).

3.4.4.2 Método da Categoria de EPI para Arco Elétrico

O Método da Categoria de EPI para Arco Elétrico é baseado a partir da análise do sistema, utilizando o Quadro 4, que apresenta diversos tipos de equipamentos e seus parâmetros com a identificação da categoria do EPI e sugestão do limite de aproximação segura para arco elétrico. Para utilizar esse método, o profissional qualificado já deve conhecer várias informações importantes, como (NFPA 70E, 2021):

- A tensão do equipamento sendo trabalhado enquanto energizado;
- A corrente máxima de curto-circuito disponível no equipamento que está sendo trabalhado;
- O tempo máximo de eliminação da falta do dispositivo de sobrecorrente protegendo o equipamento que está sendo trabalhado;
- A distância de trabalho necessária para realizar a tarefa.

Se qualquer um dos itens acima não for conhecido, o Quadro 4 não pode ser usada e uma análise de energia incidente deve ser realizada, utilizando assim, o Método de Análise de Energia Incidente (NFPA 70E, 2021).

Quadro 4 – Categoria dos EPIs para arco elétrico para sistemas de corrente alternada.

Equipamento	Categoria de EPI	Limite de aproximação segura
Painéis ou outros equipamentos com tensão de até 240 V. Parâmetros: Corrente de curto-circuito máximo disponível de 25 kA; tempo máximo de eliminação de falta de 0,03 s; distância de trabalho 455 mm.	1	485 mm
Painéis ou outros equipamentos com tensão entre 240 V e 600 V. Parâmetros: Corrente de curto-circuito máximo disponível de 25 kA; tempo máximo de eliminação de falta de 0,03 s; distância de trabalho 455 mm.	2	900 mm
Centros de controle de motores com tensão de até 600 V (CCMs). Parâmetros: Corrente de curto-circuito máximo disponível de 65 kA; tempo máximo de eliminação de falta de 0,03 s; distância de trabalho 455 mm.	2	1,5 m
Centros de controle de motores com tensão de até 600 V (CCMs). Parâmetros: Corrente de curto-circuito máximo disponível de 42 kA; tempo máximo de eliminação de falta de 0,33 s; distância de trabalho 455 mm.	4	4,3 m
Quadro de distribuição com tensão de até 600 V (com disjuntores ou fusível) e cubículo elétrico com tensão de até 600 V. Parâmetros: Corrente de curto-circuito máximo disponível de 35 kA; tempo máximo de eliminação de falta de 0,5 s; distância de trabalho 455 mm.	4	6

Equipamento	Categoria de EPI	Limite de aproximação segura
Outros equipamentos com tensão de até 600 V (277 V a 600 V). Parâmetros: Corrente de curto-circuito máximo disponível de 65 kA; tempo máximo de eliminação de falta de 0,03 s; distância de trabalho 455 mm.	2	1,5 m
Partidas de motor NEMA E2 (contator com fusível), 2,3 kV até 7,2 kV. Parâmetros: Corrente de curto-circuito máximo disponível de 35 kA; tempo máximo de eliminação de falta de 0,24 s; distância de trabalho 910 mm.	4	12 m
Quadro de distribuição metálica, tipo fundido ou não fundido, ou outros equipamentos com tensão entre 1 kV a 15 kV. Parâmetros: Corrente de curto-circuito máximo disponível de 35 kA; tempo máximo de eliminação de falta de 0,24 s; distância de trabalho 910 mm.	4	12 m
Quadro de distribuição metálica, com tensão entre 1 kV a 15 kV. Parâmetros: Corrente de curto-circuito máximo disponível de 35 kA; tempo máximo de eliminação de falta de 0,24 s; distância de trabalho 910 mm.	4	12 m
Quadro de distribuição resistente a arco elétrico, com tensão nominal acima de 600 V. Parâmetros: PORTAS FECHADAS e SEGURAS, valores de corrente de curto-circuito máximo e tempo de eliminação não pode exceder o limite de resistência do quadro de distribuição. Para PORTAS ABERTAS, corresponde a equipamentos não resistentes ao arco elétrico, o valor da categoria do EPI e da distância de segurança depende dos valores dos parâmetros citados anteriormente.	NA	NA

Fonte: adaptado de NFPA 70E (2021).

Após selecionar o equipamento e seus parâmetros que mais se aproxima do sistema real, no Quadro 4, deve-se utilizar o Quadro 5, que lista as vestimentas retardantes a chama e equipamentos de proteção individuais resistentes a arco necessários com base nas categorias de EPIs de arco voltaico (NFPA 70E, 2021).

Esses EPIs devem ser usados ao trabalhar dentro do limite do arco elétrico. Vale ressaltar que esses equipamentos se destinam somente a proteger as pessoas do risco de exposição ao arco elétrico (NFPA 70E, 2021).

O Quadro 5 apresenta os quatro tipos de categorias de EPI. Em todos, utilizam os equipamentos de proteção. A Categoria 1 contém os tipos de vestimentas resistentes a arco elétrico com suportabilidade mínima de 4 cal/cm². A Categoria 2 apresenta as vestimentas apresentam suportabilidade mínima de 8 cal/cm². Na Categoria 3, as vestimentas resistentes a arco elétrico apresentam suportabilidade mínima de 25 cal/cm². E a Categoria 4, as vestimentas resistentes a arco elétrico apresentam suportabilidade mínima de 40 cal/cm².

Quadro 5 – Equipamentos de proteção necessários para cada categoria de EPI.

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

Fonte: adaptado de NFPA 70E (2021).

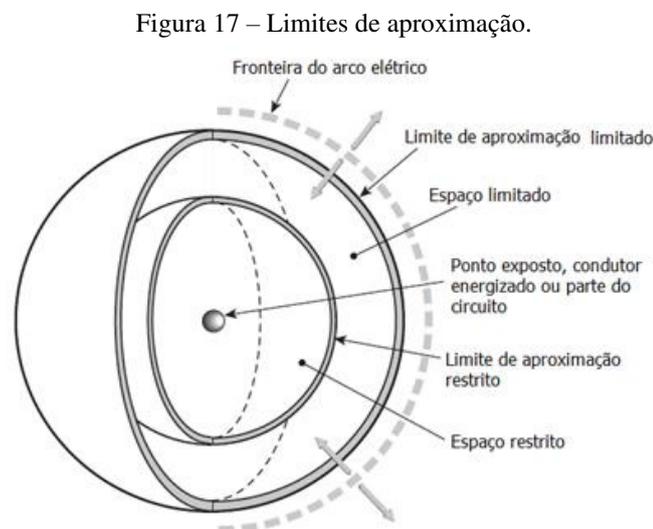
O Quadro 5 deve ser usado para determinar os equipamentos de proteção individual e vestimentas necessários. Esse quadro lista os requisitos para EPI com base nas categorias de 1 a 4 dos EPIs resistentes a arco voltaico. Essas roupas e equipamentos devem ser usados ao trabalhar dentro do limite de aproximação do arco elétrico (NFPA 70E, 2021).

3.4.5 Limites de aproximação

Os limites de aproximação para arco elétrico são as distâncias seguras mínimas de condutores energizados ou partes do circuito que têm potencial para um arco elétrico. Ao implementar e respeitar os limites de aproximação, poderá evitar e eliminar lesões causadas por incidentes com arco voltaico (NFPA 70E, 2021).

O limite mais distante deve ser a fronteira do arco elétrico. É aqui que, se ocorrer um arco elétrico, o trabalhador ficará exposto a um máximo de energia incidente de $1,2 \text{ cal/cm}^2$. Essa quantidade deve resultar no máximo em uma queimadura de segundo grau curável na pele exposta (NFPA 70E, 2021).

A norma NFPA 70E (2021) apresenta um modelo em 3D dos limites de aproximação mostrado na Figura 17.



Fonte: adaptado de NFPA 70E (2021).

A zona do ponto energizado até o limite de aproximação restrito é chamada de espaço restrito. Segundo a NFPA 70E (2021), somente podem cruzar essa zona pessoas treinadas, qualificadas e autorizadas, e que estejam utilizando equipamento de proteção individual apropriado. O limite de aproximação limitado é a distância de uma parte viva onde

existe um perigo de choque. Para ficar entre o limite do arco elétrico e o limite de aproximação limitada, um trabalhador deve ter o equipamento de proteção individual adequado.

As pessoas não qualificadas devem manter uma distância do ponto energizado, para manter-se em segurança. Essa distância é chamada de limite de aproximação limitado. Além disso, essas pessoas não devem cruzar o limite do arco elétrico, a menos que estejam usando roupas de proteção individual adequadas e estejam sob a supervisão de uma pessoa qualificada (NFPA 70E, 2021).

3.4.6 Limitações dos métodos de cálculo

Os métodos de cálculo mostrados nesse trabalho apresentam suas limitações de parâmetros. Deve-se observar quais metodologias a serem utilizadas de acordo com o tipo de sistema elétrico que for estudado. As limitações dos métodos são resumidas no Quadro 6, organizado pela norma NFPA 70E (2021):

Quadro 6 – Limitação dos métodos de cálculo.

Ano	Método de Cálculo	Limitações/ Parâmetros
1982	Ralph Lee	Calcula a energia incidente e a distância mínima do arco elétrico para ambiente aberto; é conservador acima de 600 V e torna-se mais conservador conforme a tensão aumenta.
2000	Doughty e Neal	Calcula a energia incidente para arcos em sistemas trifásicos de até 600 V; aplica-se para as correntes de curto-circuito entre 16 kA e 50 kA.
2018	IEEE 1584	Calcula a energia incidente e o limite de aproximação segura contra arco elétrico para 208 V até 15 kV; trifásico; 50 Hz a 60 Hz; corrente de curto-circuito de 500 A a 106 kA (208 V a 600 V); 200 A a 65 kA (600 V a 15 kV); distância típica entre condutores de 6,35 mm a 76,2 mm (208 V a 600 V) e 13 mm a 152 mm (601 V a 15 kV).

Fonte: adaptado de NFPA 70E (2021).

Observa-se, que os métodos de cálculo apresentam limitações quanto ao nível de tensão aplicada e quanto aos limites de corrente de curto-circuito, devendo atentar-se para qual método de cálculo se adequa ao sistema elétrico analisado.

3.5 Norma Regulamentadora nº 10 Segurança em Instalações Elétricas e Serviços com Eletricidade

A Norma Regulamentadora nº 10, com o título “Segurança em Instalações Elétricas

e Serviços com Eletricidade”, tem por objetivo realizar medidas de controle de segurança e prevenção de acidentes em serviços com eletricidade.

Entretanto, o conteúdo sobre proteção do risco do arco elétrico não é apresentado de forma direta. Todavia, o tema é citado no conteúdo programático, localizado no anexo de treinamento do curso básico da NR-10 (BRASIL, 2019), no item sobre riscos em instalações e serviços com eletricidade (QUEIROZ; SENGER; OLIVEIRA, 2012).

O item 10.2.1 da norma NR-10 (BRASIL, 2019, p. 1) obriga os trabalhadores a fazerem análise de risco antes de realizar tarefas em instalações elétricas. Essa medida de controle deve contemplar a avaliação de diversos tipos de riscos de acidentes, como, por exemplo, o arco elétrico.

A norma NR-10 (BRASIL, 2019) institui a obrigatoriedade do uso de vestimentas de proteção para trabalhos com eletricidade, conforme item 10.2.9.2: “10.2.9.2 as vestimentas de trabalho devem ser adequadas às atividades, devendo contemplar a condutibilidade, inflamabilidade e influências eletromagnéticas” (BRASIL, 2019, p. 1). As roupas, para trabalhos em eletricidade, devem ter características retardantes a chama, para proteção contra os efeitos do arco elétrico.

De acordo com Almeida e Goecking (2009), esse item da norma foi inserido devido aos inúmeros acidentes provocados pela exposição ao arco elétrico causando queimaduras aos trabalhadores da área de eletricidade.

No item 10.3.9.a, a norma NR-10 (BRASIL, 2019) exige que no memorial do projeto deve-se conter o dimensionamento adequado de proteção contra choques elétricos, queimaduras e outros possíveis riscos. Nesse contexto, como o arco elétrico é um fenômeno térmico que gera diversas consequências, como queimaduras, é necessário fazer um estudo do nível de energia incidente e elaborar soluções para reduzi-lo (QUEIROZ; SENGER; OLIVEIRA, 2012).

O item 10.12.1 obriga que as empresas desenvolvam procedimentos de emergência com relação ao serviço com eletricidade (BRASIL, 2019). Deve-se analisar todos os possíveis acidentes que podem ocorrer nessa ação, incluindo o risco de arco elétrico (QUEIROZ; SENGER; OLIVEIRA, 2012).

Segundo Almeida e Goecking (2009), o distanciamento de segurança estabelecido pela NR-10 (BRASIL, 2019), por meio das zonas controladas e de risco ao redor da fonte energizada, considera somente a proteção do risco de choque elétrico por contato direto. Para riscos específicos, como o arco elétrico, devem ser considerados outros estudos para análises de riscos.

Além disso, Almeida e Goecking (2009) explicam que mesmo as pessoas que estejam na zona livre podem ficar expostas aos efeitos do arco elétrico, de acordo com o nível de energia incidente, pois não há garantia de proteção do arco elétrico ao aplicar os limites de aproximação segura, segundo a NR-10 (BRASIL, 2019). Portanto, para determinar a real distância de uma posição segura à exposição do arco elétrico, deve-se calcular o limite de aproximação segura para arco elétrico, de acordo com normas vigentes.

3.6 ABNT NBR 16384-2020: Segurança em eletricidade

Em março de 2020, a ABNT publicou a norma técnica “ABNT NBR 16384: 2020 Segurança em eletricidade; Recomendações e orientações para trabalho seguro em serviços com eletricidade”. O objetivo da norma NBR 16384 (ABNT, 2020) é instruir recomendações importantes para que seja realizado com segurança dos trabalhadores todo serviço envolvendo a eletricidade, instalação, operação e manutenção e ensaios. De fato, a norma é aplicável em todos os serviços de eletricidade.

3.6.1 As recomendações da norma ABNT NBR 16384 com face ao arco elétrico

Vale ressaltar que em diversos pontos da norma ABNT NBR 16384 (ABNT, 2020) aparece com frequência o assunto sobre segurança contra o arco elétrico. Neste item, serão abordadas as recomendações da norma com foco na segurança contra o arco elétrico.

Um dos assuntos tratados nessa norma é a proposta de segurança na operação, que consiste na análise dos riscos antes de executar atividades com eletricidade, entre eles, o arco elétrico. Deve ser feita com ferramentas próprias e ser registrada nos procedimentos de operação, conforme a NBR 16384 (ABNT, 2020). Também se recomenda a utilização de equipamentos de proteção individual (EPI) adequados, dependendo do tipo de risco em que os operadores podem sofrer, como por exemplo, utilizar vestimentas de proteção contra risco térmico por arco elétrico (ABNT, 2020).

Nesse contexto, as vestimentas antichamas devem ser especificadas de acordo com o nível de energia incidente de cada equipamento do sistema elétrico, conforme método de cálculo de normas reconhecidas. Vale ressaltar que, na hierarquia de medidas de controle de riscos, a utilização dos EPIs é a menos eficiente na segurança contra o arco elétrico. Portanto, deve-se providenciar medidas de redução dos níveis de energia incidente (ABNT, 2020).

A norma propõe, para segurança em elétrica, realizar avaliação, compras e

utilização de vestimentas retardantes a chama de boa qualidade, de acordo com os níveis de energia incidente.

Além disso, a norma NBR 16384 (ABNT, 2020) aconselha treinamentos e capacitação aos trabalhadores sobre primeiro socorros e acidentes de origem elétrica, como choque elétrico e queimaduras originadas por arco elétrico.

É recomendada a elaboração de procedimento de segurança, como estudos dos níveis de energia incidente e a avaliação dos riscos de formação de arco elétrico, para cada tipo de operação, também quando houver alterações no sistema de geração, nos arranjos da rede de distribuição ou nos ajustes dos sistemas de proteção, e que essas informações dos valores obtidos sejam inseridas em diagramas unifilares atualizados (ABNT, 2020).

Para a parte de sinalização, é recomendada a fixação de etiquetas de sinalização nos sistemas elétricos, contendo informações sobre os riscos existentes, incluindo o nível de energia incidente do arco elétrico e o limite de aproximação segura (ABNT, 2020). A Figura 18 mostra um exemplo de placa de segurança.

Figura 18 – Exemplo de placa de segurança – Risco de choque e arco elétrico.



Fonte: NBR 16384 (ABNT, 2020).

Em instalações de baixa e alta tensão, convém utilizar, além de outros procedimentos de segurança, EPIs resistentes a arco, conforme nível de energia incidente calculado, para evitar acidentes, caso haja contato nas fontes energizadas (ABNT, 2020).

Para sistemas de extra-baixa tensão eletricamente separados da terra e serviços onde não há riscos de arco elétrico, recomenda-se adotar o uso de vestimentas de proteção e luvas de proteção contra arco elétrico, com nível de proteção AE-2 (ABNT, 2020).

Em painéis elétricos com tensão igual ou menor do que 240 V, excluindo os que são alimentados por transformadores com potência nominal maiores do que 125 kVA, não

precisa realizar o estudo de energia incidente (ABNT, 2020).

Para segurança em painéis elétricos, a norma NBR 16384 (ABNT, 2020) não recomenda trabalhos em painéis energizados, quando o nível da energia incidente for maior que 40 cal/cm², pois não há vestimentas antichamas que protegem os trabalhadores nessa situação.

Recomenda-se analisar e mitigar os níveis de energia incidente dos painéis elétricos existentes, mesmo que ocorra perda de seletividade e coordenação. Por exemplo, realizar ajustes no tempo de atuação dos dispositivos de proteção e instalar relés detectores de arco elétrico (ABNT, 2020).

Se não forem implantadas as recomendações de redução dos níveis de energia incidente, deve-se desenergizar os painéis, antes de qualquer intervenção neles. Quando o nível de energia incidente for igual ou maior do que 8 cal/ cm², é recomendado que os serviços nesses sistemas elétricos sejam realizados em duplas. No Anexo E da norma, são apresentadas orientações de vestimentas retardantes a chama e EPIs contra o arco elétrico (ABNT, 2020).

A norma recomenda que a vestimenta de proteção contra os efeitos térmicos de um arco elétrico apresenta nível de proteção superior ao nível de energia incidente calculado para cada painel elétrico. Há os níveis de proteção AE-1, AE-2, AE-3 e AE-4.

O Quadro 7 mostra as orientações para aplicação de vestimentas retardantes a chama contra o arco elétrico:

Quadro 7 – Orientações para aplicação de vestimentas de proteção contra os efeitos térmicos de um arco elétrico.

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 eletricista e conjunto impermeável, (quando aplicável).
AE-3	Calça de manobra e blusão de manobra, capuz tipo carrasco, luva de tecido em sobreposição à luva isolante, quando aplicável, e calçado de segurança para eletricista
AE-4	Calça de manobra e blusão de manobra, capuz tipo carrasco, luva de tecido em sobreposição à luva isolante, quando aplicável, e calçado de segurança para eletricista.

Fonte: adaptado de ABNT NBR 16384 (ABNT, 2020).

O Quadro 7 apresenta recomendações de vestimentas de proteção contra arco elétrico. De acordo com faixa de proteção, é escolhido o nível de proteção superior ao valor da energia incidente calculada em cada painel elétrico. a partir do cálculo de energia incidente (MARTINHO, 2020).

4 MÉTODOS E DISPOSITIVOS PARA REDUÇÃO E PROTEÇÃO DO ARCO ELÉTRICO

Neste capítulo, serão apresentados o processo de gerenciamento e análise de riscos; a hierarquia do método de controle de risco segundo a norma NFPA 70E (2021); alguns métodos para mitigar os riscos de arco elétrico, como redução dos níveis de curto-circuito e do tempo de arco elétrico; e métodos para proteção contra o arco elétrico, como os painéis resistentes a arco interno e o dimensionamento das vestimentas retardantes a chama e EPI resistente a arco.

4.1 Gerenciamento de risco

O gerenciamento de risco, segundo a norma NFPA 70E (2021), apresenta uma análise de risco, que é um processo global de identificação de riscos, estimativa da probabilidade de ocorrência e do potencial de severidade do prejuízo ou danos à saúde, e determinação da necessidade de medidas de proteção.

A norma NFPA 70E (2021) exige que as análises de risco sejam realizadas antes da execução de uma tarefa. Deve-se identificar os riscos associados à tarefa.

Uma vez que um risco é identificado, é necessário determinar se há risco de danos à saúde. Os procedimentos de avaliação de risco identificam os riscos, estima a probabilidade de ocorrência de lesão, estima a gravidade potencial da lesão e determina se medidas de proteção são necessárias (NFPA 70E, 2021).

A norma NFPA 70E (2021) apresenta a hierarquia dos métodos de controle de risco como um texto mandatório, devido a sua importância. O procedimento de avaliação de risco deve exigir que métodos de controle de risco preventivo sejam implementados de acordo com a seguinte hierarquia:

1. Eliminação;
2. Substituição;
3. Controles de Engenharia;
4. Conscientização;
5. Medidas Administrativas;
6. Utilização de EPI;

Se a avaliação estiver sendo conduzida antes da seleção ou instalação de equipamentos, a eliminação, a substituição e os controles de engenharia podem ser possíveis.

A conscientização requer conhecimento e possível revisão das qualificações e treinamento dos funcionários para a tarefa específica que está sendo avaliada. Um procedimento detalhado para a tarefa e equipamento específico precisa ser desenvolvido sob controles administrativos para lidar com os perigos e riscos remanescentes (NFPA 70E, 2021).

A implementação de qualquer um desses controles pode exigir outra execução da avaliação para determinar sua eficácia. Depois disso, é possível especificar o EPI necessário.

Ao determinar o risco de arco voltaico, deve-se escolher um método de seleção de EPI, usando o Método da Categoria de EPI, o valor mínimo de EPI é de Categoria 1, com energia incidente mínimo de 4 cal/cm²; utilizando o Método da Análise de Energia Incidente, o ATPV mínimo para escolha de EPI resistente a arco é de 1,2 cal/cm². Isso requer alguma decisão por parte da pessoa que conduz a avaliação de risco (NFPA 70E, 2021).

Os controles de eliminação, substituição e de engenharia são os métodos mais eficazes para reduzir o risco, pois geralmente são aplicados na origem do perigo e são menos suscetíveis a serem afetados por erro humano (NFPA 70E, 2021).

A conscientização, os controles administrativos e os EPIs são os métodos menos eficazes para reduzir o risco, pois não são aplicados na fonte e têm maior probabilidade de serem afetados por erro humano (NFPA 70E, 2021).

Nesse contexto, com relação ao arco elétrico, é importante reduzir a corrente de arco, ou o tempo de duração do arco, para os trabalhadores não serem expostos a níveis de energia incidente elevados, se possível, evitar que ocorra. Buscar trabalhar na eliminação, na substituição, no controle de engenharia, na conscientização do risco, no controle administrativo, caso tudo falhe, utilizar a última barreira de proteção, o EPI (NFPA 70E, 2021).

De fato, o objetivo dessas avaliações é evitar danos ou morte de uma pessoa. O empregador desenvolve os procedimentos de avaliação de risco a serem usados. Esses procedimentos devem identificar os riscos, estimar a probabilidade de ocorrência de lesões, estimar a gravidade potencial das lesões e determinar as medidas de proteção necessárias. Para isso, a pessoa que realiza a avaliação de risco deve ser competente (NFPA 70E, 2021).

Vale ressaltar que é essencial que os engenheiros responsáveis pela segurança dos trabalhadores e dos equipamentos conheçam métodos, equipamentos, dispositivos e técnicas para melhorar a segurança relativa ao risco de arco elétrico, além de realizar medidas de controle de risco para classificar quais métodos são mais efetivos e os menos efetivos (MARDEGAN; PARISE, 2018e).

Na Figura 19, é apresentada a hierarquia de controle de riscos a partir do que a norma NFPA 70E (2021) explana. Nela, são mostradas as medidas mais efetivas, como a

eliminação e a substituição, até às medidas menos efetivas, como o uso dos EPIs.

Figura 19 – Hierarquia de controle de riscos (adaptado da NFPA 70E, 2021).



Fonte: adaptado de Park (2018).

Nesse contexto, deve ser prioridade para os responsáveis do setor elétrico, garantir a segurança dos funcionários durante o trabalho em sistemas elétricos. Voltimum (2020) apresentou recomendação de análise de risco preliminar, dividida em cinco fases para a analisar e controlar os riscos de arco elétrico.

A primeira fase é a avaliação da probabilidade de um arco acidental e o risco associado de ferimentos pessoais. A segunda fase é realizar uma avaliação da capacidade de atuação dos dispositivos de proteção e os seus tempos de atuação, se eliminam o arco. A terceira fase é utilizar o método de cálculo e verificar se o valor calculado ultrapassa ou não o nível de proteção dos EPIs. A quarta fase é implementar medidas de controle para auxiliar na redução e proteção contra o arco elétrico, diminuindo os acidentes. E a quinta fase é realizar avaliação sobre os riscos residuais (VOLTIMUM, 2020).

Para a proteção dos trabalhadores e dos equipamentos contra os efeitos do arco elétrico, é necessário reduzir a energia incidente. Dois grandes fatores influenciam na energia incidente: a corrente de curto-circuito e o tempo de eliminação da falta. Portanto, deve-se fazer

os estudos de curto-circuito e de seletividade para estimar os valores da energia incidente e avaliar meios para mitigá-los (MARDEGAN, PARISE, 2018g)

Na Figura 20, são mostrados ensaios de eliminação da falta, um com tempo de 500 ms e o outro com tempo de 35 ms. No primeiro, há maior destruição do local, devido ao poder destrutivo do arco e o longo tempo de eliminação do arco. No segundo, percebe-se que quando reduziu o tempo, a destruição do equipamento foi amenizada (MARDEGAN, 2011).

Figura 20 – Importância do tempo de eliminação da falta.



Fonte: Mardegan (2011).

Vale ressaltar que no mercado há uma variedade de métodos e equipamentos que podem auxiliar na redução de níveis de corrente de curto-circuito e reduzir o tempo de duração do arco. Nesse contexto, serão mostrados alguns métodos e dispositivos que reduzem e protegem dos efeitos do arco elétrico e os equipamentos de proteção individual para proteger os trabalhadores.

4.2 Redução dos níveis da corrente de curto-circuito

A corrente de falta por arco elétrico depende, principalmente, da corrente de curto-circuito. Quanto maior o nível da corrente de falta, maior será o valor da corrente de arco, e, conseqüentemente, o valor da energia incidente aumenta.

Vale ressaltar que no sistema elétrico pode haver o aumento do curto-circuito durante sua operação, que ultrapassa a capacidade nominal dos equipamentos. Por exemplo, quando ocorre a elevação da potência instalada e a interligação de sistemas envolvem a

instalação de novos equipamentos (MARDEGAN, 2012).

Mesmo se os dispositivos de proteção tradicionais, como relés e disjuntores forem dimensionados corretamente para suportar a corrente de curto-circuito, poderá, ainda, haver danos no sistema (G&W ELECTRIC, 2019b). Além disso, para substituir os equipamentos existentes, como painéis elétricos e condutores, devido ao aumento da corrente de curto-circuito, requer, muitas vezes, um alto custo financeiro e uma boa logística, devido à sua complexidade, o que pode inviabilizar essa ação (MARDEGAN, 2012).

De fato, reduzindo a corrente de falta, diminuirá a corrente de arco. Supondo também que a duração do curto-circuito não aumente, a exposição à energia incidente resultante será reduzida (PIERRE *et al.*, 2015).

Portanto, deve-se realizar medidas para limitar os valores da corrente de curto-circuito. No entanto, os métodos, em sua maioria, necessitam de grandes investimentos financeiros nas instalações, e a melhor solução seria utilizá-los durante a produção do projeto inicial (RESENDE, 2016).

Assim, serão apresentadas algumas alternativas para reduzir a magnitude da corrente de curto-circuito.

4.2.1 Instalação de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito (DLCCs)

Os dispositivos limitadores de corrente de curto (DLCCs) têm por objetivo limitar as correntes de falta que superam os valores nominais dos equipamentos, como disjuntores e condutores, e evitar que esses equipamentos sofram danos. Ao instalar um DLCC, pode evitar a substituição desses equipamentos (TRINDADE, 2019)

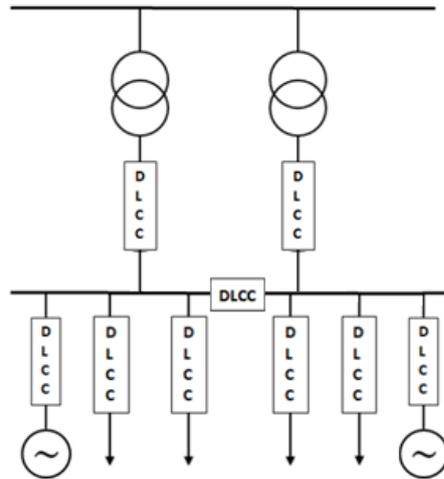
Dentre os DLCCs utilizados na indústria, estão os reatores limitadores de curto-circuito (RLCCs), os dispositivos pirotécnicos e o protetor de limitação de corrente.

4.2.1.1 Reatores limitadores de curto-circuito

Os RLCCs, quando instalados na rede, reduzem as faltas devido à grande queda de tensão nos seus terminais, porém, como essa queda de tensão é permanente, já que esses reatores limitadores de curto permanecem instalados, resultará sempre em perdas durante seu funcionamento, eles apresentam baixo custo de instalação (TRINDADE, 2019)

A Figura 21 representa as possíveis instalações dos reatores limitadores de curto-circuito em um sistema elétrico:

Figura 21 – RLCCs instalados em série com os circuitos alimentadores, em série com circuitos de saída e seccionando uma barra.



Fonte: adaptado de Trindade (2019).

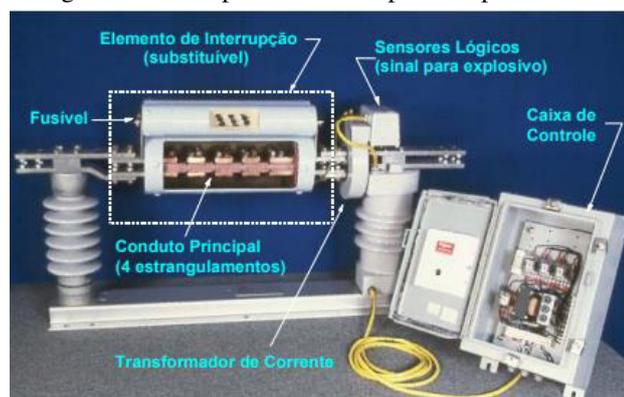
Os RLCCs podem apresentar as seguintes instalações em um sistema elétrico: conectados em série com os transformadores, com os geradores e com os circuitos de saída e seccionando um barramento (TRINDADE, 2019).

4.2.1.2 Dispositivos pirotécnicos

Os dispositivos pirotécnicos são equipamentos que interrompem altas correntes de falta no local onde são instalados, geralmente em série com os geradores. Sua grande vantagem é que o tempo de acionamento é muito rápido devido à sua construção de sistema de interrupção, composto por cargas explosivas, sensores e fusíveis. Evitando que equipamentos se danifiquem, pois esses dispositivos atuam antes dos disjuntores (MONTEIRO, 2005; TRINDADE, 2019).

A Figura 22 mostra um dispositivo pirotécnico e seus componentes:

Figura 22 – Componentes do dispositivo pirotécnico.



Fonte: Monteiro (2005).

O dispositivo pirotécnico é acionado quando o valor da corrente de curto-circuito for acima da capacidade dos disjuntores, ressaltando que ele não substitui os dispositivos de proteção convencional (MONTEIRO, 2005).

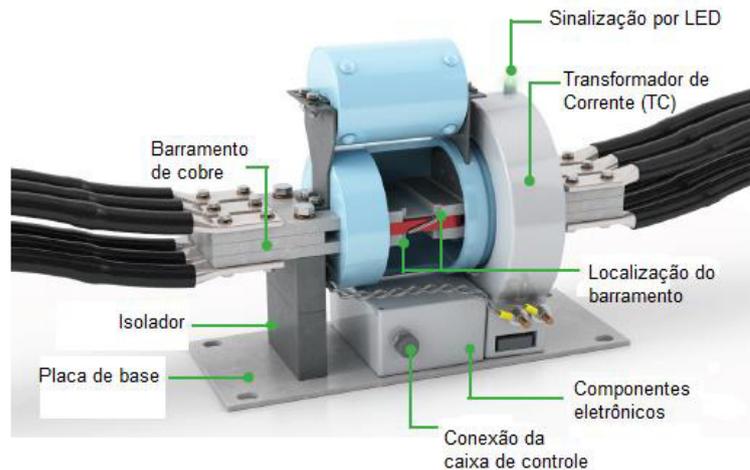
4.2.1.3 Protetor de limitação de corrente

O protetor de limitação de corrente, ou CLiP-LV, limita a corrente durante a operação do sistema, isso o torna uma solução econômica para proteger contra interrupções de curto-circuito sem a necessidade de adicionar novos equipamentos. É um dispositivo de proteção de sobrecorrente exclusivo que interrompe a corrente de falta potencialmente prejudicial, limitando significativamente o dano potencial (G&W ELECTRIC, 2019b).

Além disso, o CLiP-LV ajuda a evitar que as correntes excedam os valores nominais dos equipamentos, impedindo falhas catastróficas, reduzindo drasticamente as elevações das correntes de falta, minimizando os danos e protegendo as pessoas dos riscos de arco voltaico (G&W ELECTRIC, 2019b).

A Figura 23 apresenta os componentes do protetor de limitação de corrente:

Figura 23 – Componentes do protetor de limitação de corrente.



Fonte: adaptado de G&W Electric (2019b).

O CLiP-LV é uma forma de comutação eletrônica que limita a corrente de curto-circuito. Ele interromperá a corrente de falta que passa por ele antes que a primeira corrente de pico seja atingida, reduzindo significativamente a corrente de curto (G&W ELECTRIC, 2019b).

Um Transformador de Corrente (TC) embutido fornece valores de corrente em tempo real para os componentes eletrônicos internos. O CLiP-LV tem um ajuste de pickup

instantâneo ajustável em campo, conhecido como nível de disparo. Se a corrente exceder o nível de disparo definido pelo usuário, um sinal é enviado pela lógica de disparo para interromper a corrente (G&W ELECTRIC, 2019b).

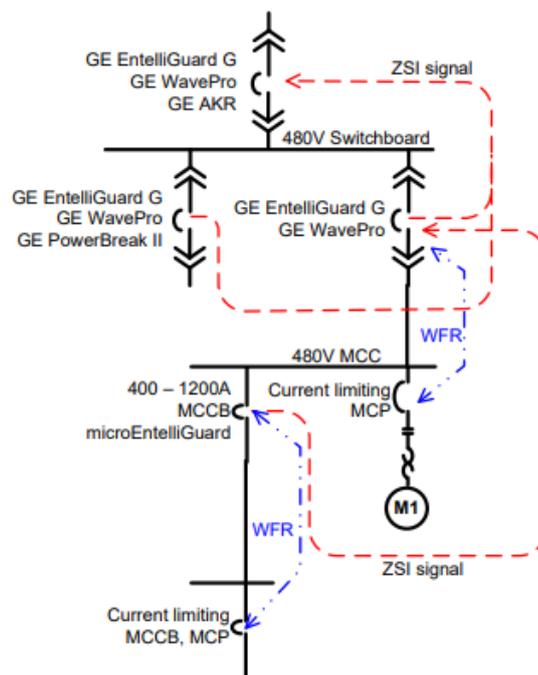
Um barramento de cobre transporta a corrente, que é aberta durante condições de sobrecorrente, enquanto um fusível limitador de corrente conectado em paralelo interrompe a falta. Esse equipamento é utilizado para mitigação de arco elétrico pois reduz a corrente de curto-circuito e o tempo de eliminação, diminuindo, assim, a energia incidente e reduzindo os danos causados pela ação do arco elétrico (G&W ELECTRIC, 2019b).

4.2.2 Instalação de disjuntores de baixa tensão com WFR (Waveform Recognition)

O *Waveform Recognition* (WFR) que significa Reconhecimento da Forma de Onda, é um algoritmo instalado em disjuntores de baixa tensão, com o objetivo de proteção contra faltas. Ele possui tempo de atuação muito rápido, com alta sensibilidade e não perde a seletividade com outros equipamentos de proteção. Além disso, pode fornecer proteção instantânea. Não há necessidade de estudos de seletividade, pois depende somente do disjuntor que o algoritmo foi instalado (ABB, 2021).

A Figura 24 apresenta a aplicação do WFR no sistema:

Figura 24 – Aplicação do WFR no sistema.



Fonte: Wright, D'Mello e Cuculic ([201-?]).

O princípio de funcionamento do WFR é fazer com que o disjuntor examine a forma de onda, e quando houver o aumento da corrente de falta, o disjuntor dispara, além de não fazer comunicação com o dispositivo de proteção a montante. É recomendado para disjuntores mais próximos às cargas terminais, devido ao tempo de disparo ser muito rápido (MARDEGAN; PARISE, 2018d).

4.3 Redução do tempo de eliminação do arco

Um outro método para mitigar a energia incidente é reduzir a duração do tempo de eliminação de um arco. O tempo de arco pode ser reduzido de várias maneiras.

Algumas técnicas de redução do tempo de eliminação do arco para melhorar a proteção de pessoas quanto a esse risco: ajuste adequado do disjuntor de baixa tensão, substituição de relés eletromecânicos por digitais, utilização de relés digitais com ajustes otimizados, utilização de seletividade lógica com relés digitais, utilização de relés detectores de arco, utilização de sensores de arco acoplados a relés de arco durante operação (MARDEGAN, 2012). Neste trabalho, serão apresentados alguns métodos.

4.3.1 Estudo de seletividade cronológica

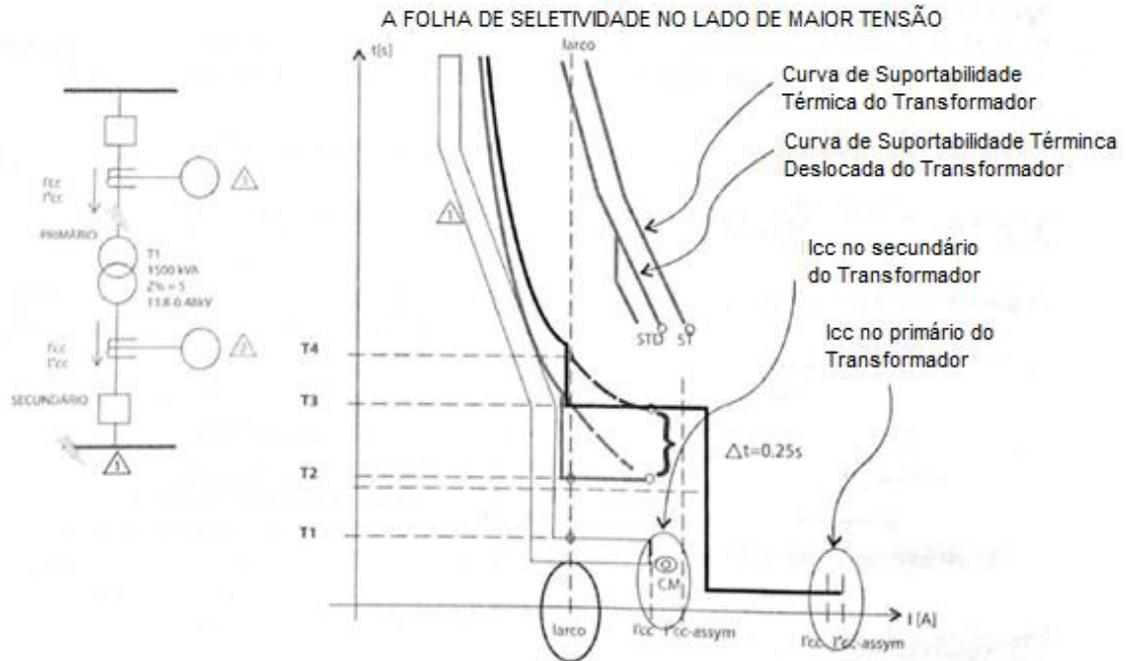
O estudo de seletividade cronológica tem por objetivo avaliar os tempos de atuação dos dispositivos de proteção a jusante e a montante em um barramento, otimizando a seletividade e a coordenação do sistema (MARDEGAN, 2011).

Nesse contexto, segundo Resende (2016), para o estudo da duração do arco elétrico em um barramento, deve ser analisado o tempo de atuação do dispositivo de proteção a montante desse local. Se o tempo avaliado for longo, o nível de energia incidente pode ser alto. Assim, uma opção seria reduzir esse tempo de atuação.

Um outro método para redução do tempo de atuação dos dispositivos é a aplicação de relés digitais com ajustes otimizados, utilizando-se três estágios de sobrecorrente para que o tempo de eliminação da falta seja o mesmo tanto na falta franco como na falta por arco. Isso pode reduzir consideravelmente o nível de energia incidente, além dos danos aos equipamentos e às pessoas (MARDEGAN, 2011).

A Figura 25 mostra a aplicação dos relés digitais com ajustes otimizados. Nesse exemplo, os tempos de atuação dos dispositivos de proteção seriam T2 e T3 (MARDEGAN, 2012).

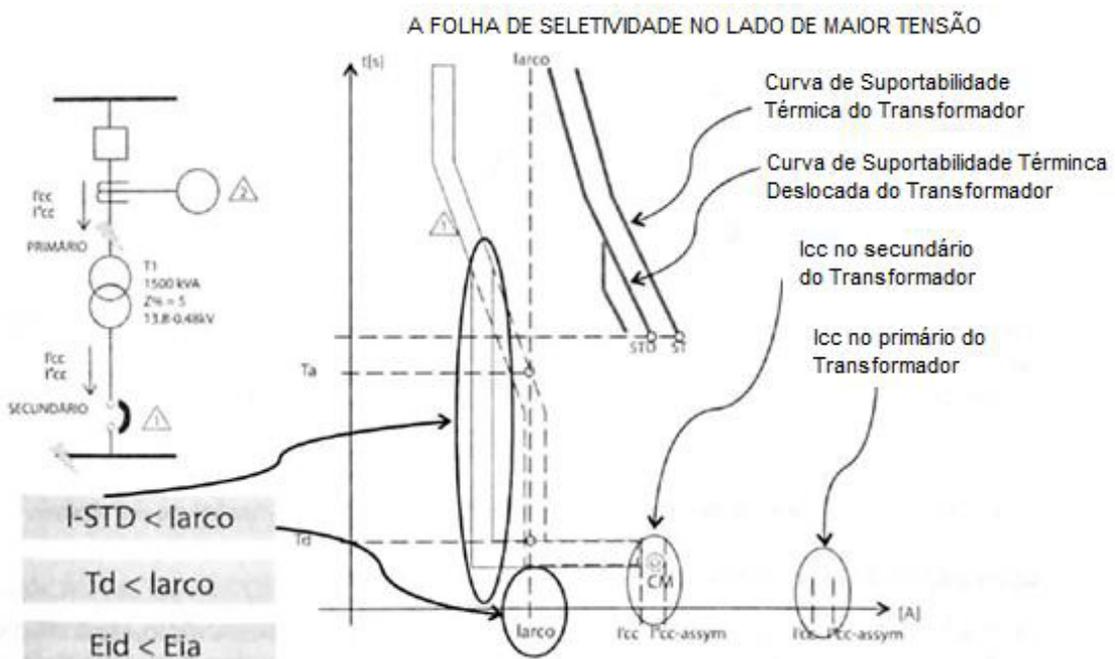
Figura 25 – Ajustes com relés digitais, utilizando-se três estágios.



Fonte: Mardegan (2012).

Na Figura 26, é apresentado um exemplo de técnica de seletividade cronológica, em que é ajustado o tempo dos disparadores de baixa tensão abaixo a corrente de arco elétrico. Depois desse ajuste, o valor da energia incidente ficará menor, pois o tempo do arco é reduzido (MARDEGAN, 2012).

Figura 26 – Ajuste da corrente de Short-Time Delay abaixo da corrente de arco.



Fonte: Mardegan (2012).

Portanto, caso seja implementado o estudo de redução do tempo de atuação dos dispositivos a montante, deve-se atentar na possibilidade de descoordenação e atuação inadequada do sistema de proteção e de impactos negativos na rede, como perda de produção (COELHO, 2018).

No entanto, ao reduzir o tempo de atuação do dispositivo de proteção a montante, poderá ocorrer perda de seletividade no ponto analisado, com os dispositivos de proteção a jusante (RESENDE 2016).

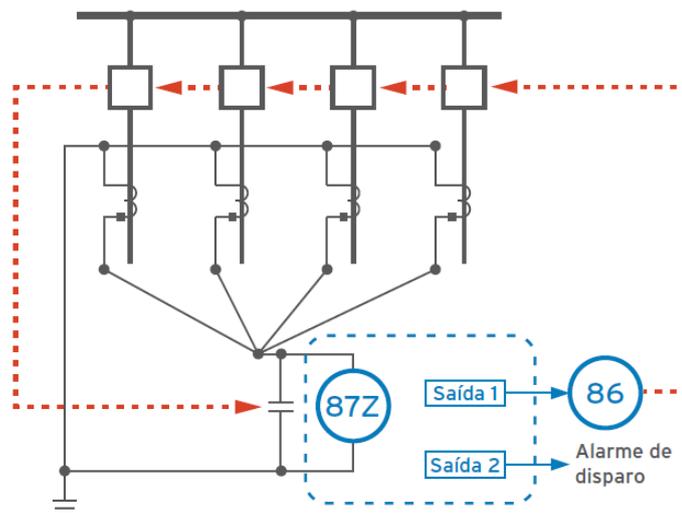
4.3.2 Instalação de relés diferenciais de barramento

O sistema de relés diferenciais de barramento é baseado na Primeira Lei de Kirchhoff, Lei dos Nós, onde o somatório das correntes que entra e que saem em um nó é igual a zero. a saída. No caso de um sistema elétrico, considera-se um barramento ou uma zona de proteção como sendo um nó. Em condições normais, a soma das correntes é zero. Caso ocorra uma falta nessa zona, como um arco elétrico, o resultado do somatório é diferente de zero (SEL, 2018).

Nesse contexto, os relés diferenciais de barramento são utilizados para detectar essas condições anormais, como o arco elétrico. Existem dois tipos: relés diferenciais de barramento de alta impedância e de baixa impedância (SEL, 2018).

A Figura 27 apresenta a aplicação dos relés diferenciais de barramento em um sistema:

Figura 27 – Aplicação dos relés diferenciais de barramento.



Fonte: SEL (2018).

Os relés diferenciais de barramento de alta impedância são instalados com os transformadores de corrente em paralelos, conectados em um mesmo barramento. Quando ocorrer uma diferença na corrente, gera uma queda de tensão no relé diferencial, devido à sua alta impedância. Esse relé apresenta sensibilidade na detecção de falta com arco elétrico (SEL, 2018).

Os relés diferenciais de barramento de baixa impedância não necessitam de transformadores de corrente próprios. Esses relés operam somando fasorialmente as correntes normalizadas das entradas do TC, criando uma corrente de operação, I_{OP} , além de criar uma corrente de restrição, I_{RT} . O relé atua quando a corrente de operação ultrapassa um limite mínimo da corrente de restrição (SEL, 2018).

4.3.3 Intertravamento seletivo de zona

Em sistema de baixa tensão, uma opção para reduzir o tempo de atuação dos dispositivos de proteção é o uso do intertravamento seletivo de zona. Esse sistema, também chamado de ZSI, utiliza a seletividade com os disjuntores do alimentador a jusante. Um sistema ZSI fornece um caminho de comunicação entre os disjuntores do alimentador e os disjuntores principais para que a unidade de disparo a montante receba um “sinal de restrição” indicando que um dispositivo de disparo a jusante também detectou a falta (PIERRE *et al.*, 2015).

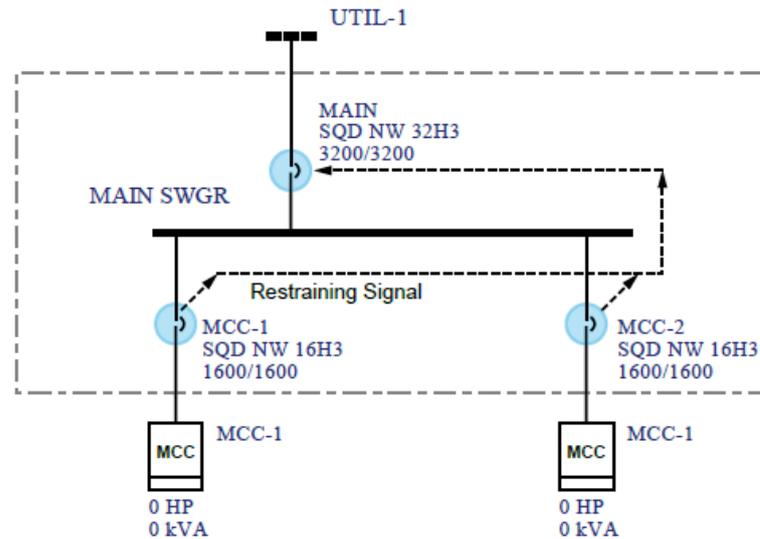
Quando o dispositivo a montante recebe este sinal, ele opera em sua curva operacional normal que se coordena com os dispositivos a jusante. No entanto, se a falta estiver no barramento principal, nenhum dos relés do disjuntor do alimentador detectará esta falta e nenhum sinal de restrição será recebido pelo relé do disjuntor principal (PIERRE *et al.*, 2015).

Se nenhum sinal de restrição for recebido, a unidade de desarme principal operará em uma função de desarme de curta duração, com o mínimo de atraso necessário para permitir que o processamento do sinal ocorra. Este tempo de trip mais rápido resulta em níveis significativamente mais baixos de arco voltaico para faltas que ocorrem no barramento principal (PIERRE *et al.*, 2015).

O ZSI é totalmente automático e fornece seletividade completa em todos os momentos entre o disjuntor principal e os disjuntores do alimentador. No entanto, o ZSI é limitado a disjuntores de baixa tensão e não pode ser aplicado em disjuntores de caixa moldada (PIERRE *et al.*, 2015).

Na Figura 28 é mostrada a aplicação do ZSI no sistema, onde o disjuntor principal e os dois disjuntores do alimentador são equipados com Intertravamento Seletivo por Zona (ZSI) (PIERRE *et al.*, 2015).

Figura 28 – Aplicação do ZSI no sistema.



Fonte: Pierre *et al.* (2015).

Para uma falta no barramento do quadro elétrico principal, o disjuntor principal não recebe um sinal de restrição de nenhum dos disjuntores do alimentador e, portanto, opera em sua curva de corrente de tempo não restrita “rápida”. Isso resulta em uma eliminação da falta muito mais rápida e uma redução significativa da energia incidente do arco (PIERRE *et al.*, 2015).

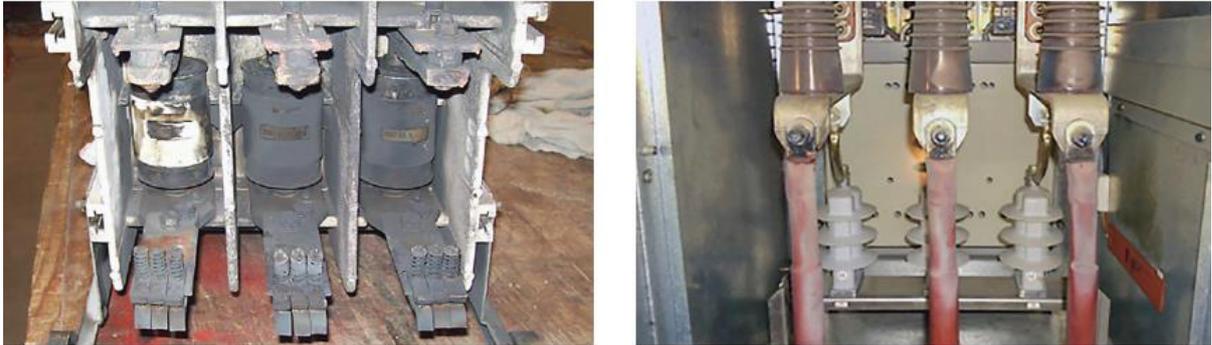
4.3.4 Instalação de relés de proteção contra arco elétrico

Uma outra solução é a instalação de dispositivos detectores de arco elétrico. Os relés detectores de arco apresentam tempo de resposta para eliminação do arco muito rápido, o que contribui para a redução do nível da energia incidente, além de diminuir os danos no sistema e nas pessoas.

De acordo com Queiroz e Senger (2012e), a implementação de relés de proteção contra arco elétrico colabora com a redução do tempo de eliminação do arco, diminuindo a energia incidente. Essa mitigação contribui com a segurança dos operadores e evita danos na instalação elétrica, como possíveis explosões devido ao arco, além de reduzir as exigências de EPIs resistentes a arco.

Na Figura 29, é mostrada a comparação de dois sistemas após a ocorrência do arco elétrico, em testes de laboratório da *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL). O primeiro sem relé detector de arco e o segundo com a instalação do relé detector de arco:

Figura 29 – Comparativo de sistemas sem e com relé detector de arco após a ação de um arco elétrico.



Fonte: SEL (2018).

A primeira foto mostra um contator do conjunto de manobra após a ação de arco elétrico, somente com a proteção de sobrecorrente. Isso ocasionou danos, necessitando trocar alguns equipamentos, como contator, cliques de fusíveis, barramento de cobre, condutores, entre outros. Na segunda foto, houve a instalação de um relé detector de arco, com sensor ótico, e após a ação do arco elétrico, o relé foi acionado, e houve danos pontuais nos parafusos e terminais dos cabos. O que demonstra a eficiência e eficácia desse equipamento (SEL, 2018).

De acordo com a SEL (2018), ao utilizar o sistema de detector de arco, há maior segurança e minimização de danos quando ocorre o fenômeno do arco elétrico, tanto em equipamentos, quanto nos operadores, além de redução dos gastos de manutenção e de substituição de equipamentos.

De fato, quando ocorre o fenômeno do arco elétrico, um dos elementos que aparecem durante a explosão, é a irradiação de luz intensa. A arquitetura dos relés detectores de arco apresenta sensores de luminosidade que capta o sinal luminoso, processa e envia esse sinal para seccionar o circuito e eliminar o arco em um curto intervalo de tempo. Além disso, não há necessidade de coordenar o relé com outros dispositivos de proteção, portanto, não compromete a coordenação de seletividade das proteções do sistema (RESENDE, 2016).

Com efeito, o princípio de funcionamento de um sistema de detecção de arco voltaico é: a unidade de processamento processa os sinais recebidos pelo sensor de fibra ótica ou sensores pontuais, que são instalados dentro do equipamento a ser protegido. Quando ocorre uma falta por arco, o sensor detecta a luz proveniente do arco, manda um sinal para o relé, e desarma o dispositivo de proteção a montante, em um pequeno intervalo de tempo (MARDEGAN; PARISE, 2018d).

Na Figura 30, é mostrada a sequência, em três etapas, do funcionamento do sistema detector de arco. Iniciando com a detecção da luz do arco no sensor ótico, depois há o

reconhecimento da intensidade da luz através do relé e finalizando com o envio do sinal para desarme do dispositivo de proteção (ABB, 2010):

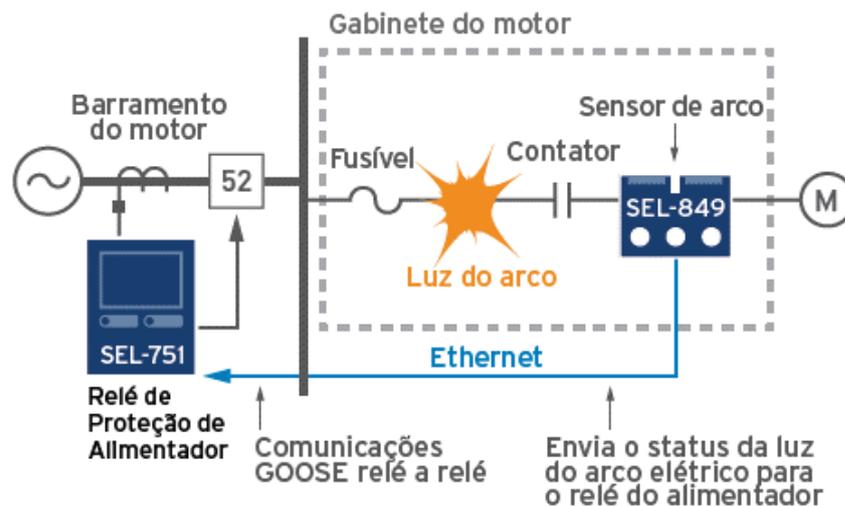
Figura 30 – Funcionamento do relé dentro de um painel elétrico.



Fonte: ABB (2010).

A Figura 31 mostra um esquema unifilar simplificado do funcionamento do relé detector de arco, do fabricante SEL:

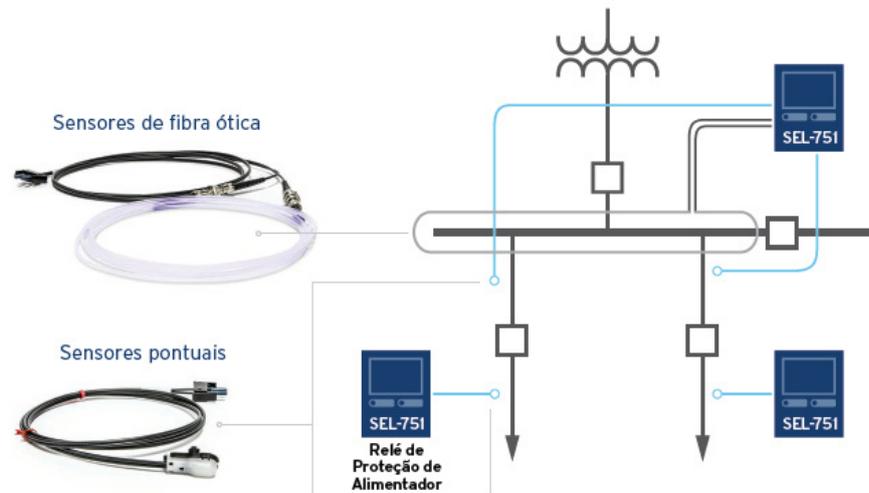
Figura 31 – Relé detector de luz de arco instalado com relé contra sobrecorrente.



Fonte: SEL (2018).

Na Figura 32, são apresentados os esquemas de ligação dos sensores de fibra ótica e dos sensores pontuais do fabricante SEL.

Figura 32 – Instalação dos sensores ótico e pontuais do fabricante SEL.



Fonte: SEL, 2018.

Os sensores de fibra ótica detectam a luz vinda do arco elétrico ao longo de toda a sua superfície, sendo utilizados em áreas extensas de um painel, oferecendo uma proteção mais ampla. Os sensores pontuais também detectam a luminosidade de um arco elétrico, são instalados em vários locais de um painel, no entanto, apresenta limitação da área de cobertura da proteção contra arco, é usado em áreas confinadas, como compartimentos de disjuntores (SEL, 2018).

Na Figura 33, é apresentado em que fase um sensor ótico atua, que compõe um sistema de proteção contra arco, do modelo Zyggot Arco (VARIXX, 2021):

Figura 33 – Aplicação do sensor ótico do relé detector de arco.



Fonte: Varixx (2021).

Esse sensor detecta a radiação ultravioleta, durante a fase de compressão, que é iniciada com a abertura do arco, mandando um sinal de trip, e eliminando a falta por arco em um tempo muito rápido. Isso ocorre antes da fase de expansão, com a luz visível, protegendo, assim, as instalações elétricas e os trabalhadores. Além de não atuar com a luz ambiente, pode ser instalado nos painéis de diversos níveis de tensão (VARIXX, 2021).

Desse modo, o relé detector de arco apresenta uma grande eficiência para redução da energia incidente e para proteção dos operadores contra os riscos de explosão de arco elétrico. Existem diversos tipos de arquiteturas usuais, dependendo do tipo de instalação elétrica e de sua aplicação (QUEIROZ; SENGER, 2012e).

4.4 Painéis resistentes a arco elétrico

Dentro de painéis elétricos de baixa e média tensão, CCMs, conjuntos de manobra e controle de média tensão, entre outros, poderá haver falhas que geram arcos elétricos e expansão de gases, destruindo a estrutura interna, causando danos mecânicos e térmicos, podendo ocasionar grandes acidentes, até com pessoas. Diversos fatores podem provocar esse fenômeno, dentre eles: falhas de isolamento; sobretensões devido a manobras em disjuntores; ausência de manutenção adequada (QUEIROZ; SENGER; MORAES, 2012).

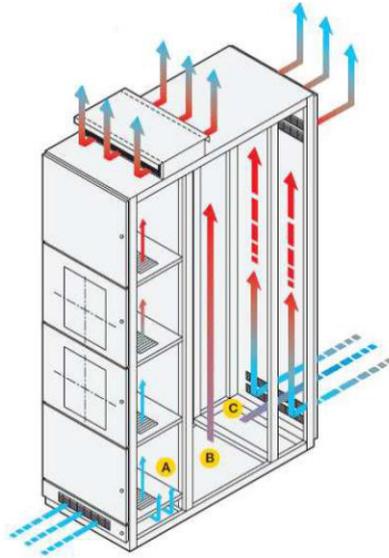
Nesse contexto, uma outra aplicação de medidas de engenharia para proteção contra arco elétrico são os painéis resistentes a arco interno. Esses painéis apresentam características construtivas que suportam o arco voltaico, oferecendo garantia de segurança operacional e durabilidade do equipamento e das instalações. Complementando a proteção contra o fenômeno do arco elétrico, recomendam-se instalar detectores de arco no interior dos painéis, para reduzir a energia incidente e evitando danos mais graves (QUEIROZ; SENGER; MORAES, 2012).

De fato, uma das características de um painel resistente a arco interno é a separação física de seus compartimentos, chamados também de gavetas ou unidades funcionais (WEG, 2021). Cada segregação apresenta equipamentos distintos: barramentos, dispositivos de proteção e controle, entre outros. Caso ocorra um arco elétrico em algum ponto, não haverá propagação para outras gavetas (QUEIROZ; SENGER; MORAES, 2012).

Além disso, segundo Queiroz, Senger e Moraes (2012) e Abracopel (2015), esses painéis deverão ser capazes de dissipar para fora a pressão e o fluxo de gases gerados pelo arco elétrico, através de sistema de ventilação, pois foram ensaiados de acordo com normas vigentes.

A Figura 34 mostra um exemplo do sistema de ventilação de um painel resistente a arco interno:

Figura 34 – Exemplo do sistema de ventilação e distribuição dos compartimentos de um painel resistente a arco interno.

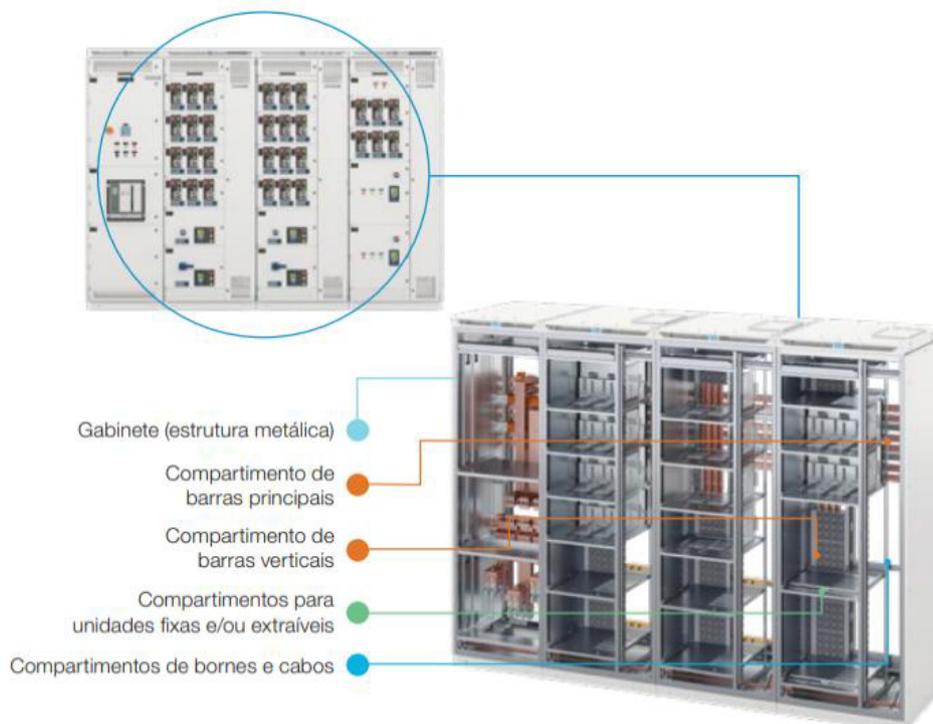


Fonte: Queiroz; Senger; Moraes (2012).

A Figura 34 apresenta: (A) Compartimento dos instrumentos; (B) Compartimento dos barramentos; (C) Compartimento dos cabos (QUEIROZ; SENGER; MORAES, 2012).

A Figura 35, mostra as características construtivas de um de um painel resistente a arco, retirado de um catálogo da WEG.

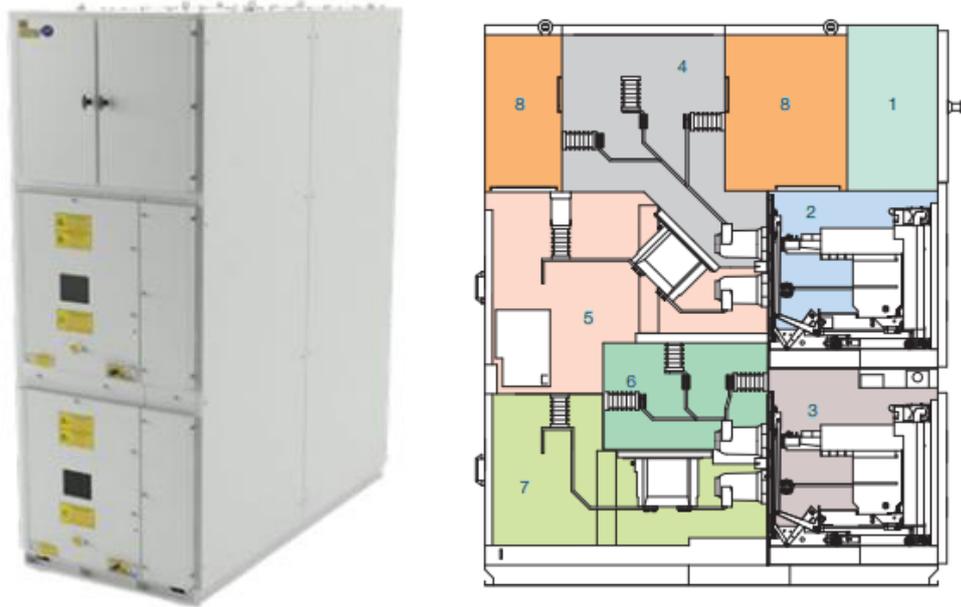
Figura 35 – Características construtivas de um painel resistente a arco.



Fonte: WEG (2021).

A Figura 36, mostra as compartimentações internas de um painel resistente a arco, retirado de um catálogo da WEG.

Figura 36 – Compartimentações internas de um painel resistente a arco.



Fonte: WEG (2021)

Esse modelo apresenta as seguintes partes: (1) Compartimento de baixa tensão; (2) Compartimento do contator 1; (3) Compartimento do contator 2; (4) Compartimento dos barramentos principais 1; (5) Compartimento de TCs e cabos de saída 1; (6) Compartimento dos barramentos principais 2; (7) Compartimento de TCs e cabos de saída 2; (8) Duto de exaustão de gases (WEG, 2021).

Vale ressaltar que os painéis resistentes a arco interno apresentam eficácia quando suas portas estão fechadas, servindo como uma barreira protetora, caso ocorra alguma falta interna com arco. No entanto, quando o operador estiver manuseando o equipamento, não há garantia de proteção, e poderá ocorrer acidente provocado por arco voltaico, pois esses sistemas não reduzem os níveis de energia incidente, necessitando, assim, de outros meios para mitigar (QUEIROZ; SENGER; MORAES, 2012).

4.5 Vestimentas e equipamento de proteção individual (EPI) contra arco elétrico

Segundo a norma NFPA 70E (2021), os trabalhadores deverão utilizar vestimentas resistentes a chama sempre que existir a possibilidade de exposição a um arco elétrico de

intensidade a partir de $1,2 \text{ cal/cm}^2$, suficiente para causar queimaduras de segundo grau.

Além disso, a Norma Regulamentadora nº6 – Equipamento de Proteção Individual EPI (BRASIL, 2018) obriga os trabalhadores a utilizem os EPIs adequados conforme o risco envolvido no trabalho. No caso do arco elétrico, a norma não cita explicitamente esse risco, no entanto, menciona os EPIs para utilizar contra o risco de agente térmico, devem-se atentar que uma das consequências do arco voltaico é a dissipação de calor, portanto, ele se enquadra como um agente térmico (TOMIYOSHI, 2004).

Vale ressaltar que, caso as companhias não ofereçam proteção e segurança adequada aos trabalhadores, como os EPIs, poderão receber multas, conforme diz a Norma Regulamentadora nº 28 – Fiscalização e Penalidades (BRASIL, 2020).

No entanto, conforme a hierarquia de controle de risco, o uso de equipamentos de proteção individual contra arco elétrico deve ser a última opção para proteger os operadores, pois, os responsáveis técnicos devem elaborar métodos mais efetivos da hierarquia de controle de risco com o objetivo de diminuir a energia incidente e evitar o uso de EPIs mais robustos (QUEIROZ, 2011).

Embora existam diversas soluções para redução do arco elétrico, como dispositivos limitadores de corrente de falta, relés detectores de arco, durante a interação humana com equipamentos energizados, poderão ocorrer falhas nesses dispositivos de proteção, portanto, ainda é necessário o uso de EPI adequado, mesmo sendo considerado a última barreira de proteção da hierarquia de controle de risco (TOMIYOSHI, 2004).

Para definir e selecionar adequadamente a vestimenta retardante a chama e equipamento de proteção individual contra o risco de arco elétrico deve-se, inicialmente, realizar uma análise de risco criteriosa, considerando-se diversos fatores de exposição, conforme indica a norma NR-10 (BRASIL, 2019) (ALMEIDA; GOECKING, 2009).

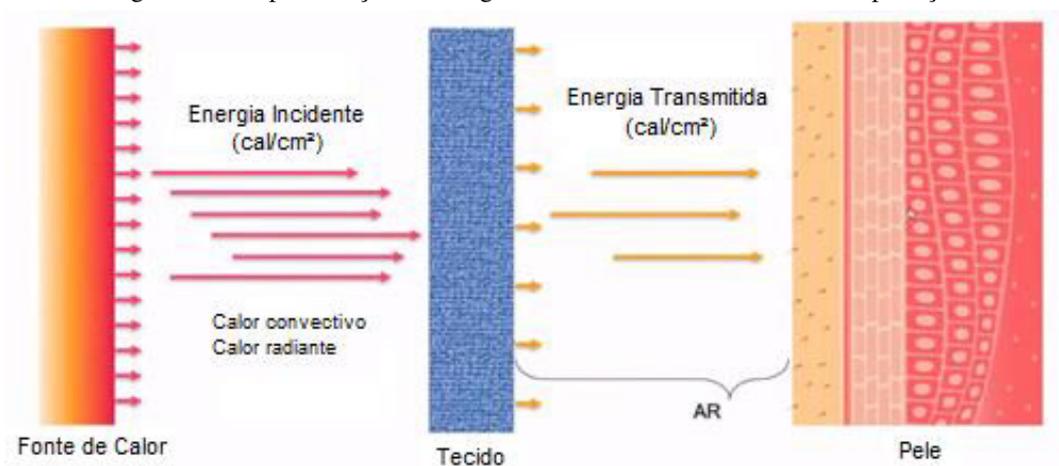
De fato, há um indicador denominado ATPV – *Arc Thermal Performance Value* (Valor de Performance Técnica ao Arco – tradução nossa), que serve para medir o desempenho dos tecidos e classificar as vestimentas de proteção ao risco de arco elétrico (TOMIYOSHI, 2004). Esse indicador é resultado de diversos testes nos materiais, para diferentes tipos de exposição ao arco elétrico, com objetivo de fornecer valores de ATPV, em cal/cm^2 , nos EPIs (QUEIROZ; SENGER, 2012).

O ATPV é o valor máximo da energia incidente que o tecido poderá suportar sem que exceda o nível de $1,2 \text{ cal/cm}^2$ no lado protegido (o corpo humano), além de não ocorrer combustão, ou seja, a pessoa sofrerá, no máximo, queimadura de segundo grau (TOMIYOSHI, 2004).

Vale ressaltar que o nível de ATPV das vestimentas retardantes a chama deve ser igual ou superior ao valor da energia incidente calculada. Ao especificar adequadamente, haver uma probabilidade de 50% de ocorrer transferência de calor através da roupa, causando queimadura de segundo grau na pele humana, e de reduzir o risco de óbito (RESENDE, 2016).

A Figura 37 apresenta a ação de uma vestimenta retardante a chama durante um evento de arco elétrico.

Figura 37 – Representação da energia incidente em uma vestimenta de proteção.



Fonte: adaptado de Moreira (2021).

Relembrando que a norma NFPA 70E (2021) apresenta dois métodos de seleção para especificar e dimensionar as vestimentas retardantes a chama e EPIs resistentes a arco elétrico adequados: Método da Análise de Energia Incidente e o Método da Categoria de EPI para arco elétrico.

4.5.1 Seleção de vestimentas e EPIs contra queimaduras causadas por arco elétrico

Para especificar e selecionar as vestimentas e EPIs contra queimaduras causadas por arco elétrico deve-se escolher um dos métodos de seleção da norma NFPA 70E (2021).

O Método da Categoria de EPI para arco elétrico é utilizado quando já existem valores definidos da energia incidente no sistema. Para esse método, é dividido em quatro categorias de EPI, dentro das faixas de energia incidente, conforme mostrado no Quadro 5. Vale ressaltar que a norma NFPA 70E (2021) solicita para não utilizar esse método quando se fizer uma análise de energia incidente (NFPA 70E, 2021).

Os EPIs e vestimentas que são de acordo com o Método da Categoria de EPI para arco elétrico, apresentados no Quadro 5 desse trabalho, são divididos em quatro categorias.

A primeira categoria, Categoria 1, com suportabilidade mínima de 4 cal/cm², representa o nível mais baixo para arco, exigindo apenas uma única camada para EPI contra arco. Os trabalhadores precisam das seguintes vestimentas e EPIs: camisas e calças compridas resistentes a arco ou macacão resistente a arco; protetor facial resistente a arco ou capuz carrasco resistente a arco; jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário.

De acordo com a norma NFPA 70E (2021), a segunda categoria, Categoria 2, com suportabilidade mínima de 8 cal/cm², é composta por vestimentas resistentes a arco elétrico e EPIs, como: camisas e calças compridas resistentes a arco ou macacão resistente a arco; protetor facial resistente a arco ou capuz carrasco resistente a arco e balaclava resistente a arco; jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário.

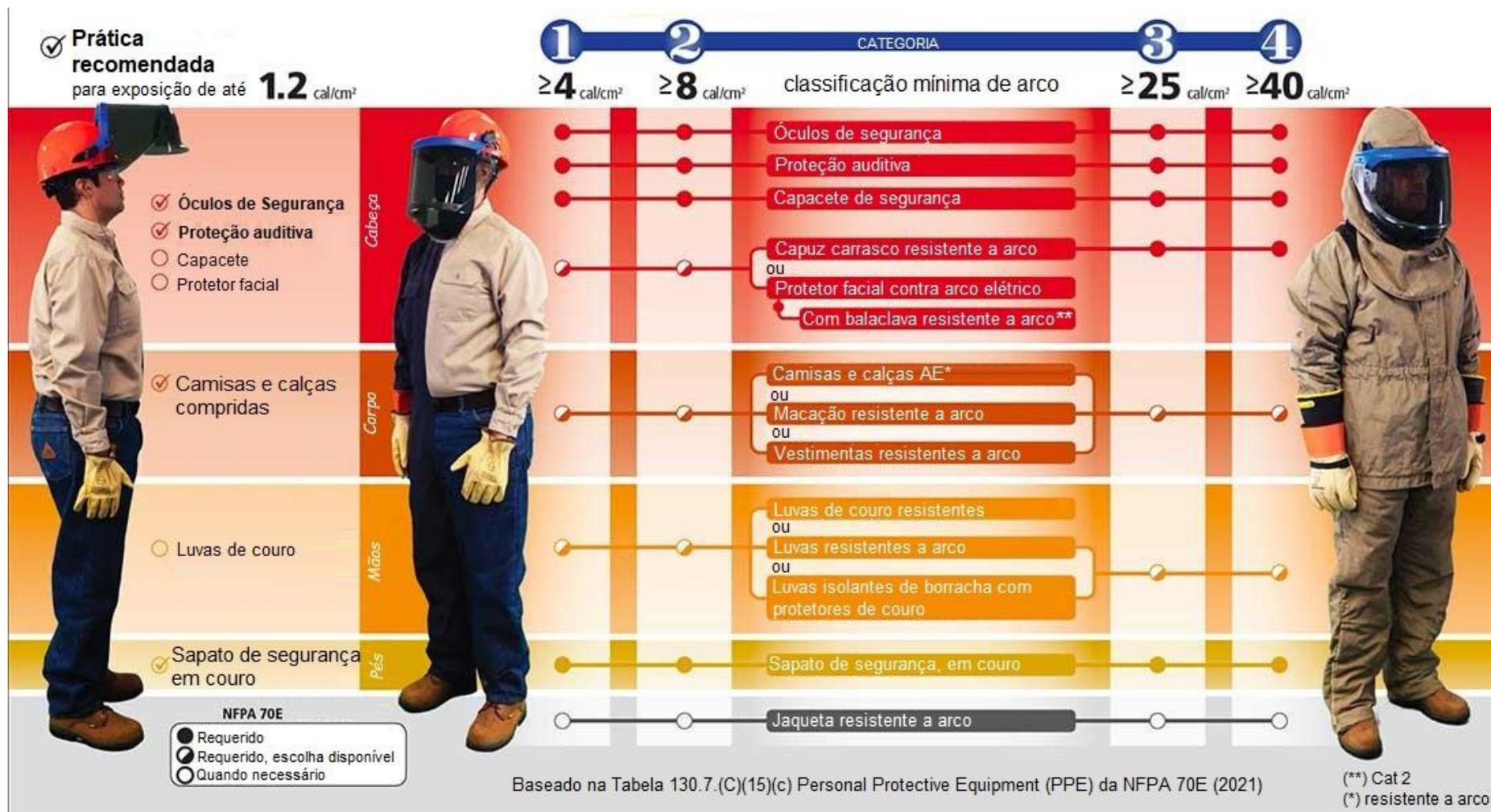
As vestimentas resistentes a arco elétrico, de Categoria 3, com suportabilidade mínima de 25 cal/cm², são: camisas de manga comprida resistente a arco, quando requerida; calças compridas resistentes a arco, quando requerida; macacão resistente a arco, quando requerido; jaqueta resistente a arco elétrico, quando requerida; capuz carrasco resistente a arco; luvas resistentes a arco; jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário (NFPA 70E, 2021).

As vestimentas resistentes a arco elétrico, de Categoria 4, com suportabilidade mínima de 40 cal/cm², são: camisas de manga comprida resistente a arco, quando requerida; calças compridas resistentes a arco, quando requerida; macacão resistente a arco, quando requerido; jaqueta resistente a arco elétrico, quando requerida; capuz carrasco resistente a arco; luvas resistentes a arco; jaqueta, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário (NFPA 70E, 2021).

A Figura 38 mostra as vestimentas retardantes a chama e EPIs contra arco elétrico de acordo com o Método da Categoria de EPI para arco elétrico, conforme norma NFPA 70E (2021):

Figura 38 – Vestimentas de proteção e EPIs contra arco elétrico a partir do Método da Categoria de EPI para arco elétrico.

Equipamentos de proteção necessários para cada categoria de EPI



Fonte: adaptado de E-Hazard (2021).

No caso do Método de Análise de Energia Incidente, precisa-se, inicialmente, realizar um cálculo de energia incidente e usar o Quadro 3 desse trabalho, que fornece orientação sobre como selecionar EPI. Conforme a norma NFPA 70E (2021), pode ser usado para auxiliar na escolha de proteção contra arco, mas não é obrigatório.

Com efeito, esses EPIs não apresentam divisão por categoria, e são dispostos em dois intervalos, de acordo com o valor da energia incidente do sistema. O profissional habilitado deve certificar-se de que a classificação da energia incidente do EPI seja maior do que a energia incidente do sistema (NFPA 70E, 2021).

Vale ressaltar que quando a energia incidente do sistema é menor que $1,2 \text{ cal/cm}^2$, os trabalhadores não são obrigados a utilizarem EPIs resistentes a arco, podendo utilizar vestimentas e EPI básico, como óculos de segurança, proteção auditiva, camisas e calças compridas e sapato de segurança de couro (NFPA 70E, 2021).

Quando a energia incidente do sistema estiver entre $1,2 \text{ cal/cm}^2$ e 12 cal/cm^2 , deve-se utilizar óculos de segurança; proteção auditiva; capacete de segurança; capuz carrasco resistente a arco ou protetor fácil contra arco elétrico, com balaclava resistente a arco; camisas e calças resistentes a arco, ou macacão resistente a arco ou vestimentas resistentes a arco; luvas de couro resistentes, ou luvas resistentes a arco ou luvas isolantes de borracha com protetores de couro; sapato de segurança em couro; jaqueta resistente a arco, quando necessário.

No último intervalo, quando a energia incidente do sistema for maior que 12 cal/cm^2 , as vestimentas e os EPIs são os mesmos do anterior, com a exceção de que não se utiliza protetor facial com proteção contra arco elétrico e balaclava com proteção contra arco elétrico.

A Figura 39 apresenta as vestimentas de proteção e EPIs contra arco elétrico a partir Método da Análise de Energia Incidente.

Figura 39 – Vestimentas de proteção e EPIs contra arco elétrico a partir Método da Análise de Energia Incidente.



Fonte: adaptado de E-Hazard (2021).

A norma NFPA 70E (2021) sugere alguns cuidados e manutenção que devem ser feitas nas vestimentas de proteção para arco elétrico, como o armazenamento, inspeção, limpeza e reparo (QUEIROZ; SENGER, 2012b).

Vale ressaltar que as vestimentas retardantes a chama e os EPIs apresentam desconfortos e podem atrapalhar os trabalhadores na realização das atividades operacionais. Também podem causar sensação térmica de calor no interior das vestimentas, devido à baixa ventilação nos tecidos. Portanto, é importante reduzir a energia incidente na instalação elétrica para diminuir a necessidade da utilização de EPIs mais pesados (QUEIROZ, 2011).

Apesar de que os métodos de eliminação e redução dos riscos de arco elétrico sejam prioridades na gestão de risco, a utilização do EPI, embora seja a última barreira de proteção da hierarquia de controle de risco, é importante para prevenir os riscos de acidente relacionados ao arco elétrico (RESENDE, 2016).

5 ESTUDO DE CASO

O presente estudo de caso tem por objetivo apresentar e analisar os resultados dos cálculos dos níveis de energia incidente e dos limites de aproximação segura para arco elétrico em todos os painéis elétricos de MT e BT de uma indústria localizada no estado do Ceará. Por questão de sigilo, não será mencionado o nome da unidade industrial, e as identificações das salas elétricas e equipamentos em geral foram alteradas.

Todos os critérios, cálculos e metodologias aplicados nesse estudo foram baseados nas normas IEEE 1584 (2018), NFPA 70E (2021) e ABNT NBR 16384 (2020), em suas versões mais atualizadas. Esses textos normativos foram apresentados no Capítulo 3 desse trabalho.

Nesse estudo de caso, inicialmente, serão apresentados os dados e os modos de operação da unidade industrial. Posteriormente, serão mostrados os estudos de curto-circuito e dos tempos de atuação dos dispositivos de proteção fornecidos pela indústria.

Na sequência, será mostrada a metodologia de cálculo da norma IEEE 1584 (2018) que foi aplicada para calcular a energia incidente e o limite de aproximação segura de cada painel elétrico de baixa tensão e do cubículo blindado de média tensão.

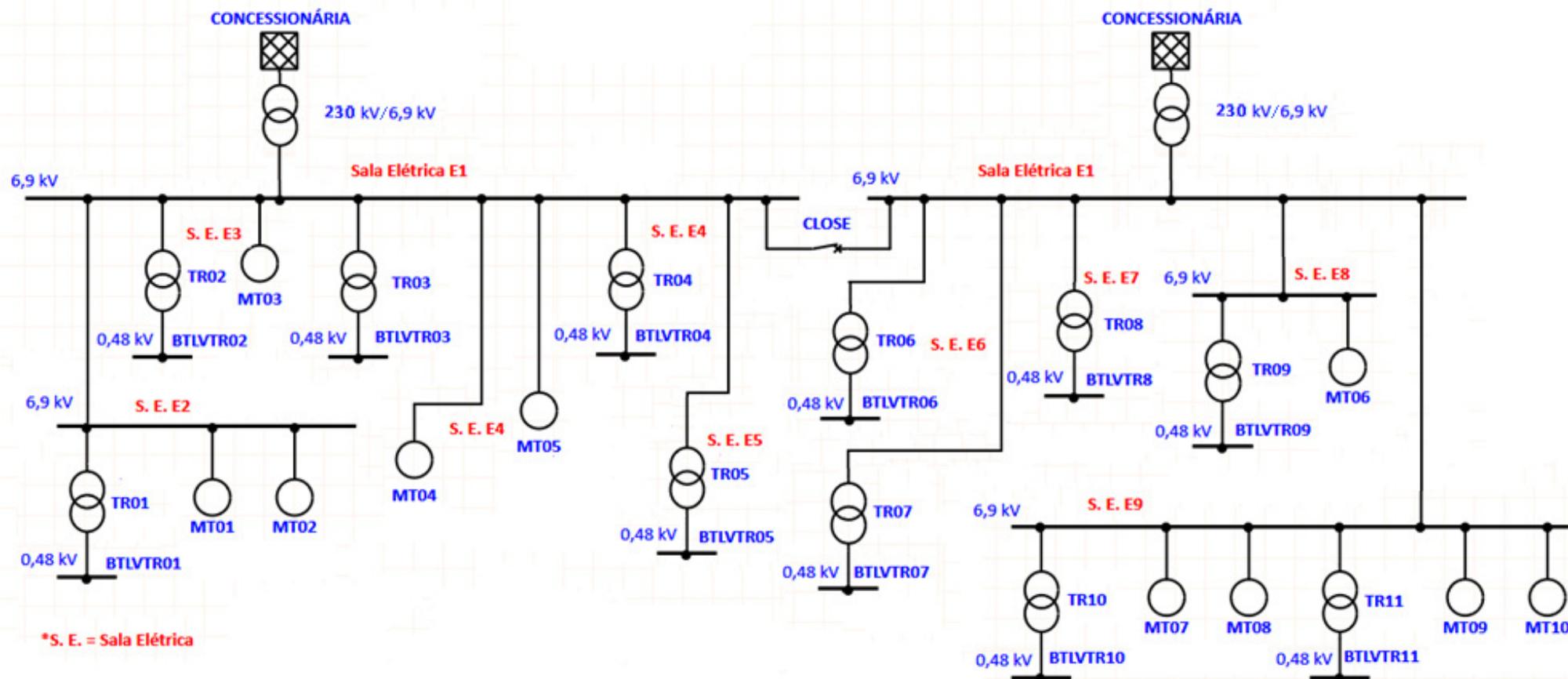
Além disso, serão mostradas as especificações das vestimentas retardantes a chama e dos demais equipamentos de proteção individuais resistentes a arco elétrico, a partir da norma NFPA 70E (2021), que os operadores deverão utilizar durante os serviços de operação ou manutenção nos painéis elétricos e nas proximidades de equipamentos energizados.

Por fim, será apresentada a aplicação de uma proposta para reduzir a energia incidente, e serão mostrados os resultados obtidos e a comparação dos valores entre a solução proposta e a proteção atual.

O diagrama simplificado dessa indústria está representado na Figura 40, que apresenta a identificação das salas elétricas, dos níveis de tensão e dos equipamentos, como transformadores, motores e painéis elétricos de baixa tensão.

A instalação industrial apresenta nove salas elétricas com cubículos blindados, com nível de tensão de 6,9 kV. Uma das salas contém as entradas das alimentações da concessionária local de 6,9 kV. Os cubículos alimentam os transformadores abaixadores, com tensão secundária de 480 V, que alimentam os painéis elétricos de baixa tensão. Os cubículos também alimentam os motores com tensão de 6,9 kV e algumas salas elétricas.

Figura 40 – Diagrama unifilar simplificado da indústria em estudo.



Fonte: elaborada pelo autor.

5.1 Descrição da instalação industrial

O fornecimento de energia da instalação industrial é realizado em 230 kV pela concessionária local, por meio de uma derivação em sua subestação.

A derivação é realizada através de uma conexão no barramento duplo principal, havendo um disjuntor de alta tensão para fazer a proteção e seccionamento, e um arranjo de *bypass* com chaves seccionadoras. Nas dependências desta subestação, há um transformador abaixador 230 kV/ 6,9 kV que reduz o nível de tensão para fornecer energia para toda a fábrica.

A entrada de energia em 6,9 kV para a indústria estudada é realizada por meio de duas linhas de entrada vindas da subestação da concessionária local. Os circuitos de entrada de energia chegam na Sala Elétrica E1, que é a entrada principal da indústria, alimentando os cubículos blindados UTMVIN01 e UTMVIN02, onde cada um é conectado a um barramento de distribuição. A partir desses dois barramentos, é distribuída a energia em 6,9 kV para as demais salas elétricas, os transformadores abaixadores e as cargas de média tensão. Os dois barramentos podem ser interconectados por meio de disjuntor de interligação de barras, tornando possível que as cargas sejam mais bem distribuídas entre as duas entradas e permitindo que todas as cargas sejam alimentadas por uma só entrada, caso seja necessária a manutenção da outra. Além disso, a Sala Elétrica E1 contém um cubículo blindado UTMVTR03 que alimenta o transformador abaixador, TR03, de 2.500 kVA – 6,9 kV/ 480 V, que, por sua vez, alimenta o painel BTLVTR03, que alimenta as cargas de baixa tensão industriais.

A Sala Elétrica E2, que alimenta a moagem de cru e suas outras cargas, contém o cubículo blindado UTMSUE2, que é alimentado em 6,9 kV por circuito vindo do cubículo UTMVSU02 da Sala Elétrica E1. Nessa sala, a entrada UTMSUE2 é conectada a um barramento que distribui a energia em três outros cubículos: o cubículo UTMVTR01 alimenta o transformador abaixador TR01, de 1.250 kVA – 6,9 kV/ 480 V, que, por sua vez, alimenta o painel elétrico BTLVTR01. O cubículo blindado UTMVMT01 alimenta o motor principal do moinho de cru, MT01, de 2.600 kW – 6,9 kV. E o cubículo UTMVMT02 alimenta o motor do ventilador do filtro de manga, MT02, de 2.660 kW – 6,9 kV.

A Sala Elétrica E3, que alimenta a moagem de coque e suas outras cargas, é alimentada em 6,9 kV por circuitos vindo dos cubículos UTMVTR02 e UTMVMT03 da Sala Elétrica E1. O primeiro alimenta o transformador abaixador, TR02, de 2.000 kVA – 6,9 kV/ 480 V, que, por sua vez, alimenta o painel de baixa tensão BTLVTR02. Além disso, o outro cubículo alimenta o motor principal do moinho de coque, MT02, de 1.000 kW – 6,9 kV.

A Sala Elétrica E4, que alimenta a torre de ciclone e suas outras cargas, é alimentada

em 6,9 kV por circuitos vindo dos cubículos UTMVMT04, UTMVMT05 e UTMVTR04 da Sala Elétrica E1. Os dois primeiros alimentam os dois ventiladores de 6,9 kV, MT04, de 1.015 kW e MT05, de 1.000 kW, respectivamente. O terceiro cubículo alimenta o transformador abaixador TR04, de 2.500 kVA – 6,9 kV/ 480 V, que, por sua vez, alimenta o painel de baixa tensão BTLVTR04.

A Sala Elétrica E5 é alimentada em 6,9 kV por circuito vindo do cubículo UTMVTR05 da Sala Elétrica E1. Esse circuito alimenta diretamente o transformador abaixador TR05, de 3.150 kVA – 6,9 kV/ 480 V que alimenta o painel de baixa tensão BTLVTR05, contendo a carga do britador secundário.

A Sala Elétrica E6, que alimenta a saída do forno e suas outras cargas, é alimentada em 6,9 kV por circuitos vindo dos cubículos UTMVTR06, UTMVTR07 da Sala Elétrica E1. O primeiro alimenta o transformador TR06, de 2.000 kVA – 6,9 kV/ 480 V que, por sua vez, alimenta o painel de baixa tensão BTLVTR06. O segundo cubículo alimenta o transformador TR07, de 2.000 kVA – 6,9 kV/ 480 V, que alimenta o painel de baixa tensão BTLVTR07.

A Sala Elétrica E7 contém o cubículo UTMVTR08 alimenta o transformador abaixador TR08, de 1.250 kVA – 6,9 kV/ 480 V, que, por sua vez, alimenta o painel elétrico BTLVTR08, contendo a carga dos motores da ensacadeira e de paletização.

A Sala Elétrica E8 que alimenta o britador primário e suas outras cargas, é alimentada em 6,9 kV por circuitos vindo do cubículo UTMVSU08 da Sala Elétrica E1. Nessa sala, a entrada UTMSUE8 é conectada a um barramento que distribui a energia em dois outros cubículos: O cubículo UTMVTR09 alimenta o transformador abaixador TR09, de 1.250 kVA – 6,9 kV/ 480 V que, por sua vez, alimenta o painel elétrico BTLVTR09. O cubículo blindado, UTMVMT06 alimenta o motor principal do britador primário, MT06, de 2.255 kW.

A Sala Elétrica E9, que alimenta a moagem de cimento e suas outras cargas é alimentada em 6,9 kV por circuitos vindo do cubículo UTMVSU09 da Sala Elétrica E1. Nessa sala, a entrada UTMSUE9 é conectada a um barramento que distribui a energia em seis outros cubículos: O cubículo UTMVTR10 alimenta o transformador abaixador TR10, de 1.600 kVA – 6,9 kV/ 480 V, que, por sua vez, alimenta o painel elétrico BTLVTR10. O cubículo UTMVTR11 alimenta o transformador abaixador TR11, de 1.600 kVA – 6,9 kV/ 480 V, que, por sua vez, alimenta o painel elétrico BTLVTR11. Os cubículos UTMVMT07 e UTMVMT08 alimentam os dois motores principais dos dois moinhos de cimento MT07, de 2.600 kW, e MT08, de 2.600 kW, respectivamente. E os cubículos blindados, UTMVMT09 e UTMVMT10, alimentam os motores dos dois ventiladores dos filtros de manga MT09, de 1.250 kW, e MT10, de 1.250 kW, respectivamente.

5.2 Coleta de dados e determinação do modo de operação da indústria

Para o estudo de caso, inicialmente, houve o levantamento das características do sistema elétrico da indústria, a partir da análise técnica dos documentos fornecidos pela indústria e coleta de dados em campo, baseado na Etapa 1 da norma IEEE 1584 (2018). Com os dados da unidade industrial coletados, foi organizada a descrição do sistema elétrico em estudo.

A Etapa 2 da norma IEEE 1584 (2018) solicita a determinação dos modos de operação do sistema. Vale ressaltar que o modo de operação mais utilizado pela indústria é a condição operativa em que a interconexão dos dois barramentos principais da Sala Elétrica Principal E1, por meio do disjuntor de interligação de barras, sendo os dois cubículos blindados UTMVIN01 e UTMVIN02 operando ao mesmo tempo, alimentados pela concessionária local. Além disso, o estudo de curto-circuito fornecido pela indústria foi baseado de acordo com esse modo de operação.

5.3 Estudo de curto-circuito e dos tempos de atuação dos dispositivos de proteção

Os valores das correntes de curto-circuito trifásico de cada painel são importantes para elaboração dos cálculos de energia incidente, de acordo com a Etapa 3 da norma IEEE 1584 (2018).

A unidade industrial disponibilizou documentos atualizados do estudo de curto-circuito, baseado na norma IEC 60909. Vale ressaltar que, para o estudo da energia incidente, foram utilizados os valores da corrente de curto-circuito trifásico de cada painel, como solicita a norma IEEE 1584 (2018).

Também foram fornecidos documentos dos dados do sistema de proteção da indústria em estudo. Para os cálculos de energia incidente, foram analisados os tempos de atuação dos dispositivos de proteção do alimentador a montante dos cubículos e painéis elétricos, conforme Etapa 8 da norma IEEE 1584 (2018).

Foram considerados que os tempos de extinção do arco são os tempos de atuação dos dispositivos de proteção. Para os cubículos blindados, foi considerada a atuação da função de sobrecorrente instantânea (função 50) de cada relé, por conta das correntes de arco elétrico que fluem nos disjuntores de média tensão. Para os painéis elétricos de baixa tensão, foram considerados os tempos de atuação dos disjuntores.

Na Tabela 11, são apresentados os valores do curto-circuito trifásico e dos tempos

de atuação dos relés e dos disjuntores de cada cubículo blindado e painel elétrico.

Tabela 11 – Resultados obtidos das correntes de curto-circuito trifásico de cada cubículo blindado e painel elétrico e os tempos de atuação dos dispositivos de proteção.

Cubículo blindado (MT)/ Painel elétrico (BT)	Descrição do Alimentador	V_{oc} (kV)	I_{bf} (kA)	t (ms)
UTMVIN01	Vem do alimentador 6,9 kV	6,9	32,90	600
UTMVIN02	Vem do alimentador 6,9 kV	6,9	33,13	600
UTMVTR01	Alimenta o transformador TR01	6,9	24,38	300
UTMVTR02	Alimenta o transformador TR02	6,9	18,42	300
UTMVTR03	Alimenta o transformador TR03	6,9	24,65	300
UTMVTR04	Alimenta o transformador TR04	6,9	24,31	300
UTMVTR05	Alimenta o transformador TR05	6,9	17,22	300
UTMVTR06	Alimenta o transformador TR06	6,9	21,32	300
UTMVTR07	Alimenta o transformador TR07	6,9	21,32	300
UTMVTR08	Alimenta o transformador TR08	6,9	21,82	300
UTMVTR09	Alimenta o transformador TR09	6,9	16,03	300
UTMVTR10	Alimenta o transformador TR10	6,9	25,40	300
UTMVTR11	Alimenta o transformador TR11	6,9	25,40	300
UTMVSU02	Alimenta o UTMSUE2 (S. E. E2)	6,9	27,71	600
UTMVSU08	Alimenta o UTMSUE8 (S. E. E8)	6,9	17,67	600
UTMVSU09	Alimenta o UTMSUE4 (S. E. E9)	6,9	29,16	600
UTMVMT01	Alimenta o motor MT01	6,9	22,46	100
UTMVMT02	Alimenta o motor MT02	6,9	22,63	100
UTMVMT03	Alimenta o motor MT03	6,9	17,80	100
UTMVMT04	Alimenta o motor MT4	6,9	21,32	100
UTMVMT05	Alimenta o motor MT05	6,9	21,32	100
UTMVMT06	Alimenta o motor MT06	6,9	15,00	100
UTMVMT07	Alimenta o motor MT07	6,9	24,32	100
UTMVMT08	Alimenta o motor MT08	6,9	24,18	100
UTMVMT09	Alimenta o motor MT09	6,9	24,32	100
UTMVMT10	Alimenta o motor MT10	6,9	24,41	100
BTLVTR01	Vem do transformador TR01	0,48	26,28	50
BTLVTR02	Vem do transformador TR02	0,48	38,66	50
BTLVTR03	Vem do transformador TR03	0,48	49,57	50
BTLVTR04	Vem do transformador TR04	0,48	59,55	50
BTLVTR05	Vem do transformador TR05	0,48	25,71	50
BTLVTR06	Vem do transformador TR06	0,48	39,53	50
BTLVTR07	Vem do transformador TR07	0,48	47,97	50
BTLVTR08	Vem do transformador TR08	0,48	26,13	50
BTLVTR09	Vem do transformador TR09	0,48	37,76	50
BTLVTR10	Vem do transformador TR10	0,48	33,30	50
BTLVTR11	Vem do transformador TR11	0,48	33,30	50

Fonte: elaborada pelo autor.

Percebe-se que, todos os tempos de atuação dos dispositivos de proteção apresentam características distintas: as entradas principais e os alimentadores das salas elétricas contêm tempo de 600 ms; os cubículos que alimentam os transformadores, 300 ms; os motores

apresentam 100 ms; e os dos painéis de baixa tensão são de 50 ms.

Além disso, os maiores valores de curto-circuito trifásico, no sistema de média tensão, são da entrada principal. O estudo do curto-circuito e da seletividade fornecidos pela indústria estão nos Anexos A e B.

5.4 Determinando as características dos painéis, eletrodos e distância de trabalho

Todos os cubículos blindados de 6,9 kV têm as mesmas características construtivas, bem como todos os painéis elétricos de baixa tensão, de 480 V.

Com efeito, conforme as Etapas 4 e 6 da IEEE 1584 (2018), foi possível determinar as características de cada painel, como a classe do equipamento, distância típica entre condutores, dimensões do invólucro e a distância de trabalho, baseada nas tensões do sistema.

De fato, a partir da Tabela 2 deste trabalho, foram adotadas as seguintes classes de equipamento, de acordo com a Etapa 4 da norma IEEE 1584 (2018):

- Painel de distribuição de 15 kV: para essa classe de equipamento, foram considerados todos os cubículos blindados de 6,9 kV;
- Painel de distribuição de baixa tensão: foram considerados todos os painéis de baixa tensão de 480 V, para essa classe de equipamento.

Além dos dados das classes de equipamento, também foram determinados, na mesma tabela, a distância típica entre condutores e o tamanho do invólucro.

Depois, por meio da Tabela 3, foram obtidas as distâncias de trabalho típicas, através de cada classe de equipamento.

Para determinar as configurações dos eletrodos de cada cubículo e painel, foi utilizada a Etapa 5 da norma IEEE 1584 (2018). A partir da avaliação dos painéis elétricos e cubículos blindados utilizou-se o Quadro 2 desse trabalho para adotar as seguintes configurações:

- HCB: foram considerados todos os cubículos blindados de 6,9 kV;
- VCBB: para essa configuração, foram considerados todos os painéis elétricos de baixa tensão de 480 V.

A primeira, HCB, representa a possibilidade de um arco elétrico enquanto os disjuntores já estiverem extraídos, configurando a possibilidade da energia incidente mais grave. A segunda, VCBB, representa a possibilidade de um arco elétrico nos polos de entrada do disjuntor fixo, este disjuntor se caracterizará como uma barreira feita de isolante,

configurando a barreira característica do VCBB.

A Figura 41 mostra a foto do disjuntor de proteção dentro do cubículo blindado de 6,9 kV, exemplificando a configuração HCB, descrito acima.

Figura 41 – Disjuntor de proteção de circuito em 6,9 kV dentro do cubículo blindado.



Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 42 mostra a foto do painel elétrico de baixa tensão de 480 V, representando a configuração VCBB, descrito anteriormente.

Figura 42 – Painel elétrico de 480 V.



Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 12 apresenta o resumo dos dados obtidos a partir das Etapas 4 a 6 da norma IEEE 1584 (2018).

Tabela 12 – Características dos painéis em análise e distância de trabalho.

Tipo de painel	V_{oc} (kV)	Classe do Equipamento	Distância típica entre condutores (mm)	Tamanho do invólucro (mm)	Configuração dos eletrodos	Distância de trabalho (mm)
				H × L × P		
Cubículo blindado (MT)	6,9	Painel de 15 kV	152	1143 × 762 × 762	HCB	914,4
Painel elétrico (BT)	0,48	Painel de baixa tensão	32	508 × 508 × 508	VCBB	609,6

Fonte: elaborada pelo autor.

As características dos cubículos e painéis organizadas na Tabela 12 serão importantes para determinar os valores da corrente de arco, da energia incidente e do limite de aproximação segura. Como todos os cubículos blindados, de tensão de 6,9 kV, apresentam as mesmas características, será utilizada a metodologia específica para esse tipo, e para os painéis elétricos de baixa tensão, será usada outra metodologia de cálculo distinta, conforme a norma IEEE 1584 (2018).

5.5 Cálculo das correntes de arco elétrico

O cálculo da corrente limitada por arco elétrico (I_{arc}) depende da corrente de curto-circuito trifásico (I_{bf}), da configuração dos eletrodos, da tensão nominal e da distância típica entre os condutores. Para determinar a corrente de arco elétrico, foi utilizada a Etapa 7 da norma IEEE 1584 (2018).

Para o nível de tensão de 6,9 kV, foi utilizada a metodologia de cálculo para modelo de tensão $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15.000 \text{ V}$; e para o nível de tensão de 480 V, foram aplicados os cálculos do modelo para $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$. Além disso, foram calculadas as correntes de arco elétrico reduzida, conforme a determinação da norma IEEE 1584 (2018).

5.5.1 Calculando a corrente de arco dos cubículos blindados de 6,9 kV

Primeiramente, foram determinados os valores intermediários das correntes de arco I_{arc_600} , I_{arc_2700} e I_{arc_14300} dos cubículos blindados, utilizando a Equação (11) e a Tabela 4. Posteriormente, foram calculadas as interpolações das correntes de arco I_{arc_1} , I_{arc_2} e I_{arc_3} , conforme Equações (13), (14) e (15). Depois, foram determinadas as correntes de arco final. Como a tensão dos cubículos é de 6,9 kV, segundo a IEEE (2018), a corrente de arco será:

$$I_{arc} = I_{arc_2}$$

Além disso, foi analisado o cálculo da corrente de arco reduzida, sendo utilizadas as Equações (19) e (20) e a Tabela 5. Foi calculado primeiro o fator de correção da variação de corrente de arco (I_{arcCf}), por meio da Equação (20). Para o cálculo da corrente de arco reduzida, foi aplicada a Equação (19). Foram usados os valores finais das correntes de arco.

A Tabela 13 apresenta os resultados dos cálculos das correntes de arco intermediárias, as interpolações, a corrente de arco final e a corrente de arco reduzida de cada cubículo blindado de 6,9 kV.

Tabela 13 – Resultados obtidos das correntes de arco intermediárias, das interpolações, dos valores finais e da corrente de arco reduzida.

Cubículo blindado (MT)	$I_{arc\ 600}$ (kA)	$I_{arc\ 2700}$ (kA)	$I_{arc\ 14300}$ (kA)	$I_{arc\ 1}$ (kA)	$I_{arc\ 2}$ (kA)	$I_{arc\ 3}$ (kA)	I_{arc} (kA)	$I_{arc\ mín}$ (kA)
UTMVIN01	21,036	27,912	29,870	41,663	28,621	2,536	28,621	28,122
UTMVIN02	21,162	28,095	30,075	41,961	28,812	2,514	28,812	28,310
UTMVTR01	16,034	20,969	22,160	30,837	21,400	2,525	21,400	21,027
UTMVTR02	12,213	15,959	16,702	23,450	16,228	1,785	16,228	15,945
UTMVTR03	16,202	21,193	22,407	31,175	21,633	2,548	21,633	21,256
UTMVTR04	15,991	20,911	22,096	30,750	21,340	2,519	21,340	20,968
UTMVTR05	11,422	14,938	15,605	21,971	15,179	1,596	15,179	14,915
UTMVTR06	14,099	18,410	19,358	27,031	18,753	2,197	18,753	18,427
UTMVTR07	14,099	18,410	19,358	27,031	18,753	2,197	18,753	18,427
UTMVTR08	14,419	18,830	19,817	27,651	19,187	2,259	19,187	18,853
UTMVTR09	10,631	13,922	14,517	20,505	14,138	1,402	14,138	13,891
UTMVTR10	16,665	21,815	23,092	32,114	22,277	2,603	22,277	21,889
UTMVTR11	16,665	21,815	23,092	32,114	22,277	2,603	22,277	21,889
UTMVSU02	18,064	23,717	25,197	35,025	24,253	2,710	24,253	23,831
UTMVSU08	11,719	15,321	16,016	22,525	15,573	1,668	15,573	15,302
UTMVSU09	18,918	24,900	26,510	36,863	25,483	2,722	25,483	25,039
UTMVMT01	14,827	19,367	20,403	28,445	19,742	2,334	19,742	19,398
UTMVMT02	14,935	19,509	20,558	28,657	19,889	2,353	19,889	19,542
UTMVMT03	11,805	15,432	16,135	22,686	15,686	1,688	15,686	15,413
UTMVMT04	14,099	18,410	19,358	27,031	18,753	2,197	18,753	18,427
UTMVMT05	14,099	18,410	19,358	27,031	18,753	2,197	18,753	18,427
UTMVMT06	10,944	14,324	14,946	21,084	14,549	1,479	14,549	14,296
UTMVMT07	15,997	20,919	22,105	30,762	21,348	2,520	21,348	20,977
UTMVMT08	15,910	20,802	21,977	30,588	21,228	2,508	21,228	20,858
UTMVMT09	15,997	20,919	22,105	30,762	21,348	2,520	21,348	20,977
UTMVMT10	16,053	20,994	22,187	30,875	21,426	2,528	21,426	21,053

Fonte: elaborada pelo autor.

Observa-se na Tabela 13 que os valores das correntes de arco elétrico foram menores do que as correntes de curto-circuito correspondentes, devido à impedância do arco.

5.5.2 Calculando a corrente de arco dos painéis elétricos de 480 V

Como a tensão dos painéis elétricos é menor que 600 V, foi calculada a corrente de arco intermediária I_{arc_600} , utilizando a Equação (11) e a Tabela 4. Posteriormente, foi calculado o valor final da corrente de arco, conforme Equação (18).

Também foi calculada a corrente de arco reduzida dos painéis elétricos de baixa tensão, sendo utilizadas as Equações (19) e (20) e a Tabela 5, calculando primeiro o fator de correção da variação de corrente de arco (VarCf), por meio da Equação (20) e depois a corrente de arco mínimo, aplicando a Equação (19). Foram usados os valores finais das correntes de arco.

A Tabela 14 apresenta os resultados dos cálculos da corrente de arco intermediária, da corrente de arco final e da corrente de arco mínimo de cada painel elétrico de 480 V.

Tabela 14 – Resultados obtidos das correntes de arco intermediárias, finais e da corrente de arco reduzida.

Painel elétrico (BT)	I_{arc_600} (kA)	I_{arc} (kA)	I_{arc_min} (kA)
BTLVTR01	22,534	21,023	18,535
BTLVTR02	31,835	29,294	25,826
BTLVTR03	38,464	34,770	30,654
BTLVTR04	43,205	38,393	33,848
BTLVTR05	21,895	20,436	18,017
BTLVTR06	32,421	29,794	26,267
BTLVTR07	37,589	34,072	30,039
BTLVTR08	22,412	20,911	18,436
BTLVTR09	31,220	28,765	25,360
BTLVTR10	28,022	25,971	22,897
BTLVTR11	28,022	25,971	22,897

Fonte: elaborada pelo autor.

Na Tabela 14, observa-se que os valores das correntes de arco elétrico foram menores do que as correntes de curto-circuito correspondentes, como já esperado, devido à impedância do arco.

5.6 Cálculo da energia incidente

Uma vez calculada a corrente de falta limitada por arco elétrico, deve-se calcular a energia incidente gerada por essa corrente, de acordo com a Etapa 9 da norma IEEE 1584 (2018).

Para o nível de tensão de 6,9 kV, foi utilizada a metodologia de cálculo para modelo de tensão $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15.000 \text{ V}$; e para o nível de tensão de 480 V, foram aplicados os cálculos do modelo para $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$.

Essa etapa de cálculo foi dividida em duas partes. Na primeira parte, foram determinados os fatores de correção para o tamanho do invólucro (CF). Na segunda parte, foram calculados a energia incidente para diferentes níveis de tensão, as interpolações e os seus valores finais.

Vale ressaltar que a energia incidente é dependente, principalmente, do tempo de duração do arco (tempo total de abertura da proteção), do valor de curto-circuito e da distância de trabalho entre a fonte do arco e o operador.

5.6.1 Calculando o fator de correção para o tamanho do invólucro

Na Tabela 2, foram descritas as dimensões dos invólucros para cada classe de equipamento, esses valores são importantes para classificar o tipo de invólucro dos cubículos blindados e dos painéis elétricos em Raso ou Típico.

De acordo com a norma IEEE 1584 (2018), os invólucros dos painéis em geral da indústria em estudo são considerados como “Típico”, pois os cubículos blindados apresentam tensão acima de 600 V e os painéis elétricos de baixa tensão apresentam profundidade de invólucro acima de 203,2 mm.

Definido o tipo de invólucro para cada painel, foram calculadas as alturas (H_1) e as larguras (W_1) equivalentes dos cubículos blindados e painéis elétricos, de acordo com a Tabela 6, mediante dimensões genéricas de cada invólucro.

A partir dos parâmetros calculados anteriormente, foram calculadas a dimensão equivalente dos equipamentos em estudo e o tamanho do invólucro equivalente (EES), utilizando a Equação (23).

Finalmente, foi calculado o Fator de Correção (CF) para o cubículo blindado e o painel elétrico. Sabendo que cada invólucro dos cubículos blindados e dos painéis elétricos é “Típico”, foram utilizadas a Equação (24) e a Tabela 7, observando o tipo de invólucro e os arranjos dos eletrodos para cada painel.

A Tabela 15 apresenta os resultados do tipo de invólucro, das larguras e alturas equivalentes, dos tamanhos equivalentes e dos fatores de correção.

Tabela 15 – Resultados obtidos dos fatores de correção para o tamanho do invólucro de cada painel.

Tipo de painel	Tipo de invólucro	W_1 (mm)	H_1 (mm)	ESS	CF
Cubículo blindado (MT)	Típico	29,073	40,596	34,834	1,131
Painel elétrico (BT)	Típico	20	20	20	1

Fonte: elaborada pelo autor.

Os tamanhos da largura e altura equivalentes dos invólucros foram ajustados, seus valores finais foram menores do que os valores genéricos.

Para os cálculos da energia incidente, foram escolhidos os valores das correntes de arco final, considerando o pior caso, comparados com as correntes de arco mínimo.

5.6.2 Calculando a energia incidente dos cubículos blindados de 6,9 kV

Inicialmente, foram determinados os valores intermediários da energia incidente E_{600} , E_{2700} e E_{14300} dos cubículos blindados de 6,9 kV, utilizando as Equações (26), (27) e (28), respectivamente, e as Tabelas 8, 9 e 10.

Definidos os valores das energias incidentes intermediárias, foram calculadas as interpolações das energias incidentes E_1 , E_2 e E_3 , conforme Equações (32), (33) e (34).

Posteriormente, foram determinadas as energias incidentes finais. Como a tensão dos cubículos blindados é de 6,9 kV, segundo a IEEE (2018), a energia incidente é $E = E_2$.

A Tabela 16 apresenta os resultados dos cálculos das energias incidentes intermediárias, as interpolações e a energia incidente final de cada cubículo blindado.

Tabela 16 – Resultados obtidos das energias incidentes intermediárias, das interpolações e dos valores finais.

Cubículo blindado (MT)	E_{600} (J/cm ²)	E_{2700} (J/cm ²)	E_{14300} (J/cm ²)	E_1 (J/cm ²)	E_2 (J/cm ²)	E_3 (J/cm ²)	E (J/cm ²)	E (cal/cm ²)
UTMVIN01	119,264	225,652	232,100	438,427	227,986	-192,894	227,986	54,445
UTMVIN02	120,010	227,859	233,826	443,557	230,019	-197,056	230,019	54,930
UTMVTR01	44,925	75,758	83,976	137,424	78,734	-38,647	78,734	18,802
UTMVTR02	33,825	54,264	61,818	95,141	56,999	-19,286	56,999	13,612
UTMVTR03	45,415	76,812	84,990	139,605	79,773	-39,891	79,773	19,050
UTMVTR04	44,798	75,486	83,713	136,863	78,465	-38,331	78,465	18,738
UTMVTR05	31,542	50,273	57,428	87,735	52,863	-16,880	52,863	12,624
UTMVTR06	39,286	64,331	72,536	114,422	67,302	-26,938	67,302	16,072
UTMVTR07	39,286	64,331	72,536	114,422	67,302	-26,938	67,302	16,072
UTMVTR08	40,217	66,137	74,398	117,977	69,128	-28,570	69,128	16,508
UTMVTR09	29,269	46,399	53,104	80,660	48,827	-14,839	48,827	11,660
UTMVTR10	46,770	79,780	87,809	145,801	82,687	-43,540	82,687	19,746

Cubículo blindado (MT)	E_{600} (J/cm ²)	E_{2700} (J/cm ²)	E_{14300} (J/cm ²)	E_1 (J/cm ²)	E_2 (J/cm ²)	E_3 (J/cm ²)	E (J/cm ²)	E (cal/cm ²)
UTMVTR11	46,770	79,780	87,809	145,801	82,687	-43,540	82,687	19,746
UTMVSU02	101,741	178,626	193,027	332,397	183,840	-113,272	183,840	43,902
UTMVSU08	64,798	103,518	118,141	180,957	108,812	-35,476	108,812	25,985
UTMVSU09	106,765	191,187	203,952	360,031	195,809	-132,636	195,809	46,760
UTMVMT01	13,801	22,827	25,595	40,879	23,829	-10,270	23,829	5,691
UTMVMT02	13,906	23,037	25,807	41,299	24,040	-10,479	24,040	5,741
UTMVMT03	10,882	17,397	19,849	30,426	18,285	-5,999	18,285	4,366
UTMVMT04	13,095	21,444	24,179	38,141	22,434	-8,979	22,434	5,357
UTMVMT05	13,095	21,444	24,179	38,141	22,434	-8,979	22,434	5,357
UTMVMT06	10,056	15,973	18,269	27,808	16,805	-5,203	16,805	4,013
UTMVMT07	14,939	25,175	27,917	45,648	26,168	-12,792	26,168	6,249
UTMVMT08	14,854	24,994	27,742	45,275	25,989	-12,583	25,989	6,206
UTMVMT09	14,939	25,175	27,917	45,648	26,168	-12,792	26,168	6,249
UTMVMT10	14,993	25,292	28,029	45,888	26,283	-12,928	26,283	6,277

Fonte: elaborada pelo autor.

Observa-se que os níveis da energia incidente dos cubículos blindados apresentam valores acima de 1,2 cal/cm², necessitando, assim, da utilização de equipamentos de proteção individuais adequados, além de intervenção para reduzir os níveis de energia incidente e evitar possíveis acidentes devido ao arco elétrico.

5.6.3 Calculando a energia incidente dos painéis elétricos de 480 V

Como a tensão dos painéis elétricos é menor que 600 V, foi calculada a energia incidente intermediária $E_{\leq 600}$, utilizando a Equação (29) e a Tabela 8. A energia incidente final será igual à energia incidente intermediária, conforme indica a norma IEEE 1584 (2018).

A Tabela 17 apresenta os resultados dos cálculos da energia incidente de cada painel elétrico.

Tabela 17 – Resultados obtidos da energia incidente dos painéis elétricos.

Painel elétrico (BT)	$E_{\leq 600}$ (J/cm ²)	E (J/cm ²)	E (cal/cm ²)
BTLVTR01	8,610	8,610	2,056
BTLVTR02	12,501	12,501	2,985
BTLVTR03	15,115	15,115	3,609
BTLVTR04	16,831	16,831	4,019
BTLVTR05	8,338	8,338	1,991
BTLVTR06	12,739	12,739	3,042
BTLVTR07	14,782	14,782	3,530

Painel elétrico (BT)	$E_{\leq 600}$ (J/cm ²)	E (J/cm ²)	E (cal/cm ²)
BTLVTR08	8,558	8,558	2,044
BTLVTR09	12,249	12,249	2,925
BTLVTR10	10,924	10,924	2,609
BTLVTR11	10,924	10,924	2,609

Fonte: elaborada pelo autor.

Observa-se que todos os painéis elétricos apresentaram energia incidente acima de 1,2 cal/cm² necessitando, também, da utilização de equipamentos de proteção individuais adequados, além de intervenção para reduzir os níveis de energia incidente e evitar possíveis acidentes devido ao arco elétrico.

5.7 Determinando o limite de aproximação segura

O cálculo do limite de aproximação segura é feito de acordo com a Etapa 10 da norma IEEE 1584 (2018). Essa distância depende principalmente da corrente limitada por arco elétrico (I_{arc}), da corrente de curto-circuito trifásico (I_{bf}), da configuração dos eletrodos, do tempo de duração do arco, do fator de correção de tamanho de invólucro (CF), da tensão nominal e da distância típica entre os condutores.

Para determinar o limite de aproximação segura, foi dividido por nível de tensão. Para o nível de tensão de 6,9 kV, foi utilizada a metodologia de cálculo para modelo de tensão $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15.000 \text{ V}$; e para o nível de tensão de 480 V, foram aplicados os cálculos do modelo para $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$.

5.7.1 Calculando o limite de aproximação segura dos cubículos blindados de 6,9 kV

Inicialmente, foram determinados os valores intermediários do limite de aproximação segura AFB_{600} , AFB_{2700} e AFB_{14300} dos cubículos blindados de 6,9 kV, utilizando as Equações (38), (39) e (40), respectivamente e as Tabelas 8, 9 e 10.

Posteriormente, foram calculadas as interpolações AFB_1 , AFB_2 e AFB_3 , conforme Equações (43), (44) e (45).

Depois, foram determinados os limites de aproximação segura finais. Como a tensão dos cubículos blindados é de 6,9 kV, segundo a IEEE (2018), o limite de aproximação segura será: $AFB = AFB_2$.

A Tabela 18 apresenta os resultados dos cálculos dos limites de aproximação segura

intermediários, as interpolações e o limite de aproximação segura final de cada cubículo blindado.

Tabela 18 – Resultados obtidos dos limites de aproximação segura intermediários, das interpolações e dos valores finais.

Cubículo blindado (MT)	AFB_{600} (mm)	AFB_{2700} (mm)	AFB_{14300} (mm)	AFB_1 (mm)	AFB_2 (mm)	AFB_3 (mm)	AFB (mm)
UTMVIN01	4353,509	8323,683	9270,844	16264,031	8666,621	-6528,200	8666,621
UTMVIN02	4366,896	8370,839	9312,432	16378,726	8711,761	-6622,169	8711,761
UTMVTR01	2691,307	4417,827	5015,787	7870,867	4634,330	-1838,745	4634,330
UTMVTR02	2340,166	3639,979	4168,228	6239,607	3831,242	-985,488	3831,242
UTMVTR03	2705,730	4453,387	5052,296	7948,700	4670,233	-1886,700	4670,233
UTMVTR04	2687,548	4408,617	5006,297	7850,754	4625,018	-1826,453	4625,018
UTMVTR05	2260,972	3482,130	3986,767	5924,446	3664,843	-854,362	3664,843
UTMVTR06	2519,227	4017,886	4591,039	7015,203	4225,407	-1354,186	4225,407
UTMVTR07	2519,227	4017,886	4591,039	7015,203	4225,407	-1354,186	4225,407
UTMVTR08	2548,469	4082,964	4661,869	7151,954	4292,567	-1426,206	4292,567
UTMVTR09	2179,184	3323,788	3802,620	5612,996	3497,158	-734,516	3497,158
UTMVTR10	2745,180	4552,468	5152,922	8167,046	4769,874	-2024,470	4769,874
UTMVTR11	2745,180	4552,468	5152,922	8167,046	4769,874	-2024,470	4769,874
UTMVSU02	4025,710	7267,927	8293,669	13752,362	7639,317	-4586,774	7639,317
UTMVSU08	3223,472	5295,415	6164,725	9439,300	5610,165	-2048,106	5610,165
UTMVSU09	4122,427	7560,297	8574,213	14436,039	7927,405	-5089,864	7927,405
UTMVMT01	1504,755	2202,139	2446,572	3596,905	2290,640	-321,888	2290,640
UTMVMT02	1510,370	2213,862	2458,778	3620,848	2302,539	-334,079	2302,539
UTMVMT03	1338,523	1880,906	2098,143	2965,673	1959,561	-52,664	1959,561
UTMVMT04	1466,332	2123,658	2363,851	3438,309	2210,624	-244,745	2210,624
UTMVMT05	1466,332	2123,658	2363,851	3438,309	2210,624	-244,745	2210,624
UTMVMT06	1287,444	1789,984	1995,624	2795,064	1864,440	3,192	1864,440
UTMVMT07	1564,617	2330,874	2578,359	3863,389	2420,481	-465,335	2420,481
UTMVMT08	1560,229	2321,143	2568,572	3842,973	2410,730	-453,756	2410,730
UTMVMT09	1564,617	2330,874	2578,359	3863,389	2420,481	-465,335	2420,481
UTMVMT10	1567,428	2337,134	2584,640	3876,545	2426,748	-472,846	2426,748

Fonte: elaborada pelo autor.

Os limites de aproximação segura finais apresentaram valores bem elevados, isso se deve, principalmente aos níveis das correntes de falta e ao tempo de duração do arco, que foi considerado o tempo de atuação dos dispositivos de proteção.

5.7.2 Calculando o limite de aproximação segura dos painéis elétricos de 480 V

Como a tensão dos painéis elétricos é menor que 600 V, foi calculado o limite de aproximação segura intermediário $AFB_{\leq 600}$, utilizando a Equação (41) e a Tabela 8.

A Tabela 19 apresenta os resultados dos cálculos do limite de aproximação segura de cada painel elétrico.

Tabela 19 – Resultados obtidos dos limites de aproximação segura dos painéis elétricos.

Painel elétrico (BT)	$AFB_{\leq 600}$ (mm)	AFB (mm)
BTLVTR01	821,322	821,322
BTLVTR02	1009,354	1009,354
BTLVTR03	1121,049	1121,049
BTLVTR04	1189,735	1189,735
BTLVTR05	806,924	806,924
BTLVTR06	1019,941	1019,941
BTLVTR07	1107,336	1107,336
BTLVTR08	818,578	818,578
BTLVTR09	998,066	998,066
BTLVTR10	936,865	936,865
BTLVTR11	936,865	936,865

Fonte: elaborada pelo autor.

Os limites de aproximação segura finais apresentaram valores menores, em comparação com às dos cubículos blindados devido ao tempo de atuação dos dispositivos de proteção.

5.8 Determinação das vestimentas retardantes a chama e EPIs resistentes a arco

Foram aplicadas as recomendações da norma NFPA 70E (2021) para determinação e escolha da categoria dos EPIs necessários para proteger os trabalhadores, a partir dos níveis da energia incidente, utilizando o Método de Análise de Energia Incidente.

Para energia incidente acima de 40 cal/cm², a norma ABNT NBR 16384 (2020) recomenda desenergização dos painéis antes de qualquer intervenção neles, pois não há vestimentas retardantes a chama que suportam esse nível. Para energia incidente menor do que 1,2 cal/cm², não há necessidade de EPIs resistentes a arco.

A Tabela 20 apresenta os resultados das especificações da categoria de EPI resistentes a arco a partir dos valores da energia incidente, de acordo com o Método de Análise de Energia Incidente.

Tabela 20 – Resultados da categoria de EPI a partir do Método de Análise de Energia Incidente.

Cubículo blindado (MT)/ Painel elétrico (BT)	V_{oc} (kV)	E (J/cm ²)	E (cal/cm ²)	Categoria de EPI (cal/cm ²)
UTMVIN01	6,9	227,986	54,445	Necessária desenergização
UTMVIN02	6,9	230,019	54,930	Necessária desenergização
UTMVTR01	6,9	78,734	18,802	EI > 12
UTMVTR02	6,9	56,999	13,612	EI > 12
UTMVTR03	6,9	79,773	19,050	EI > 12

Cubículo blindado (MT)/ Painel elétrico (BT)	V_{oc} (kV)	E (J/cm ²)	E (cal/cm ²)	Categoria de EPI (cal/cm ²)
UTMVTR04	6,9	78,465	18,738	EI > 12
UTMVTR05	6,9	52,863	12,624	EI > 12
UTMVTR06	6,9	67,302	16,072	EI > 12
UTMVTR07	6,9	67,302	16,072	EI > 12
UTMVTR08	6,9	69,128	16,508	EI > 12
UTMVTR09	6,9	48,827	11,660	1,2 ≤ EI ≤ 12
UTMVTR10	6,9	82,687	19,746	EI > 12
UTMVTR11	6,9	82,687	19,746	EI > 12
UTMVSU02	6,9	183,840	43,902	Necessária desenergização
UTMVSU08	6,9	108,812	25,985	EI > 12
UTMVSU09	6,9	195,809	46,760	Necessária desenergização
UTMVMT01	6,9	23,829	5,691	1,2 ≤ EI ≤ 12
UTMVMT02	6,9	24,040	5,741	1,2 ≤ EI ≤ 12
UTMVMT03	6,9	18,285	4,366	1,2 ≤ EI ≤ 12
UTMVMT04	6,9	22,434	5,357	1,2 ≤ EI ≤ 12
UTMVMT05	6,9	22,434	5,357	1,2 ≤ EI ≤ 12
UTMVMT06	6,9	16,805	4,013	1,2 ≤ EI ≤ 12
UTMVMT07	6,9	26,168	6,249	1,2 ≤ EI ≤ 12
UTMVMT08	6,9	25,989	6,206	1,2 ≤ EI ≤ 12
UTMVMT09	6,9	26,168	6,249	1,2 ≤ EI ≤ 12
UTMVMT10	6,9	26,283	6,277	1,2 ≤ EI ≤ 12
BTLVTR01	0,48	8,610	2,056	1,2 ≤ EI ≤ 12
BTLVTR02	0,48	12,501	2,985	1,2 ≤ EI ≤ 12
BTLVTR03	0,48	15,115	3,609	1,2 ≤ EI ≤ 12
BTLVTR04	0,48	16,831	4,019	1,2 ≤ EI ≤ 12
BTLVTR05	0,48	8,338	1,991	1,2 ≤ EI ≤ 12
BTLVTR06	0,48	12,739	3,042	1,2 ≤ EI ≤ 12
BTLVTR07	0,48	14,782	3,530	1,2 ≤ EI ≤ 12
BTLVTR08	0,48	8,558	2,044	1,2 ≤ EI ≤ 12
BTLVTR09	0,48	12,249	2,925	1,2 ≤ EI ≤ 12
BTLVTR10	0,48	10,924	2,609	1,2 ≤ EI ≤ 12
BTLVTR11	0,48	10,924	2,609	1,2 ≤ EI ≤ 12

Fonte: elaborada pelo autor.

Quatro cubículos blindados apresentaram energia incidente acima de 40 cal/cm², e, como não há vestimentas que suportam esses níveis, de acordo com a norma ABNT NBR 16384 (2020), deve-se desenergizá-los antes de executar algum trabalho nos painéis.

Todos os painéis elétricos de baixa tensão e onze cubículos blindados apresentaram classificação de EPI entre 1,2 a 12 cal/cm². Dez cubículos blindados apresentaram classificação de EPI com energia incidente acima de 12 cal/cm².

Nenhum painel apresentou a classificação de EPI para energia incidente abaixo de 1,2 cal/cm².

5.9 Elaboração das placas de sinalização

Conforme recomendado na norma NFPA 70E (2021), os painéis deverão ser identificados através de etiquetas de sinalização com informações sobre a tensão nominal, nível de energia incidente e limite de aproximação segura.

Foram elaborados modelos de placas de sinalização conforme nível de energia incidente e categoria dos EPIs, com o objetivo de alertar os trabalhadores sobre os riscos. Os layouts estão dispostos no Apêndice A desse trabalho.

5.10 Análise dos resultados obtidos e propostas de mitigação

A Tabela 21 apresenta os principais resultados obtidos para cada painel, como a tensão nominal (V_{oc}), em kV, a corrente de curto-circuito trifásico (I_{bf}) e a corrente de arco elétrico (I_{arc}), em kA, o tempo total de atuação dos dispositivos de proteção (t), em ms, a energia incidente (E), em J/cm² e em cal/cm², o limite de aproximação segura (AFB), em mm, e a categoria dos EPIs e das vestimentas retardantes a chama.

Tabela 21 – Resultados obtidos da corrente de arco, da energia incidente, do limite de aproximação segura e da categoria de EPI de cada painel.

Cubículo blindado (MT)/ Painel elétrico (BT)	V_{oc} (kV)	I_{bf} (kA)	I_{arc} (kA)	t (ms)	E (J/cm ²)	E (cal/cm ²)	AFB (mm)	Categoria de EPI (cal/cm ²)
UTMVIN01	6,9	32,90	28,621	600	227,986	54,445	8666,621	Necessária desenergização
UTMVIN02	6,9	33,13	28,812	600	230,019	54,930	8711,761	Necessária desenergização
UTMVTR01	6,9	24,38	21,400	300	78,734	18,802	4634,330	EI > 12
UTMVTR02	6,9	18,42	16,228	300	56,999	13,612	3831,242	EI > 12
UTMVTR03	6,9	24,65	21,633	300	79,773	19,050	4670,233	EI > 12
UTMVTR04	6,9	24,31	21,340	300	78,465	18,738	4625,018	EI > 12
UTMVTR05	6,9	17,22	15,179	300	52,863	12,624	3664,843	EI > 12
UTMVTR06	6,9	21,32	18,753	300	67,302	16,072	4225,407	EI > 12
UTMVTR07	6,9	21,32	18,753	300	67,302	16,072	4225,407	EI > 12
UTMVTR08	6,9	21,82	19,187	300	69,128	16,508	4292,567	EI > 12
UTMVTR09	6,9	16,03	14,138	300	48,827	11,660	3497,158	$1,2 \leq EI \leq 12$
UTMVTR10	6,9	25,40	22,277	300	82,687	19,746	4769,874	EI > 12
UTMVTR11	6,9	25,40	22,277	300	82,687	19,746	4769,874	EI > 12
UTMVSU02	6,9	27,71	24,253	600	183,840	43,902	7639,317	Necessária desenergização
UTMVSU08	6,9	17,67	15,573	600	108,812	25,985	5610,165	EI > 12
UTMVSU09	6,9	29,158	25,483	600	195,809	46,760	7927,405	Necessária desenergização
UTMVMT01	6,9	22,46	19,742	100	23,829	5,691	2290,640	$1,2 \leq EI \leq 12$

Cubículo blindado (MT)/ Painel elétrico (BT)	V_{oc} (kV)	I_{bf} (kA)	I_{arc} (kA)	t (ms)	E (J/cm ²)	E (cal/cm ²)	AFB (mm)	Categoria de EPI (cal/cm ²)
UTMVMT02	6,9	22,63	19,889	100	24,040	5,741	2302,539	$1,2 \leq EI \leq 12$
UTMVMT03	6,9	17,80	15,686	100	18,285	4,366	1959,561	$1,2 \leq EI \leq 12$
UTMVMT04	6,9	21,32	18,753	100	22,434	5,357	2210,624	$1,2 \leq EI \leq 12$
UTMVMT05	6,9	21,32	18,753	100	22,434	5,357	2210,624	$1,2 \leq EI \leq 12$
UTMVMT06	6,9	15,00	14,549	100	16,805	4,013	1864,440	$1,2 \leq EI \leq 12$
UTMVMT07	6,9	24,32	21,348	100	26,168	6,249	2420,481	$1,2 \leq EI \leq 12$
UTMVMT08	6,9	24,18	21,228	100	25,989	6,206	2410,730	$1,2 \leq EI \leq 12$
UTMVMT09	6,9	24,32	21,348	100	26,168	6,249	2420,481	$1,2 \leq EI \leq 12$
UTMVMT10	6,9	24,41	21,426	100	26,283	6,277	2426,748	$1,2 \leq EI \leq 12$
BTLVTR01	0,48	26,28	21,023	50	8,610	2,056	821,322	$1,2 \leq EI \leq 12$
BTLVTR02	0,48	38,66	29,294	50	12,501	2,985	1009,354	$1,2 \leq EI \leq 12$
BTLVTR03	0,48	49,57	34,770	50	15,115	3,609	1121,049	$1,2 \leq EI \leq 12$
BTLVTR04	0,48	59,55	38,393	50	16,831	4,019	1189,735	$1,2 \leq EI \leq 12$
BTLVTR05	0,48	25,50	20,436	50	8,338	1,991	806,924	$1,2 \leq EI \leq 12$
BTLVTR06	0,48	39,53	29,794	50	12,739	3,042	1019,941	$1,2 \leq EI \leq 12$
BTLVTR07	0,48	47,97	34,072	50	14,782	3,530	1107,336	$1,2 \leq EI \leq 12$
BTLVTR08	0,48	26,13	20,911	50	8,558	2,044	818,578	$1,2 \leq EI \leq 12$
BTLVTR09	0,48	37,76	28,765	50	12,249	2,925	998,066	$1,2 \leq EI \leq 12$
BTLVTR10	0,48	33,30	25,971	50	10,924	2,609	936,865	$1,2 \leq EI \leq 12$
BTLVTR11	0,48	33,30	25,971	50	10,924	2,609	936,865	$1,2 \leq EI \leq 12$

Fonte: elaborada pelo autor.

Ao analisar os resultados da Tabela 21, todos os cubículos blindados e painéis elétricos apresentam energia incidente acima de 1,2 cal/cm², o que corresponde a um risco de queimadura de segundo e terceiro grau, sem o uso de equipamento de proteção individual.

Além disso, observa-se que os valores mais críticos são dos cubículos blindados UTMVIN01 e UTMVIN02, que correspondem à alimentação geral da indústria, e os UTMVSU02 e UTMVSU09, que alimentam algumas salas elétricas. Esses cubículos apresentam níveis de energia incidente acima de 40 cal/cm², e não há vestimentas retardantes a chama que protejam os trabalhadores para esses níveis. Portanto, é recomendado trabalhar com o painel desenergizado. Esses valores elevados da energia incidente se devem, principalmente, ao alto valor da corrente de curto-circuito e ao tempo de atuação dos dispositivos de proteção que tem maior duração comparado com os outros painéis.

Pode ser observado também que, quanto maior a energia incidente, maior será o limite de aproximação segura para o operador não sofrer danos de queimaduras. As maiores distâncias dos limites de aproximação segura foram dos cubículos blindados de entrada de energia, acima de 8 metros, e diversos cubículos apresentaram distâncias acima de 4 metros, ficando inviável a aproximação dos operadores para uma possível manutenção e impossibilitando o acesso aos barramentos energizados.

É de extrema importância para a segurança e proteção dos operadores e dos equipamentos que os níveis de energia incidentem acima de $1,2 \text{ cal/cm}^2$ sejam reduzidos, pois os trabalhadores poderão sofrer queimaduras de 2º, mesmo utilizando EPI adequado. Portanto, deve-se tomar providências para mitigar a energia incidente.

Vale lembrar que, os parâmetros que influenciam na energia incidente são, fundamentalmente, a corrente de curto-circuito e o tempo em que o sistema de proteção elimina o arco elétrico.

Neste caso, uma vez que a unidade industrial já existe e encontra-se em operação, não há como atuar no primeiro, pois as medidas de mitigar as correntes de curto-circuito necessitam de grande intervenção em instalar dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito, como a instalação de reatores, normalmente implementado em fase de projeto. Portanto, o trabalho será focado na tentativa de redução dos tempos de eliminação do arco elétrico, pelos sistemas de proteção existentes ou pela recomendação de novos dispositivos.

Desta forma, serão apresentadas algumas recomendações possíveis para serem adotadas com o objetivo de reduzir a energia incidente nos painéis da indústria.

Uma das medidas para mitigar os níveis de energia incidente é a utilização dos ajustes otimizados na curva dos relés e disjuntores presentes na instalação, ou seja, diminuindo o tempo de atuação dos dispositivos de proteção. No entanto, vale ressaltar que, ao se implementar essa solução, poderá haver descoordenação e perda de seletividade entre os dispositivos de proteção a montante e a jusante, caso ocorra alguma falta no sistema.

A melhor proposta de solução para a mitigação dos riscos de arco elétrico é a instalação de relés contra arco elétrico nos painéis. Uma vez que a energia incidente é proporcional ao tempo de duração do arco, esses equipamentos são capazes de desligar o circuito ao detectar a corrente de arco elétrico e a luz proveniente dele, com um tempo de atuação bem reduzido. Como o tempo é muito curto, haverá diminuição do nível de energia incidente. Outra vantagem é que não é preciso coordenar o relé com outros dispositivos de proteção, não comprometendo a coordenação de seletividade dos dispositivos de proteção do sistema.

Neste íterim, como a unidade industrial não possui relés específicos para proteção contra arco, foi escolhido a implementação de relés com função de detecção de arco elétrico integrado, compostos por sensores de luz, do fabricante SEL, com tempo de resposta de 2 ms. Para a proteção dos alimentadores será utilizado o modelo SEL-751, e para proteção dos motores, SEL-710-5. Foi realizado novamente o estudo da energia incidente em todos os painéis e cubículos com a implementação desse relé, utilizando nos cálculos o tempo de 2 ms.

Os resultados obtidos com a instalação desses relés são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados obtidos com a utilização de relés detectores de arco elétrico.

Cubículo blindado (MT)/ Painel elétrico (BT)	V_{oc} (kV)	I_{bf} (kA)	t (ms)	E (J/cm ²)	E (cal/cm ²)	AFB (mm)	Categoria de EPI (cal/cm²)
UTMVIN01	6,9	32,90	2,0	0,760	0,181	300,770	EI < 1,2
UTMVIN02	6,9	33,13	2,0	0,767	0,183	302,348	EI < 1,2
UTMVTR01	6,9	24,38	2,0	0,525	0,125	241,778	EI < 1,2
UTMVTR02	6,9	18,42	2,0	0,380	0,091	199,832	EI < 1,2
UTMVTR03	6,9	24,65	2,0	0,532	0,127	243,657	EI < 1,2
UTMVTR04	6,9	24,31	2,0	0,523	0,125	241,291	EI < 1,2
UTMVTR05	6,9	17,22	2,0	0,352	0,084	191,154	EI < 1,2
UTMVTR06	6,9	21,32	2,0	0,449	0,107	220,405	EI < 1,2
UTMVTR07	6,9	21,32	2,0	0,449	0,107	220,405	EI < 1,2
UTMVTR08	6,9	21,82	2,0	0,461	0,110	223,913	EI < 1,2
UTMVTR09	6,9	16,03	2,0	0,326	0,078	182,412	EI < 1,2
UTMVTR10	6,9	25,40	2,0	0,551	0,132	248,871	EI < 1,2
UTMVTR11	6,9	25,40	2,0	0,551	0,132	248,871	EI < 1,2
UTMVSU02	6,9	27,71	2,0	0,613	0,146	264,914	EI < 1,2
UTMVSU08	6,9	17,67	2,0	0,363	0,087	194,423	EI < 1,2
UTMVSU09	6,9	29,16	2,0	0,653	0,156	274,958	EI < 1,2
UTMVMT01	6,9	22,46	2,0	0,477	0,114	228,392	EI < 1,2
UTMVMT02	6,9	22,63	2,0	0,481	0,115	229,580	EI < 1,2
UTMVMT03	6,9	17,80	2,0	0,366	0,087	195,364	EI < 1,2
UTMVMT04	6,9	21,32	2,0	0,449	0,107	220,405	EI < 1,2
UTMVMT05	6,9	21,32	2,0	0,449	0,107	220,405	EI < 1,2
UTMVMT06	6,9	15,00	2,0	0,303	0,072	174,710	EI < 1,2
UTMVMT07	6,9	24,32	2,0	0,523	0,125	241,361	EI < 1,2
UTMVMT08	6,9	24,18	2,0	0,520	0,124	240,386	EI < 1,2
UTMVMT09	6,9	24,32	2,0	0,523	0,125	241,361	EI < 1,2
UTMVMT10	6,9	24,41	2,0	0,526	0,126	241,987	EI < 1,2
BTLVTR01	0,48	26,28	2,0	0,344	0,082	138,594	EI < 1,2
BTLVTR02	0,48	38,66	2,0	0,500	0,119	170,323	EI < 1,2
BTLVTR03	0,48	49,57	2,0	0,605	0,144	189,171	EI < 1,2
BTLVTR04	0,48	59,55	2,0	0,673	0,161	200,762	EI < 1,2
BTLVTR05	0,48	25,50	2,0	0,334	0,080	136,164	EI < 1,2
BTLVTR06	0,48	39,53	2,0	0,510	0,122	172,110	EI < 1,2
BTLVTR07	0,48	47,97	2,0	0,591	0,141	186,857	EI < 1,2
BTLVTR08	0,48	26,13	2,0	0,342	0,082	138,131	EI < 1,2
BTLVTR09	0,48	37,76	2,0	0,490	0,117	168,419	EI < 1,2
BTLVTR10	0,48	33,30	2,0	0,437	0,104	158,091	EI < 1,2
BTLVTR11	0,48	33,30	2,0	0,437	0,104	158,091	EI < 1,2

Fonte: elaborada pelo autor.

Percebe-se que, quando instalado o relé detector de arco, o tempo de duração do arco será o tempo de atuação do relé, que é muito menor do que o tempo dos dispositivos de proteção já instalados, isso influencia na redução dos valores da energia incidente, do limite de aproximação segura e da categoria das vestimentas retardantes a chama, além da segurança dos trabalhadores.

5.11 Análise e comparação dos resultados

A Tabela 23 apresenta a comparação entre a instalação industrial com o sistema de proteção atual e com a proposta de mitigação escolhida:

Tabela 23 – Comparação dos resultados entre a instalação industrial com o sistema de proteção atual e com relé detector de arco.

Cubículo blindado (MT)/ Painel elétrico (BT)	Sistema de proteção atual				Com relé detector de arco			
	t (ms)	E (cal/cm ²)	AFB (mm)	Categoria de EPI (cal/cm ²)	t (ms)	E (cal/cm ²)	AFB (mm)	Categoria de EPI (cal/cm ²)
UTMVIN01	600	54,445	8666,621	Necessária desenergização	2,0	0,181	300,770	EI < 1,2
UTMVIN02	600	54,930	8711,761	Necessária desenergização	2,0	0,183	302,348	EI < 1,2
UTMVTR01	300	18,802	4634,330	EI > 12	2,0	0,125	241,778	EI < 1,2
UTMVTR02	300	13,612	3831,242	EI > 12	2,0	0,091	199,832	EI < 1,2
UTMVTR03	300	19,050	4670,233	EI > 12	2,0	0,127	243,657	EI < 1,2
UTMVTR04	300	18,738	4625,018	EI > 12	2,0	0,125	241,291	EI < 1,2
UTMVTR05	300	12,624	3664,843	EI > 12	2,0	0,084	191,154	EI < 1,2
UTMVTR06	300	16,072	4225,407	EI > 12	2,0	0,107	220,405	EI < 1,2
UTMVTR07	300	16,072	4225,407	EI > 12	2,0	0,107	220,405	EI < 1,2
UTMVTR08	300	16,508	4292,567	EI > 12	2,0	0,110	223,913	EI < 1,2
UTMVTR09	300	11,660	3497,158	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,078	182,412	EI < 1,2
UTMVTR10	300	19,746	4769,874	EI > 12	2,0	0,132	248,871	EI < 1,2
UTMVTR11	300	19,746	4769,874	EI > 12	2,0	0,132	248,871	EI < 1,2
UTMVSU02	600	43,902	7639,317	Necessária desenergização	2,0	0,146	264,914	EI < 1,2
UTMVSU08	600	25,985	5610,165	EI > 12	2,0	0,087	194,423	EI < 1,2
UTMVSU09	600	46,760	7927,405	Necessária desenergização	2,0	0,156	274,958	EI < 1,2
UTMVMT01	100	5,691	2290,640	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,114	228,392	EI < 1,2
UTMVMT02	100	5,741	2302,539	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,115	229,580	EI < 1,2
UTMVMT03	100	4,366	1959,561	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,087	195,364	EI < 1,2
UTMVMT04	100	5,357	2210,624	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,107	220,405	EI < 1,2
UTMVMT05	100	5,357	2210,624	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,107	220,405	EI < 1,2
UTMVMT06	100	4,013	1864,440	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,072	174,710	EI < 1,2
UTMVMT07	100	6,249	2420,481	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,125	241,361	EI < 1,2
UTMVMT08	100	6,206	2410,730	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,124	240,386	EI < 1,2
UTMVMT09	100	6,249	2420,481	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,125	241,361	EI < 1,2
UTMVMT10	100	6,277	2426,748	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,126	241,987	EI < 1,2
BTLVTR01	50	2,056	821,322	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,082	138,594	EI < 1,2
BTLVTR02	50	2,985	1009,354	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,119	170,323	EI < 1,2
BTLVTR03	50	3,609	1121,049	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,144	189,171	EI < 1,2
BTLVTR04	50	4,019	1189,735	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,161	200,762	EI < 1,2
BTLVTR05	50	1,991	806,924	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,080	136,164	EI < 1,2
BTLVTR06	50	3,042	1019,941	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,122	172,110	EI < 1,2
BTLVTR07	50	3,530	1107,336	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,141	186,857	EI < 1,2
BTLVTR08	50	2,044	818,578	1,2 ≤ EI ≤ 12	2,0	0,082	138,131	EI < 1,2

Cubículo blindado (MT)/ Painel elétrico (BT)	Sistema de proteção atual				Com relé detector de arco			
	t (ms)	E (cal/cm ²)	AFB (mm)	Categoria de EPI (cal/cm ²)	t (ms)	E (cal/cm ²)	AFB (mm)	Categoria de EPI (cal/cm ²)
BTLVTR09	50	2,925	998,066	$1,2 \leq EI \leq 12$	2,0	0,117	168,419	$EI < 1,2$
BTLVTR10	50	2,609	936,865	$1,2 \leq EI \leq 12$	2,0	0,104	158,091	$EI < 1,2$
BTLVTR11	50	2,609	936,865	$1,2 \leq EI \leq 12$	2,0	0,104	158,091	$EI < 1,2$

Fonte: elaborada pelo autor.

Ao analisar os resultados da recomendação escolhida e comparar com os valores do sistema de proteção atual, observou-se que essa proposta de solução, instalação do relé com função para detectar o arco, apresentou mitigação expressiva em todos os painéis elétricos e cubículos blindados.

Houve uma redução significativa dos valores da energia incidente e do limite de aproximação segura, principalmente nos cubículos blindados da entrada de energia e da alimentação de algumas salas elétricas. Isso se deve pela redução do tempo de atuação que era de 600 ms (entrada de energia e alimentação das salas elétricas), 300 ms (alimentação dos transformadores), 100 ms (alimentação dos motores) e 50 ms (alimentação dos painéis de baixa tensão), e agora foi considerado o tempo de atuação da proteção de 2 ms.

Os cálculos, com a implementação do relé detector de arco, em todos os painéis, resultaram em energia incidente abaixo de 1,2 cal/cm², o que protege os trabalhadores, caso ocorra início de arco elétrico, de queimaduras mais graves.

Para esses níveis de energia incidente, não é obrigatório o uso de EPI resistentes a arco, e os trabalhadores podem utilizar vestimentas e EPI básico, como óculos de segurança, proteção auditiva, camisas e calças compridas e sapato de segurança de couro.

De todo modo, a norma NBR 16384 (ABNT, 2020) nomeia, para esse nível de energia incidente, como nível de proteção “AE-1”, esse nível de proteção apresenta as especificações idênticas aos do “AE-2”, ou seja, são os mesmos que a norma NFPA 70E (2021) indica para energia incidente entre 1,2 cal/cm² a 12 cal/cm².

Recomenda-se que a indústria solicite a aquisição de vestimentas retardantes a chama e EPIs contra arco elétrico adequados com classificação de energia incidente superior e próxima de 1,2 cal/cm² para seus trabalhadores.

Portanto, ao implementar e parametrizar a função de detecção de arco elétrico nos relés e instalar na indústria, os níveis de energia incidente vão reduzir bastante, oferecendo maior segurança aos trabalhadores e aos equipamentos, diminuindo a probabilidade de acidente decorrente de arco elétrico.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo de energia incidente causada por arco elétrico em uma planta industrial por meio da metodologia de cálculo da norma IEEE 1584 (2018). Além de analisar os níveis de energia incidente de cada painel elétrico, também foram avaliados os limites de aproximação segura e as categorias de vestimentas retardantes da chama e EPIs resistentes a arco adequados, segundo a norma NFPA 70E (2021), e foram propostas algumas recomendações para mitigar o nível da energia incidente.

Os objetivos específicos foram alcançados através dos diversos pontos levantados no trabalho. Foi mostrada a importância de se conhecer os conceitos, causas e consequências, os tipos e os riscos do arco elétrico e a energia incidente para a segurança e proteção dos trabalhadores e dos equipamentos do sistema elétrico. Foram analisados alguns textos normativos referentes à segurança em eletricidade e ao arco elétrico, e estudadas as principais metodologias de cálculo e alguns métodos de mitigação e proteção dos efeitos do arco elétrico.

Também foi realizado um estudo de caso em uma indústria para determinar os níveis de energia incidente, o limite de aproximação segura e as especificações dos EPIs, conforme as normas IEEE 1584 (2018), NFPA 70E (2021), ABNT NBR 16384 (2020). Foi possível constatar que todos os outros painéis apresentaram níveis de energia incidente acima de $1,2 \text{ cal/cm}^2$, implicando que, caso ocorra acidente por arco elétrico, podem causar queimaduras de segundo e terceiro grau. Alguns painéis apresentaram energia incidente acima de 40 cal/cm^2 . A norma ABNT NBR 16384 (2020) não recomenda intervenções em painéis energizados com esses níveis, pois não há vestimentas de proteção para essas circunstâncias.

Foi proposta a instalação de relés detectores de arco, com tempo de atuação de 2 ms, para reduzir o nível de energia incidente dos painéis elétricos. Após, foi realizado um novo estudo de caso, utilizando essa recomendação, para comprovar sua eficácia e eficiência. A partir desse novo estudo, ficou perceptível que todos os painéis elétricos apresentaram redução considerável dos níveis de energia incidente, com valores abaixo de $1,2 \text{ cal/cm}^2$. Também a distância do limite de aproximação segura reduziu, bem como a classificação do nível de ATPV dos EPIs, comprovando que a escolha desse dispositivo foi viável.

Como resultado, pode-se concluir que a indústria, objeto da pesquisa, tende a obter muitos benefícios ao utilizar esse estudo e a proposta de mitigação para reduzir o nível de energia incidente. Assim, por meio do atendimento a cada um dos objetivos específicos e da apresentação do resultado que responde ao problema da pesquisa, considera-se o objetivo geral da pesquisa atendido.

Constatou-se, por meio da pesquisa, quão fundamental é o estudo e o conhecimento acerca da energia incidente e dos riscos provocados pelo arco elétrico, sobre como realizar análise do nível de energia incidente e avaliar métodos de mitigação. Esse estudo poderá ajudar no gerenciamento de risco do arco voltaico, com medidas preventivas, e reduzir graves acidentes provocados por esse fenômeno, garantindo: o aumento da segurança dos trabalhadores na ocorrência de uma falta; a redução dos danos aos equipamentos na ocorrência de um arco elétrico, reduzindo, assim, as despesas na indústria durante seu reparo; e a diminuição das exigências das vestimentas volumosas e dos EPIs que podem atrapalhar os movimentos.

Bem como, diversos setores de tecnologia, em busca de melhoria contínua, realizam pesquisas e estudos para desenvolver diferentes modelos matemáticos, ensaios de laboratórios, e novos equipamentos para mitigação e proteção contra arco elétrico. Todas essas ações, com relação ao arco elétrico, são para tornar mais seguro o trabalho com eletricidade.

Esses estudos poderiam auxiliar, antes da execução do projeto, no planejamento de escolha de equipamentos para minimizar a possibilidade de ocorrer um arco elétrico. Assim, reduzindo os níveis de energia incidente, implementando dispositivos que reduzem a corrente de curto-circuito e dispositivos de proteção e detecção de arco, também em escolhas de equipamentos de proteção coletiva, como os painéis elétricos que suportam arco interno.

O assunto sobre os riscos de arco elétrico, métodos de cálculo e mitigação e proteção, deveria ser implementado e discutido em treinamentos e capacitação de profissionais da área. Também deveria ser introduzido em disciplinas no meio acadêmico, para que os estudantes possam desenvolver habilidades e competências acerca desse risco de origem elétrica. Esse assunto poderá estimular profissionais da área elétrica e acadêmicos a buscarem estudá-lo e aprofundá-lo, e, ao difundir os conhecimentos sobre arco elétrico, poderá ajudar a reduzir os acidentes causados por esse fenômeno no setor de eletricidade.

Nesse contexto, o presente trabalho deixa sua contribuição aos acadêmicos e aos pesquisadores ao estudar o arco elétrico – considerado um dos riscos mais graves na área de eletricidade –, pois apresenta os principais métodos de cálculo da energia incidente, de forma organizada e em língua portuguesa: Método de Ralph Lee, Método de Douthy-Neal e o Método da norma IEEE 1584 (2018), na sua versão mais atualizada. Também, apresenta, de forma condensada, como realizar um gerenciamento de risco e os principais métodos para eliminar, reduzir e proteger contra os riscos de arco elétrico. Vale ressaltar que a metodologia de cálculo da norma IEEE 1584 (2018) é a mais utilizada devido à sua abrangência. Esse trabalho apresenta, com detalhes, cada etapa da metodologia, e mostra a aplicação em um estudo de caso, explicando

cada procedimento para avaliar e analisar a energia incidente e os riscos provocados pelo arco elétrico. Ainda, o trabalho apresenta os métodos mais recentes de seleção das vestimentas retardantes a chama e EPIs resistentes a arco, além de ajudar, em linhas de pesquisa, a aprofundar os métodos apresentados para reduzir e proteger do arco elétrico, contribuindo, assim, para com a capacitação de profissionais com esse conhecimento a fim de aplicá-lo quando de sua atuação no mercado de trabalho.

Para propostas de continuidade em trabalhos posteriores, sugere-se, realizar uma simulação do estudo de caso utilizado um software específico, como o ETAP; aplicar outros tipos de mitigação de energia incidente, como instalação de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito ou outros dispositivos para redução do tempo de eliminação do arco, e comparar os resultados; fazer um estudo de investimentos e custos das instalações de cada método de redução dos níveis de energia incidente, e compará-los; implementar um software, a partir da metodologia de cálculo da norma IEEE 1584 e da metodologia de seleção de EPI, conforme norma NFPA 70E, capaz de calcular a energia incidente e o limite de aproximação segura, gerar placas de sinalização e realizar recomendações para mitigar a energia incidente.

REFERÊNCIAS

ABB. **Monitor de Arco Elétrico – TVOC-2**. ABB LTDA. 2010.

ABB. **Necessita de seletividade e proteção no seu sistema? Agora você pode! Deixe-nos te mostrar como**. 2021. Industrial Solutions. Disponível em: <https://industrialsolutions.br.abb.com/arcwatch>. Acesso em julho 2021.

ABNT. ABNT NBR 16384: Segurança em eletricidade – Recomendações e orientações para trabalho seguro em serviços com eletricidade. **Associação Brasileira De Normas Técnicas**. Rio de Janeiro, p. 56. 2020.

ABRACOPEL. **Segurança contra arco elétrico em painéis de Baixa Tensão**. 2015. Abracopel. Disponível em: <https://abracopel.org/blog/seguranca-contr-arco-eletrico-em-paineis-de-baixa-tensao/>. Acesso em julho 2021.

ALMEIDA, A. B.; GOECKING, R. K. **Manual técnico sobre vestimentas de proteção ao risco de arco elétrico e fogo repentino**. Rio de Janeiro: Publit Soluções Editoriais, 2009.

BRASIL. **Cartilha para tratamento de emergência das queimaduras**. Ministério da Saúde. Brasília – DF, 2012. Disponível em: <https://bvsmms.saude.gov.br/>. Acesso em 27 julho 2021.

BRASIL. NR 6 – Equipamento de proteção individual. **Secretaria de Trabalho. Portaria MTb n.º 877, de 24 de outubro de 2018**. Brasília, DF. 11 p. Out 2018.

BRASIL. NR 10 – Segurança em instalações e serviços em eletricidade. **Secretaria de Trabalho. Portaria SEPRT n.º 915, de 30 de julho de 2019**. Brasília, DF. 18 p. Julho 2019.

BRASIL. NR 28 – Fiscalização e Penalidade. **Secretaria de Trabalho. Portaria SEPRT n.º 9.384, de 06 de abril de 2020**. Brasília, DF. 111 p. Abril 2020.

COELHO, J. I. S. **Definições de condições para mitigação de energia incidente originadas por arco elétrico**. 2018. Trabalho final de curso, Curso de Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-Minas). Belo Horizonte, 2018.

COOPER, Donald; SCHINDLER, Pamela. **Métodos de pesquisa em administração**. São Paulo: Artmed, 2001.

CRNKO, T.; DYRES, S. Arcing fault hazards and safety suggestions for design and maintenance. **IEEE Pulp and Paper Industry Technical Conference** p. 118-126, Jun 2000.

DESHAW, B. **The “Godfather” of the Arc Flash Study**. 2015. Global Energy Laboratories – GeL. Disponível em: <http://www.globalenergylaboratories.com/thegodfather-of-the-arc-flash-study/>. Acesso em: junho 2021.

DOUGHTY, R. L.; NEAL, T. E.; FLOYD, H. L. Predicting incidente energy to better manage the electric arc hazard on 600 V power distribution systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 36, n. 1, Jan 2000.

E-HAZARD. **PPE Poster for Electrical Workers**. Louisville, KY: 2021. Disponível em:

<https://e-hazard.com/product/ppe-poster-for-electrical-workers/>. Acesso em 09 agosto 2021.

EASTERN WASHINGTON UNIVERSITY ENVIRONMENTAL HEALTH & SAFETY OFFICE. **Electrical Safety**. Washington, Estados Unidos. Disponível em:

<https://inside.ewu.edu/ehs/laboratories-and-shops/shop-safety/electrical-safety/>. Acesso em julho 2021.

ELECTRICAL SAFETY (UK) LTD. **What Is An Arc Flash Study?** England: 2021. Disponível em: <https://elecsafety.co.uk/what-is-an-arc-flash-study/>. Acesso em 29 julho 2021.

EVANS, W. **Severely injured worker sues Tesla: ‘I’m not who I used to be’**. Reveal, Emeryville, CA: 2018. Disponível em: <https://revealnews.org/blog/im-not-who-i-used-to-be-severely-injured-worker-sues-tesla/>. Acesso em: agosto de 2021.

G&W ELECTRIC. Are You Prepared to Mitigate Arc Flash Risk? White Paper. **G&W Electric**, GWWP02-2019 7, 2019.

G&W ELECTRIC. **CLiP-LV Current Limiting Protector**. 2019.

GOLOVKOV, M.; SCHAU, H.; BURDGE, G. Electric arc: Protecting Against thermal effect. **Professional Safety**, v. 62, p. 49-54, 2017.

HOAGLAND, E. Myths and facts in selection of Personal Protective Equipment for Arc Flash Hazard Mitigation Utilizing NFPA 70E and applicable ASTM standards. **48th IEEE Industrial & Commercial Power Systems Conference**. Lousville: IEEE, 2012.

IEEE-1584. IEEE Guide for performing arc flash hazard calculations. **IEEE STD 1584-2018 (Revision of IEEE Std 1584-2002)**, p. 1-134, Nov 2018.

INDUSTRIAL TEST. **PPE table extracted from 2018 & 2021 edition of NFPA 70E standard for electrical safety in the workplace**, 2020. Disponível em:

<http://industrialtests.com/workplace-handbook/>. Acesso em 07 agosto 2021.

LANG, M.; NEAL, T.; WILKINS, R. Introduction to arc flash, **8th International Conference on Electric Fuses and their Applications**, Blaise Pascal Academic Press, 2007.

LEE, R. H. The Other electrical hazard: Electrical arc blast bruns. **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 1A-18, p. 246-251, May/June 1982.

MARDEGAN, C. **Proteção e seletividade em sistemas elétricos industriais**. 1. Ed. São Paulo: Atitude Editorial, 2012. 400 p.

MARDEGAN, C. Proteção e seletividade. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 64, p. 30-43, Maio 2011.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 144, p. 28-33, Jan 2018.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 145, p. 30-35, Fev 2018.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 146, p. 32-37, Mar 2018.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 147, p. 36-41, Abr 2018.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 148, p. 38-40, Maio 2018.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 149, p. 36-39, Jun 2018.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 150, p. 26-29, Jul 2018.

MARTINHO, E. **O Arco elétrico e a ABNT NBR 16384:2020**. 2020. Disponível em: <https://universolambda.com.br/o-arco-eletrico-e-a-abnt-nbr-163842020/>. Acesso em 01 agosto 2021.

MONTEIRO, A. M. **Um estudo de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito com ênfase no IPC (Interphase Power Controller)**. 2005. Dissertação de mestrado, Pós graduação de Engenharia, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2005.

MOREIRA, E. **21/07 - A segurança em normas e regulamentos**. 2021. Disponível em: <https://youtu.be/8d2XqTH3A4Y>. Acesso em 05 agosto 2021.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION NFPA 70E. **Standard for Electrical Safety in the Workplace**, 2021. Disponível em: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=70E>. Acesso em 04 agosto 2021.

NEAL, T. E.; BINGHAM, A. H.; DOUGHTY, R. L.; Protective clothing guidelines for electric arc exposure. **IAS Petroleum and Chemical Industry Technical Conference**, p. 281-298, Sept. 1996.

PARK, S. **Your deep dive into NFPA 70E 2018**, 2018. Disponível em: <https://iaeimagazine.org/features/codes-standards/your-deep-dive-into-nfpa-70e-2018/>. Acesso em 20 julho 2021.

PEREIRA, L. F. **Estudo da energia incidente por arco elétrico sob a ótica da Engenharia de Segurança do Trabalho**. 2020. Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho, Pitágoras Faculdade. Poço de Caldas, Minas Gerais, 2020.

PIERRE, C. *et al.* **Practical Solution Guide to Arc Flash Hazards**, 2th ed. Mohawk St, Tualatin: EasyPower, LLC, 2015.

PINHEIRO JUNIOR, V. C. **Estudo de arco elétrico em subestações de um sistema industrial**. 2014. Trabalho de conclusão de curso. Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará (UFPA). Tucuruí, Pará, 2014.

PINHO, D. **Queimaduras de 1º, 2º e 3º Grau**. 7º G. C. I. R – Grupo de Combate a Incêndio e Resgate 2010. Disponível em: <http://7gcir.blogspot.com/2010/05/queimaduras.html>. Acesso em julho 2021.

QUEIROZ, A. R. S. **Utilização de relés digitais para mitigação dos riscos envolvendo arco elétrico**. 2011. Dissertação de Mestrado, Curso de Ciências, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

QUEIROZ, A. R. S.; SENGER, E. C. Proteção contra arco elétrico e EPIs. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 72, p. 46-51, Jan 2012.

QUEIROZ, A. R. S.; SENGER, E. C. Proteção contra arco elétrico e EPIs. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 74, p. 30-35, Mar 2012.

QUEIROZ, A. R. S.; SENGER, E. C. Proteção contra arco elétrico e EPIs. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 75, p. 36-40, Abr 2012.

QUEIROZ, A. R. S.; SENGER, E. C. Proteção contra arco elétrico e EPIs. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 76, p. 34-39, Maio 2012.

QUEIROZ, A. R. S.; SENGER, E. C. Proteção contra arco elétrico e EPIs. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 78, p. 36-38, Jul 2012.

QUEIROZ, A. R. S.; SENGER, E. C.; MORAES, C. C. Proteção contra arco elétrico e EPIs. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 77, p. 34-39, Jun 2012.

QUEIROZ, A. R. S.; SENGER, E. C.; OLIVEIRA, M. F. Proteção contra arco elétrico e EPIs. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 73, p. 42-47, Fev 2012.

REIS, L. G. **Produção de monografia: da teoria à prática**. 2. Ed. Brasília: SENAC-DF, 2008.

RESENDE, F. B. **Proteção Elétrica em Subestações: uma Abordagem Sobre a Energia Incidente**. 2016. Dissertação de mestrado, Curso de Engenharia Elétrica, UFMG. Minas Gerais, 2016.

SEL. **Soluções SEL contra arco elétrico**. SEL – Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. 2018.

TOMIYOSHI, L. K. Vestimenta de proteção contra queimaduras por arcos elétricos. **DuPont do Brasil S.A.** São Paulo – SP, 2004.

TRINDADE, P. G. **Medidas para redução de níveis de curto-circuito: Estudo de caso da Área Rio**. 2019. Trabalho final de curso, Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, UFRJ. Rio de Janeiro, 2019.

VARIXX. **Zyggot arco sistema de proteção contra arco voltaico através de sensores que detectam ultravioleta**. Piracicaba – SP, [201-].

VOLTIMUM. **Gefährdungsanalyse - Sich selbst und Mitarbeiter bei Störlichtbögen**

rechtssicher schützen, 2020. Disponível em:
<https://www.voltimum.de/artikel/gefahrdungsanalyse-sich-selbst-und>. Acesso em: 13 agosto 2021.

WEG. Painéis elétricos segurança para seus processos. Modularidade para seus projetos. Jaraguá do Sul – SC, 2021.

WRIGHT, B.; D'MELLO, M.; CUCULIC, R. Zone Selective Interlocking On Instantaneous (I-ZSI) & Waveform Recognition (WFR). **Industrial Solutions**. [S. l.], [201-].

APÊNDICE A – Elaboração das placas de sinalização

Nas figuras 43 a 45 são apresentados modelos de placas de sinalização, conforme variação dos níveis de energia incidente com suas recomendações de proteção contra arco elétrico.

Percebe-se que as informações necessárias de segurança para os operários e transeuntes estão em destaques, salientando os riscos. Ressalva-se que as placas devem ser fixadas em locais adequados, deixando-os visíveis e em tamanho que facilite ao máximo a leitura e a compreensão dos dados.

Foram utilizadas as descrições dos equipamentos de proteção individual e vestimentas retardantes a chama, de acordo com as categorias dos EPIs conforme Quadro 3.

Figura 43 – Modelo de placa de sinalização para energia incidente entre 1,2 a 12 cal/cm².

 ATENÇÃO 	
RISCO DE CHOQUE E ARCO ELÉTRICO	
SOMENTE PESSOAS AUTORIZADAS	
UTILIZE EPI RECOMENDADO	
PROTEÇÃO CONTRA ARCO ELÉTRICO	
Distância de Risco de Arco: 609,06 mm	Energia Incidente:
Limite de Proteção contra Arco: 1128,38 mm	8,6 cal/cm²
PROTEÇÃO CONTRA CHOQUES	
Risco de Choque se portas removidas ou abertas: 0,48 kV	Distância - zona controlada: 700 mm Distância - zona de risco: 200 mm
Descrição do EPI: Vestimentas resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de XX cal/cm ² , ou camisas e calças compridas resistentes a arco, ou macacão resistente a arco. Protetor facial resistente a arco com balaclava resistente a arco ou capuz carrasco resistente a arco. Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário. Capacete, óculos de segurança e luvas de couro. Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo). Sapato de segurança em couro. Conforme norma NFPA 70E (2021).	
Localização: MOAGEM DE CIMENTO	
Painel: BTLVTR11	

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 44 – Modelo de placa de sinalização para energia incidente acima de 12 cal/cm².

 ATENÇÃO 	
RISCO DE CHOQUE E ARCO ELÉTRICO	
SOMENTE PESSOAS AUTORIZADAS	
UTILIZE EPI RECOMENDADO	
PROTEÇÃO CONTRA ARCO ELÉTRICO	
Distância de Risco de Arco: 914,4 mm	Energia Incidente:
Limite de Proteção contra Arco: 4757,49 mm	19,65 cal/cm²
PROTEÇÃO CONTRA CHOQUES	
Risco de Choque se portas removidas ou abertas: 6,9 kV	Distância - zona controlada: 1350 mm Distância - zona de risco: 350 mm
Descrição do EPI: Vestimentas resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de XX cal/cm ² , ou camisas e calças compridas resistentes a arco, ou macacão resistente a arco. Capuz carrasco resistente a arco. Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário. Capacete, óculos de segurança e luvas resistentes a arco ou luvas isolantes de borracha com protetores de couro. Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo). Sapato de segurança em couro. Conforme norma NFPA 70E (2021).	
Localização: MOAGEM DE COQUE (SALA ELÉTRICA E3)	
Painel: UTMVMT03	

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 45 – Modelo de placa de sinalização para energia incidente acima de 40 cal/cm².

 ATENÇÃO 	
RISCO DE CHOQUE E ARCO ELÉTRICO	
SOMENTE PESSOAS AUTORIZADAS	
UTILIZE EPI RECOMENDADO	
PROTEÇÃO CONTRA ARCO ELÉTRICO	
Distância de Risco de Arco: 914,4 mm	Energia Incidente:
Limite de Proteção contra Arco: 10322,24 mm	73,24 cal/cm²
PROTEÇÃO CONTRA CHOQUES	
Risco de Choque se portas removidas ou abertas: 6,9 kV	Distância - zona controlada: 1350 mm Distância - zona de risco: 350 mm
Descrição do EPI: PROIBIDA A EXECUÇÃO DE TRABALHOS COM ESTE PAINEL ENERGIZADO. NÃO EXISTE VESTIMENTA ADEQUADA PARA ESTE NÍVEL DE ENERGIA INCIDENTE. O DESLIGAMENTO E O BLOQUEIO DEVEM SER OBRIGATORIAMENTE REALIZADOS PELO OPERADOR, NO CIRCUITO ALIMENTADOR DESTA PAINEL.	
Localização: SALA ELÉTRICA PRINCIPAL E1	
Painel: UTMVIN02	

Fonte: elaborada pelo autor.

ANEXO A – Estudo de curto-circuito

A seguir, na Tabela 24, estão os valores das correntes de curto-circuito monofásico, bifásico e trifásico atualizados, cedidos pela indústria. Para o estudo de caso, foram utilizadas as correntes de curto-circuito trifásico.

Tabela 24 – Estudo de curto-circuito cedido pela indústria.

Cubículo blindado (MT)/ Painel elétrico (BT)	V_{oc} (kV)	I_{bf} (kA) Monofásico	I_{bf} (kA) Bifásico	I_{bf} (kA) Trifásico
UTMVIN01	6,9	31,20	30,58	32,90
UTMVIN02	6,9	31,98	30,48	33,13
UTMVTR01	6,9	22,85	21,12	24,38
UTMVTR02	6,9	17,14	16,43	18,42
UTMVTR03	6,9	23,01	22,61	24,65
UTMVTR04	6,9	22,92	20,15	24,31
UTMVTR05	6,9	16,15	15,95	17,22
UTMVTR06	6,9	20,12	19,41	21,32
UTMVTR07	6,9	20,12	19,41	21,32
UTMVTR08	6,9	20,38	19,80	21,82
UTMVTR09	6,9	15,25	14,75	16,03
UTMVTR10	6,9	24,10	23,46	25,40
UTMVTR11	6,9	24,10	23,46	25,40
UTMVSU02	6,9	26,65	25,05	27,71
UTMVSU08	6,9	16,51	15,12	17,67
UTMVSU09	6,9	28,47	27,91	29,16
UTMVMT01	6,9	21,13	20,17	22,46
UTMVMT02	6,9	21,21	20,46	22,63
UTMVMT03	6,9	16,58	15,08	17,80
UTMVMT04	6,9	20,09	19,46	21,32
UTMVMT05	6,9	20,09	19,46	21,32
UTMVMT06	6,9	14,12	13,90	15,00
UTMVMT07	6,9	23,51	22,91	24,32
UTMVMT08	6,9	23,38	22,89	24,18
UTMVMT09	6,9	23,51	22,91	24,32
UTMVMT10	6,9	23,67	22,99	24,41
BTLVTR01	0,48	25,13	24,49	26,28
BTLVTR02	0,48	37,75	36,21	38,66
BTLVTR03	0,48	47,99	46,97	49,57
BTLVTR04	0,48	59,14	58,45	59,55
BTLVTR05	0,48	24,65	23,06	25,50
BTLVTR06	0,48	38,31	37,94	39,53
BTLVTR07	0,48	46,97	45,88	47,97
BTLVTR08	0,48	25,04	24,42	26,13
BTLVTR09	0,48	37,18	36,06	37,76
BTLVTR10	0,48	32,07	30,58	33,30
BTLVTR11	0,48	32,07	30,58	33,30

Fonte: fornecido pela indústria em estudo.

ANEXO B – Estudo de seletividade

O estudo de seletividade de todos os cubículos e dos painéis elétricos atualizado foi disponibilizado pela indústria. Os Quadros 8 a 15 apresentam todas as características dos dispositivos de proteção dos cubículos blindados de média tensão e dos painéis elétricos de baixa tensão.

Quadro 8 – Cubículos blindados de entrada do sistema.

Cubículo blindado	Função	Ajuste
UTMVIN01 UTMVIN02	27	$U_s = 0,65 \times U_n$
		$t = 500 \text{ ms}$
	59	$U_s = 1,15 \times U_n$
		$t = 1 \text{ s}$
	50	$I_s = 10 \text{ A}$
		$t = 0,6 \text{ s}$
	51	Curva: Extremamente Inversa
		$I_s = 4,6 \text{ A}$
		$T_d = 0,1$
	51G	Curva: Normal Inversa
$I_s = 0,1 \text{ A}$		
		$t = 1,1 \text{ s}$

Fonte: fornecido pela indústria em estudo.

Quadro 9 – Cubículos blindados que alimentam os motores.

Cubículo blindado	Função	Ajuste
UTMVMT01 UTMVMT02 UTMVMT03 UTMVMT04 UTMVMT05 UTMVMT06 UTMVMT07 UTMVMT08 UTMVMT09 UTMVMT10	50	$I_s = 10 \times I_n$
		$t = 0,1 \text{ s}$
	66	$N_h = 2$
		$N_c = 3$
		$t_r = 3600 \text{ s}$
		$96 \text{ }^\circ\text{C}$
	48	Valor de Partida $I_s = 1,4 \times I_n$
		$t = 60.000 \text{ ms}$
	27	Partida do motor = $0,7 \times I_s$
		$U_s = 0,65 \times U_n$
	49	$t = 500 \text{ ms}$
		FLA = 122A@Pri.
		LRC = 6,5 FLA
		Hot LR time = 10 s
	49R	Fator de serviço: 1,15
		$120 \text{ }^\circ\text{C}$
	51G	$t = 400 \text{ s}$
		Curva: Normal Inversa
		$I_s = 0,1 \times I_n$

Fonte: fornecido pela indústria em estudo.

Quadro 10 – Cubículos blindados de entrada das salas elétricas.

Cubículo blindado	Função	Ajuste
UTMVSU02 UTMVSU08 UTMVSU09	27	$U_s = 0,65xU_n$
		$t = 500 \text{ ms}$
	50	$I_s = 20 \text{ A}$
		$t = 0,6 \text{ s}$
	51	Curva: Extremamente Inversa
		$I_s = 5 \text{ A}$
		$T_d = 0,19$
	51G	Curva: Normal Inversa
		$I_s = 0,1 \text{ A}$
$t = 0,7 \text{ s}$		

Fonte: fornecido pela indústria em estudo.

Quadro 11 – Cubículos blindados que alimentam os transformadores.

Cubículo blindado	Função	Ajuste
UTMVTR01 UTMVTR06 UTMVTR10	27	$U_s = 0,65xU_n$
		$t = 500 \text{ ms}$
	50	$I_s = 47,42 \text{ A}$
		$t = 0,3 \text{ s}$
	51	Curva: Extremamente Inversa
		$I_s = 8,74 \text{ A}$
		$T_d = 0,12$
	51G	Curva: Normal Inversa
		$I_s = 0,1 \text{ A}$
$t = 0,3 \text{ s}$		

Fonte: fornecido pela indústria em estudo.

Quadro 12 – Cubículos blindados que alimentam os transformadores.

Cubículo blindado	Função	Ajuste
UTMVTR02 UTMVTR03 UTMVTR04	27	$U_s = 0,65xU_n$
		$t = 500 \text{ ms}$
	50	$I_s = 51,29 \text{ A}$
		$t = 0,3 \text{ s}$
	51	Curva: Extremamente Inversa
		$I_s = 9,45 \text{ A}$
		$T_d = 0,12$
	51G	Curva: Normal Inversa
		$I_s = 0,1 \text{ A}$
$t = 0,3 \text{ s}$		

Fonte: fornecido pela indústria em estudo.

Quadro 13 – Cubículos blindados que alimentam os transformadores.

Cubículo blindado	Função	Ajuste
UTMVTR07 UTMVTR08 UTMVTR09	27	$U_s = 0,65xU_n$
		$t = 500 \text{ ms}$
	50	$I_s = 53,11 \text{ A}$
		$t = 0,3 \text{ s}$
	51	Curva: Extremamente Inversa
		$I_s = 12,28 \text{ A}$
		$T_d = 0,09$
	51G	Curva: Normal Inversa
		$I_s = 0,1 \text{ A}$
$t = 0,7 \text{ s}$		

Fonte: fornecido pela indústria em estudo.

Quadro 14 – Cubículos blindados que alimentam os transformadores.

Cubículo blindado	Função	Ajuste
UTMVTR05 UTMVTR11	27	$U_s = 0,65 \times U_n$
		$t = 500 \text{ ms}$
	50	$I_s = 47,42 \text{ A}$
		$t = 0,3 \text{ s}$
	51	Curva: Extremamente Inversa
		$I_s = 8,74 \text{ A}$
		$T_d = 0,12$
	51G	Curva: Normal Inversa
		$I_s = 0,1 \text{ A}$
$t = 0,3 \text{ s}$		

Fonte: fornecido pela indústria em estudo.

Quadro 15 – Painéis elétricos de baixa tensão.

Painéis Elétricos	Tempo (ms)
BTLVTR01	50
BTLVTR02	
BTLVTR03	
BTLVTR04	
BTLVTR05	
BTLVTR06	
BTLVTR07	
BTLVTR08	
BTLVTR09	
BTLVTR10	
BTLVTR11	

Fonte: fornecido pela indústria em estudo.