

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

**RAFAEL JACQUES WINTER**

**ANÁLISE DAS NORMAS IEEE 1584:2002 E IEEE 1584:2018 PARA ESTUDO DE  
ENERGIA INCIDENTE E ATPV EM INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS DE BAIXA  
TENSÃO**

Porto Alegre, RS

2022

**RAFAEL JACQUES WINTER**

**ANÁLISE DAS NORMAS IEEE 1584:2002 E IEEE 1584:2018 PARA ESTUDO DE  
ENERGIA INCIDENTE E ATPV EM INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS DE BAIXA  
TENSÃO**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade do Rio Grande do Sul (UFRGS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Eletricista**.

Orientador: Prof. Dr. Maicon Jaderson Silveira Ramos

Porto Alegre, RS

2022

**RAFAEL JACQUES WINTER**

**ANÁLISE DAS NORMAS IEEE 1584:2002 E IEEE 1584:2018 PARA ESTUDO DE  
ENERGIA INCIDENTE E ATPV EM INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS DE BAIXA  
TENSÃO**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade do Rio Grande do Sul (UFRGS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Eletricista**.

**Aprovado em 15 de junho de 2022:**

---

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

(Professor Orientador)

---

**Igor Pasa Wiltuschnig, Dr. Eng. Eletricista (UFRGS)**

---

**Gilnei José Gama dos Santos, Ms. Eng. Eletricista (UFSM)**

Porto Alegre, RS

2022

Dedico este trabalho à minha esposa, que sempre esteve do meu lado e acreditou em mim, me estimulando para realizar as tarefas, por mais difíceis que elas pudessem parecer.

Dedico também à minha mãe, que sempre me proporcionou as melhores condições possíveis e nunca deixou de ser um exemplo para mim.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a minha família, Júlia Assumpção Heine, Jacqueline Jacques, Marcelo Luis Winter e Daniela Jacques Winter, pelos momentos de compreensão devido ao estresse rotineiro e pelos incontáveis momentos de carinho e apoio fornecidos.

Aos amigos que conheci na Universidade, pelas diversas noites de estudo em conjunto e companheirismo nos momentos de dificuldade.

Ao professor orientador Maicon Jaderson Silveira Ramos, que ao longo de dois semestres e diversas reuniões, conseguiu me instruir para elaborar o presente trabalho.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul e todos os qualificados professores com quem pude adquirir conhecimento inigualável, tenho a certeza de que estes anos de aprendizado moldaram o profissional que hoje sou.

## RESUMO

Devido a grande quantidade de acidentes fatais ocasionados por choque elétrico no país, como é mostrado na Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade (ABRACOPEL), e que de acordo com a *American Burn Association* (ABA), a maioria dos acidentes de origem elétrica acontecem principalmente em vítimas em idade de trabalho (entre 20 e 60 anos), este estudo utiliza a premissa que o serviço de manutenção elétrica no setor industrial é perigoso e visa fornecer um auxílio tanto ao trabalhador que necessita de segurança ao realizar a atividade de manutenção, quanto a empresa numa forma de responsabilidade com a determinação do equipamento de proteção individual corretamente dimensionado pelo estudo de energia incidente e ATPV, do inglês “Arc Thermal Performance Value”. Considerando o risco de um trabalhador estar exposto a um arco elétrico, foi demonstrado os tipos de classificação deste evento e a evolução deste assunto ao longo da história. Foi determinado para os painéis de baixa tensão presentes na subestação de uma planta industrial do ramo alimentício, a energia incidente, corrente de arco voltaico e distância segura de aproximação através do método da norma estrangeira IEEE Std 1584 e em sequência também calcular o ATPV. Os modelos de 2002 e de 2018 são utilizados com viés comparativo. Para o método de 2002, o estudo de caso resultou numa energia incidente de 24,867 J/cm<sup>2</sup>, o qual com a utilização de uma vara de manobra resultou em 10,715 J/cm<sup>2</sup>. Para o método de 2018, o estudo de caso resultou em 19,3284 J/cm<sup>2</sup>, o qual para a utilização da mesma vara de manobra resultou em 8,5145 J/cm<sup>2</sup>. Ambos os valores, de acordo com a NFPA 70E, do inglês “National Fire Protection Association”, inicialmente necessitaram de vestimenta de proteção individual categoria 2. Posteriormente, com a utilização da vara de manobra e de acordo com a NFPA 70E, seria necessário somente a utilização da vestimenta de proteção individual classe 1. Ao comparar os resultados obtidos pelo estudo de caso é correto afirmar que o método atual, ao considerar mais parâmetros de classificação para o sistema analisado, e com a inclusão de etapas minuciosas, resultou para todas as simulações em valores de energia incidente e distâncias de aproximação seguras menores se comparado com o modelo da IEEE 1584:2002. Um equipamento de proteção individual subdimensionado pode resultar em óbito, gerando um prejuízo jurídico a empresa; em contrapartida, um EPI sobre dimensionado trará uma dificuldade desnecessária na realização da manutenção, também ocasionando aumento de custo desnecessário a empresa.

**Palavras-Chaves:** Arco elétrico. ATPV. Energia Incidente. EPI. IEEE Std 1584:2002. IEEE Std 1584:2018. NFPA 70E. Sistemas de Baixa Tensão.

## ABSTRACT

Due to the large number of fatal accidents in Brazil caused by electric shock, as shown by the (ABRACOPEL, 2021) report, and that according to the American Burn Association (ABA), most accidents of electrical origin occur mainly in victims of working age (between 20 and 60 years old), this study uses the premise that the electrical maintenance in industrial sector is a dangerous activity and aims to provide assistance both to the worker who needs safety when carrying out the maintenance activity, and to the company who is responsible for the determination of the correctly dimensioned personal protective equipment by the study of incident energy and Arc Thermal Performance Value. Considering the risk of a worker when witnessing an electric arc, the types of classification for this event and the evolution of this subject throughout history were demonstrated. It was determined for the low voltage panels present in the substation of an activity industrial plant in the food industry, the incident energy, arc current and safe approach distance using IEEE Std 1584 method and in sequence also calculate the ATPV (Arc Thermal Performance Value). The 2002 and 2018 models are used with a comparative bias. For the 2002 method, the case study resulted in an incident energy of 24.867 J/cm<sup>2</sup>, which with the use of a maintenance bar resulted in 10.715 J/cm<sup>2</sup>. For the 2018 method, the case study resulted in 19,3284 J/cm<sup>2</sup>, which for the use of the same maintenance bar resulted in 8,5145 J/cm<sup>2</sup>. Both values, according to NFPA 70E (National Fire Protection Association), initially required class 2 for personal protective clothing. After using the maintenance bar, it would only be necessary to use class 1 personal protective clothing. When comparing the results obtained by the case study, it is correct to say that the current method, considering more classification parameters for the analyzed system, and with the inclusion of meticulous steps resulted for all simulations in lower incident energy values and safe approach distances compared to the IEEE 1584:2002 model. Undersized personal protective equipment can result in death, causing legal damage to the company; on the other hand, an oversized PPE will bring unnecessary difficulty for a maintenance activity, also causing an unnecessary cost increase for the company.

**Keywords:** ATPV. Electric Arc. IEEE Std 1584:2002. IEEE Std 1584:2018. Incident Energy. Low Voltage System's. NFPA 70E. PPE.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Acidentes de origem elétrica consolidados em 2020 .....	12
Figura 2 - Comparação entre as configurações de eletrodos em VCB .....	23
Figura 3 - Comparação entre as configurações de eletrodos em VCBB .....	23
Figura 4 - Comparação entre as configurações de eletrodos em HCB .....	24
Figura 5 - Comparação entre as configurações de eletrodos em VOA .....	24
Figura 6 - Comparação entre as configurações de eletrodos em HOA .....	24
Figura 7 - Fluxograma da metodologia aplicada .....	29
Figura 8 - Exemplo de pontos para determinação da corrente de curto-circuito.....	31
Figura 9 - Curva típica tempo x corrente para fusível de diazed.....	37
Figura 10 - Diagrama Unifilar com as correntes de curto-circuito.....	48
Figura 11 - Curva tempo x corrente para disjuntor 3WL1225 .....	50
Figura 12 - Curva tempo x corrente para disjuntor 3WL1232 .....	51
Figura 13 - Curva tempo x corrente do disjuntor 3WL1225 para as correntes de arco.....	53
Figura 14 - Curva tempo x corrente do disjuntor 3WL1232 para as correntes de arco.....	54
Figura 15 - Curva tempo x corrente do disjuntor 3WL1225 para as correntes de arco.....	57
Figura 16 - Curva tempo x corrente do disjuntor 3WL1232 para as correntes de arco.....	58
Figura B.1 – Diagrama Unifilar da SE-01 Extração.....	68



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classe de equipamento e dimensões do invólucro .....	32
Tabela 2 – Equipamentos e distâncias típicas de trabalho.....	33
Tabela 3 - Fator para equipamento conforme classe de tensão .....	39
Tabela 4 - Coeficientes para determinação do fator de correção .....	40
Tabela 5 - Categorias de EPI conforme NFPA 70E-2021 .....	44
Tabela 6 - Categorias de EPI conforme energia incidente .....	45
Tabela 7 - Parâmetros para aplicação do método IEEE:2002 .....	52
Tabela 8 - Resultados da IEEE Std 1584:2002 para o estudo de caso .....	55
Tabela 9 - Parâmetros para aplicação do método IEEE:2018 .....	56
Tabela 10 -Resultados da IEEE Std 1584:2018 para o estudo de caso .....	59
Tabela 11 - Comparação dos resultados da IEEE Std 1584:2002 com a utilização de vara de manobra .....	60
Tabela 12 - Comparação dos resultados da IEEE Std 1584:2018 com a utilização de vara de manobra .....	61
Tabela A. 1 - Coeficientes para determinação da corrente de arco intermediária .....	66
Tabela A. 2 - Coeficientes para determinação do fator de correção da variação da corrente de arco.....	66
Tabela A. 3 - Determinação dos valores equivalentes de comprimento e altura .....	67
Tabela A. 4 - Coeficientes para determinação da energia incidente para sistemas entre 208 V e 600 V.....	67

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABA	<i>American Burn Association</i>
ABRACOPEL	Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade
AIEE	<i>American Institute of Electrical Engineers</i>
AR	<i>Arc Rated</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Material's</i>
ATPV	<i>Arc Thermal Performance Value</i>
BT	Baixa Tensão
CCM	Centro de Controle de Motores
EPI	Equipamento de Proteção Individual
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i>
NR	Norma Regulamentadora
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
Std	<i>Standard</i>

## SUMÁRIO

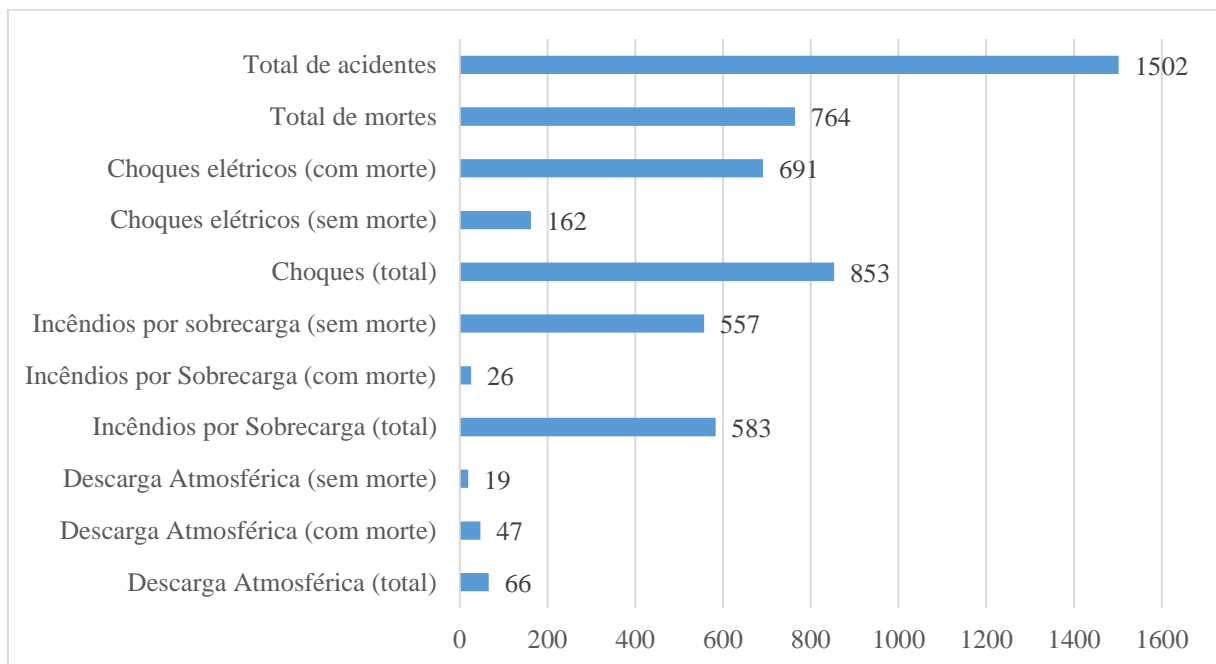
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
2.1 ARCO ELÉTRICO.....	15
2.1.1 Arco Ao Ar Livre.....	17
2.1.2 Arco Ejetado .....	17
2.1.3 Arco em Ambiente Enclausurado .....	18
2.1.4 Arco em Movimento .....	19
2.1.5 Arco Rastreador .....	19
2.2 ENERGIA INCIDENTE .....	20
2.3 INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO .....	22
2.4 NORMATIZAÇÃO.....	25
2.4.1 A Norma Brasileira .....	25
2.4.2 NFPA .....	26
2.4.3 Comparação entre a IEE 1584 2002:2018 .....	27
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
3.1 CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO.....	30
3.2 DIMENSÕES DO INVÓLUCRO E TIPOS DE ELETRODO .....	31
3.3 DISTÂNCIA DE TRABALHO .....	33
3.4 CORRENTE DE ARCO ELÉTRICO .....	33
3.4.1 IEEE 1584 2002.....	34
3.4.2 IEEE 1584 2018.....	35
3.5 ENTRADA DE DADOS DE PROTEÇÃO DO SISTEMA.....	36
3.6 ENERGIA INCIDENTE .....	38
3.6.1 IEEE 1584 2002.....	38
3.6.2 IEEE 1584 2018.....	39

3.7 DISTÂNCIA SEGURA DE APROXIMAÇÃO .....	41
<b>3.7.1 IEEE 1548 2002.....</b>	<b>41</b>
<b>3.7.2 IEEE 1548 2018.....</b>	<b>42</b>
3.8 NFPA 70E 2021 .....	43
3.9 TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO .....	45
<b>4 ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>47</b>
4.1 DISJUNTOR SIEMENS 3WL1225 .....	48
4.2 DISJUNTOR SIEMENS 3WL1232 .....	49
<b>5 ANÁLISE DE RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
5.1 MÉTODO IEEE:2002 .....	52
5.2 MÉTODO IEEE:2018 .....	56
5.3 ANÁLISE DA TÉCNICA DE MITIGAÇÃO.....	60
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>62</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>64</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>66</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>68</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>69</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O setor industrial brasileiro conta com a contribuição de milhares de trabalhadores, uma parcela deles destina-se a manutenção elétrica, sendo assim estão passíveis de sofrer acidentes de origem elétrica. De acordo com a Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade (ABRACOPEL) dos 1502 acidentes de origem elétrica no ano de 2020, 764 deles foram fatais, sendo que destes 691 (equivalente a 90,44%) foram ocasionados por acidentes com choque elétrico (ABRACOPEL, 2021). A Figura 1, consiste nos dados gerais de acidentes de origem elétrica, fatais e não fatais em 2020.

Figura 1 – Acidentes de origem elétrica consolidados em 2020



Fonte: Adaptado de Anuário 2021, ABRACOPEL

As queimaduras de natureza elétrica têm menor taxa de ocorrência do que outros tipos de queimaduras, porém possuem um risco elevado, devido ao alto índice de fatalidade. De acordo com a ABA, do inglês “American Burn Association”, somente 3,6% dos casos

registrados de queimaduras nos Estados Unidos entre 2009 e 2018 foram de origem elétrica, e ocorreram principalmente em pacientes em idade de trabalho, entre 20 e 60 anos (ABA, 2019).

A maioria das queimaduras elétricas causadas por arco elétrico ocorrem nos profissionais em atividade no setor industrial; e os danos causados aos equipamentos elétricos por esse tipo de evento podem causar interrupção no fornecimento de energia elétrica por longos períodos. A energia incidente é a energia calorífica por unidade de área recebida em uma superfície localizada a uma distância do arco elétrico, geralmente denominada como distância de trabalho. A distância de trabalho é a distância entre um trabalhador e o lugar onde ocorre o arco elétrico. A análise de energia incidente busca avaliar a existência do risco de arco elétrico e, em caso afirmativo, estimar os níveis de energia incidente e as distâncias seguras de trabalho, em conjunto com a definição de equipamento de proteção individual (EPI) adequado, tornando os operadores mais protegidos ao arco voltaico.

Mediante a grande quantidade de acidentes fatais por choques elétricos dentre os acidentes de origem elétrica registrados em 2020 (ABRACOPEL, 2021), em conjunto do fato de a maioria das vítimas à acidentes de origem elétrica possuírem idade de trabalho (ABA, 2019); o presente trabalho utiliza como premissa que o serviço de manutenção elétrica é extremamente perigoso, estando mais propenso a exposição à energia incidente em função de eventual arco elétrico gerado por curto-circuito. Por isso, os questionamentos do presente trabalho são direcionados para o setor industrial, com enfoque em painéis de baixa tensão. O estudo visa fornecer um auxílio tanto ao trabalhador que necessita de segurança ao realizar a atividade de manutenção, quanto a empresa numa forma de responsabilidade com a determinação do EPI corretamente dimensionado pelo estudo de energia incidente e ATPV. A determinação de um equipamento de proteção individual subdimensionado pode resultar em óbito, gerando um prejuízo jurídico a empresa; em contrapartida, um EPI superdimensionado trará uma dificuldade desnecessária na realização da manutenção, também ocasionando num aumento desnecessário no custo de fabricação para a empresa.

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise técnica na determinação da energia incidente e distância de trabalho segura em caso de exposição ao arco elétrico, para uma instalação industrial em atividade do ramo alimentício, de acordo com o método proposto na IEEE Std 1584:2002, do inglês “Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations”, e por

sua atualização IEEE Std 1584:2018, e em sequência também calcular o ATPV, do inglês “Arc Thermal Performance Value”.

Uma vez realizado a modelagem em ferramenta computacional dos métodos propostos para o estudo de caso, será apresentado os resultados obtidos para comparar a sensibilidade na atualização do método. A determinação da energia incidente e distância segura de aproximação arbitrarão na escolha correta de EPI para a realização de manutenção nos painéis analisados. Além disso, será realizado uma análise técnica sobre a possibilidade de diminuição da categoria de vestimenta antichamas determinada, de acordo com novo valor de energia incidente calculado.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção é apresentada a fundamentação teórica sobre os principais artigos documentados e relacionados com o assunto proposto por este trabalho, mostrando a evolução dos estudos publicados. Portanto, será descrito como foi desenvolvido assuntos como a energia incidente e o arco elétrico, para um ambiente de baixa tensão, bem como as normatizações nacionais e internacionais sobre estes fenômenos, utilizando a norma IEEE Std 1584:2002, bem como a sua atualização, IEEE Std 1584:2018.

### 2.1 ARCO ELÉTRICO

Arco elétrico é o termo aplicado à passagem de correntes elétricas através do que antes era ar. Como o ar não é o condutor; a passagem se dá através do vapor gerado pelo arco do terminal, geralmente um metal condutor ou carbono. O período inicial da falta eleva a temperatura das imediações, carbonizando parte do material isolante, que passa a atuar como condutor, favorecendo a queda de tensão da falta e continuidade ao fluxo de corrente (KAUFMANN; PAGE, 1960). Comparado com o fluxo de corrente através da baixa pressão de gases como o néon, o arco envolve altas temperaturas de até de 19.726 °C nos terminais do arco. Essas temperaturas não podem ser suportadas por nenhum material conhecido na terra; todos não são apenas derretidos, mas também vaporizados (LEE, 1982).

Por mais que em diversas situações o arco elétrico possa ser usado de maneira controlada, como é o caso de soldagens e cauterizações, o arco elétrico aleatório é muito perigoso. Desde 1960 as dificuldades causadas pela ocorrência indevida do arco voltaico em redes de distribuição eram conhecidas, tanto que o Instituto Americano de Engenheiros Eletricistas (*American Institute of Electrical Engineers*, AIEE), que posteriormente veio a ser renomeado como Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (*Institute of Electrical and Eletronics Engineers*, IEEE), começou a ter diversas publicações sobre a ocorrência do arco elétrico e os seus perigos.

Foi com o começo de relatos sobre equipamentos elétricos de baixa tensão sendo derretidos devido ao arco elétrico que deu-se início à procura de meios para solucionar tal fato, e foi através do uso de relés suplementares a falta à terra que Shields criou sua tese (SHIELDS,



1967). Posteriormente, Stanback (1977) propôs um estudo que preveniria o dano anteriormente citado por Shields para sistemas monofásicos de 277/480 V. Ao final do estudo o autor chega à conclusão de que pelo curto tempo causado pelo arco elétrico, o dano de falhas de arco para o aterramento poderia ser limitado a quantias razoavelmente toleráveis. Usando as equações descritas no estudo, o autor também determina a quantidade máxima de dano provável para os barramentos e caixas de aço expressa em polegadas cúbicas.

Apesar das faltas trifásicas serem menos frequentes do que as faltas à terra, em 1986, Dunki-Jacobs comentou sobre o fenômeno de escalonamento do arco elétrico por falta-terra, que consiste na autossustentação do arco, cujo mesmo iniciado entre falta à terra pode escalar para um arco elétrico de falta trifásico. Reparado que os equipamentos elétricos vinham sendo destruídos por uma instantânea escalada do arco elétrico no sistema trifásico, foi determinado imediatamente a necessidade de relés responsivos à corrente de fase ou disparos de ação direta (DUNKI-JACOBS, 1986).

Percebe-se que a principal preocupação mundial, quando relacionada ao arco voltaico, no período até então citado, era direcionada a prevenção de possíveis perdas de equipamentos do setor elétrico. Foi inicialmente com (LEE, 1982) que a abordagem sobre as queimaduras ocasionadas aos que presenciam o arco elétrico foi inserida na discussão, revolucionando as ideias até então publicadas e na busca de modelos para estimar a energia térmica liberada pelo arco e o seu risco ao trabalhador do setor elétrico.

Na exposição de um arco elétrico torna-se necessário elencar os diversos riscos que são passíveis de ocorrer, o mais comumente conhecido acaba por ser a queimadura térmica, mas também pode-se citar o choque elétrico, explosões, estilhaços, luz intensa, som intenso, incêndios, partículas de metal derretido, ondas de pressão, efeito do plasma e a exposição a gases tóxicos. O risco da exposição à elevada temperatura centra o maior número de trabalhos publicados, visto que a partir de 70 °C, pode-se causar cegueira temporária e que demora apenas um segundo para a total destruição das células do tecido humano (DAS, 2021).

Ao pesquisar sobre as exposições ao arco elétrico, pode-se salientar a existência de cinco tipos diferentes. Segundo Golovkov, Schau e Burdge (2017) os cinco tipos de arco elétrico são: arco ao ar livre (radiação), arco ejetado, arco em ambiente fechado, arco em movimento e arco rastreador. Existem diversos fatores que são utilizados para a classificação

de arco elétrico: a configuração geométrica do eletrodo, a tensão nominal da instalação elétrica, a forma de arco, se o arco acontece dentro do invólucro ou ao ar livre, dissipação de calor radiante ou convectiva predominante, se o arco é estacionário ou móvel e o contato com peças energizadas.

### 2.1.1 ARCO AO AR LIVRE

O arco elétrico ao ar livre é um arco de média ou alta tensão realizado em ambiente aberto e sem invólucro em torno do arco. A geometria do eletrodo direção do arco ao ar livre não gera interação eletromagnética entre o fluxo de corrente dos eletrodos e corrente no plasma do arco elétrico, o que forçaria o canal de plasma para fora e para longe da lacuna do arco. As forças eletromagnéticas apenas causam a rotação dos jatos de arco na área do eletrodo (GOLOVKOV, SCHAU, BURDGE, 2017).

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

De acordo com Golovkov (2017) um arco ao ar livre pode ocorrer nos seguintes casos:

- Descarga de alta e média tensão (potência e instrumento) ou disjuntor;
- Descarga num suporte ou isoladores de suspensão de linhas transmissão energizadas;
- Descarga no barramento da subestação.

Devido à natureza estocástica do arco, a energia deve ser medida usando um modelo estatístico. Embora os arcos sejam eventos estocásticos, que acontecem sem aviso prévio, muito pode ser feito para reduzir essa variabilidade na avaliação de perigos.

### 2.1.2 ARCO EJETADO

O arco ejetado é um arco de média ou alta tensão formado nas pontas de condutores ou eletrodos paralelos. Arcos ejetados comumente ocorrem no final de uma linha de energia.

Um exemplo de formação de arco ejetado é quando o arco móvel atinge o fim de longos condutores paralelos. No arco ejetado a corrente flui através do caminho de plasma

ionizado e interage eletromagneticamente com correntes de falta, fluindo nos condutores. Como resultado, o arco de plasma é forçado para fora da lacuna entre condutores; este caminho é alongado e muda sua forma de uma coluna a quase um círculo. O alongamento do arco ejetado e a dissipação de energia de calor correspondente é geralmente direcional. O arco ejetado é alongado na direção de uma continuação imaginária dos eletrodos (GOLOVKOV, SCHAU, BURDGE, 2017).

Tanto o componente de energia radiante de plasma e o componente de calor convectivo reforçado pelos jatos de arco do eletrodo são consideráveis. A onda de calor será perigosa porque o alongamento percorrido pelo arco oferece temperaturas extremas de 5.000 °C em proximidade ou em contato direto com a vestimenta do trabalhador. Estes são os arcos mais perigosos, uma vez que o plasma atinge o trabalhador e, em caso de mal dimensionamento, irá destruir o EPI instantaneamente. ASTM F18, do inglês “American Society for Testing and Material’s”, está considerando um novo método de teste para a avaliação do EPI nestes tipos de exposições (GOLOVKOV, SCHAU, BURDGE, 2017).

### **2.1.3 ARCO EM AMBIENTE ENCLAUSURADO**

O arco em ambiente enclausurado é um arco estável. A energia térmica é dissipada através da luz irradiada e principalmente como calor convectivo de ar quente. Ar quente que é emitido da caixa em uma direção através da porta aberta ou quebrada (GOLOVKOV, SCHAU, BURDGE, 2017).

O arco em uma caixa, com também é chamado, pode começar como resultado da quebra ou mau funcionamento de um equipamento durante as operações humanas não intencionais, como o soltar de uma ferramenta acidentalmente.

Dependendo da configuração do invólucro e do eletrodo, o trabalhador pode ser exposto a diferentes níveis de energia. Alguns cenários deste arco apresentarão uma menor energia do que outros por causa de suas diferenças em relação às forças magnéticas. Neste tipo de arco geralmente não há plasma no nível do trabalhador, mas há gases quentes. Numa maior escala, a corrente de falha ou um maior tempo de exposição pode inflamar roupas de algodão, mas a onda de pressão pode deslocar o trabalhador para trás, o que acabaria por diminuir o tempo de exposição à energia.

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

#### 2.1.4 ARCO EM MOVIMENTO

O arco móvel é um arco de média ou alta tensão que ocorre em ambiente aberto de propagação do ar entre dois condutores longos paralelos. O arco flui através do caminho de plasma ionizado, interagindo eletromagneticamente com as correntes de falta através dos condutores. Como resultado, o caminho percorrido pelo plasma é forçado a mover-se ao longo dos condutores na direção oposta das fontes de energia, sejam elas a estação de geração ou a subestação de alimentação.

Este tipo de arco pode ser iniciado através de uma descarga ou quebra de isolamento nas linhas de média e alta tensão e/ou barramentos da subestação. Mesmo que o plasma neste tipo de arco esteja contido dentro da lacuna do arco entre condutores paralelos, é importante salientar que ele não está estacionário. A dissipação de energia é igual em todas as direções e a irradiação de luz é semelhante ao arco de ar livre, por exceção do movimento.

A Velocidade do arco em movimento depende da magnitude da corrente de falta e pode exceder 160 km/h. Esta alta velocidade reduz o tempo de potencial exposição ao arco quando um trabalhador está ao lado da linha (GOLOVKOV, SCHAU, BURDGE, 2017).

#### 2.1.5 ARCO RASTREADOR

O arco de rastreamento é significativamente diferente de todos outros tipos. Um arco de rastreamento pode ocorrer na superfície da pele de um trabalhador sob a vestimenta, como resultado de um trabalhador que teve um contato direto ou indireto com alguma parte energizada, ou como resultado de um trabalhador que se aproxima da mesma. O evento de arco de rastreamento representa um risco duplo de eletrocussão e ignição do EPI do trabalhador.

Mais comumente, o arco de rastreamento pode ser iniciado sob as seguintes condições:

- Contato direto acidental em condutor energizado com média tensão ou esbarrando ao levantar algum objeto ou outro maquinário de construção enquanto o maquinário está

em contato com um condutor energizado de média tensão, sendo que a roupa ou base do trabalhador está molhada de suor ou chuva;

- Aproximando-se de um condutor energizado à uma curta distância que seja suficiente para causar uma descarga. Arco elétrico flui para o corpo do trabalhador onde o arco irá causar ignição de roupas que não sejam antichamas;
- Roupa molhada torna-se acidentalmente aterrada causando a descarga e uma corrente de falha flui através da roupa molhada, inflamando-a caso contrária de antichama.

## 2.2 ENERGIA INCIDENTE

A energia incidente é a energia calorífica por unidade de área recebida em uma superfície localizada a uma determinada distância do arco elétrico, geralmente denominada como distância de trabalho. A distância de trabalho é a distância considerada entre um trabalhador e o local onde se origina o arco elétrico (IEEE, 2018). A energia incidente, mensurada em cal/cm<sup>2</sup>, caracteriza-se como a energia dissipada no momento da ocorrência do arco elétrico e pode ser interpretada como a quantidade de energia incidida sobre uma superfície, a certa distância da fonte (IEEE, 2018).

Foi através da publicação de (LEE, 1982) que o risco térmico começou a ser debatido. Até então, somente o choque elétrico era atribuído aos riscos passíveis de um arco voltaico. Foi com o modelo teórico de Lee, que começou a estimar-se a energia térmica proveniente do arco elétrico.

Posteriormente ao estudo de Lee, (NEAL; BINGHAM; DOUGHTY, 1996) através de diversos testes para tensões de 600 V e 2,4 kV, chegaram na equação (1), que consiste na equação que representava até então a curva de energia incidente. Ao analisar esta equação, foi comprovado que a energia incidente é inversamente proporcional à distância, informação que já tinha sido apontada pelos estudos de Lee.

$$E_{inc} = \frac{K \times E_{arc}}{D^{2,2}} \quad (1)$$

Onde:

- $E_{inc}$  é a energia incidente em cal/cm<sup>2</sup>;
- $K$  é uma constante equivalente a 0,0000432 pés/cm<sup>2</sup>;

- $D$  é a distância do arco em pés;
- $E_{arc}$  é a energia total do arco em calorias.

Em 1998 foi proposto um novo modelo para a determinação da energia incidente diferentemente do criado por Ralph Lee (DOUGHTY; NEAL; FLOYD, 1998, 2000). Visando determinar, para um circuito trifásico de 600 V exposto a um arco de 6 ciclos com um espaçamento de 1,25 polegadas entre os eletrodos, uma distância que resultaria apenas em uma queimadura de segundo grau à pele humana. Através desses testes os autores perceberam uma diferença entre a equação (2) prevista por Ralph Lee para determinar, em caso de exposição ao arco, uma distância cuja queimadura fosse curável, e as equações (3) e (4) determinadas pela publicação.

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

Onde:

- $D_c$  é uma distância cuja pele sofrerá uma queimadura curável;
- $MVA_{bf}$  é a potência de falta franca emitida no arco;
- $t$  é o tempo do arco em segundos.

$$D_A = \left[ \left( \frac{t_A}{E_{MA}} \right) (8,434F^2 - 40,06F + 4711) \right]^{0,5104} \quad (3)$$

Onde:

- $D_A$  é a distância em polegadas, entre o eletrodo e o trabalhador em ambiente aberto;
- $E_{MA}$  é a energia incidente máxima em cal/cm<sup>2</sup>, para ambiente aberto;
- $F$  é a corrente de falta franca, em kA;
- $t_A$  é a duração do arco em segundos.

$$D_B = \left[ \left( \frac{t_A}{E_{MB}} \right) (9,66F^2 - 358,7F + 6198) \right]^{0,6785} \quad (4)$$

Onde:

- $D_B$  é a distância em polegadas, entre o eletrodo e o trabalhador para um ambiente enclausurado;
- $E_{MB}$  é a energia incidente máxima em cal/cm<sup>2</sup>, para ambiente confinado.

Ao comparar essas equações (DOUGHTY; NEAL; FLOYD, 2000) chegaram à conclusão de que para uma exposição ao arco elétrico, em ambiente aberto, a equação de LEE estava correta. Porém quando feita a comparação sobre uma exposição ao arco elétrico, em ambiente fechado, os resultados divergiam bastante. A diferença entre corrente de falta franca, em circuitos fechados e abertos pode chegar num fator multiplicativo de até 2,8.

Em 2002 foi estabelecida uma nova forma de calcular a energia incidente, através da IEEE Std 1584 (IEEE, 2002) que posteriormente foi atualizada através da IEEE Std 1584 (IEEE, 2018). Ambas serão abordadas com ênfase na seção 3.3, pois são os métodos que serão utilizados no presente trabalho a nível de comparação.

### 2.3 INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO

A Norma Regulamentadora-10 define uma instalação elétrica como um conjunto das partes elétricas e não elétricas associadas e com características coordenadas entre si, que são necessárias ao funcionamento de uma parte determinada de um sistema elétrico. Uma instalação elétrica pode ser dividida em alta e baixa tensão, sendo denominada baixa tensão para casos em que há tensão superior a 50 volts em corrente alternada ou 120 volts em corrente contínua e igual ou inferior a 1000 volts em corrente alternada ou 1500 volts em corrente contínua, entre fases ou entre fase e terra. (NR10, 2019)

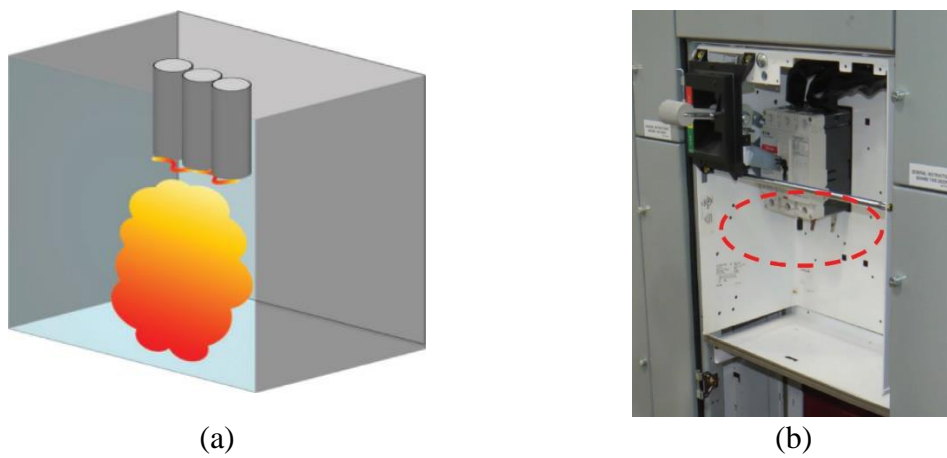
Diferentemente das subestações de alta tensão onde há um recuo para manutenção, nas subestações de baixa tensão, devido à disposição dos eletrodos e ao espaço reduzido disponível para manutenção, há uma maior chance de ocorrência de curto por causa de um contato indevido.

A (IEEE, 2018) aborda a configuração dos eletrodos em cinco tipos: eletrodos verticais enclausurados (VCB), eletrodos verticais enclausurados terminados em uma barreira isolante (VCBB), eletrodos horizontais enclausurados (HCB), eletrodos verticais ao ar livre (VOA) e eletrodos horizontais ao ar livre (HOA), cujos são demonstrados nas Figuras 2, 3, 4, 5 e 6 respectivamente.

As Figuras 2, 3, 4, 5 e 6 fornecem alguns exemplos, para (a) demonstração digital e (b) demonstração real, de como os arranjos de condutores de equipamentos podem ser classificados devido a semelhança com as configurações dos eletrodos. Cada tipo de

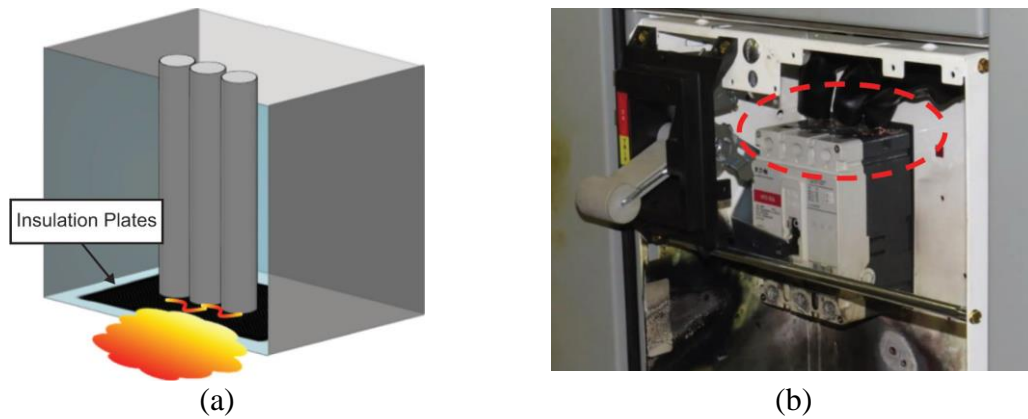
equipamento, sendo painéis ou centros de controle de motores (CCM), pode conter condutores dispostos de maneiras semelhantes as configurações de eletrodos apresentados. Os locais dentro de um equipamento podem conter arranjos de condutores semelhantes a mais de uma configuração de eletrodo. Como exemplo, um painel pode conter configurações de eletrodos VCB e VCBB (IEEE, 2018).

Figura 2 - Comparação entre as configurações de eletrodos em VCB



Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018)

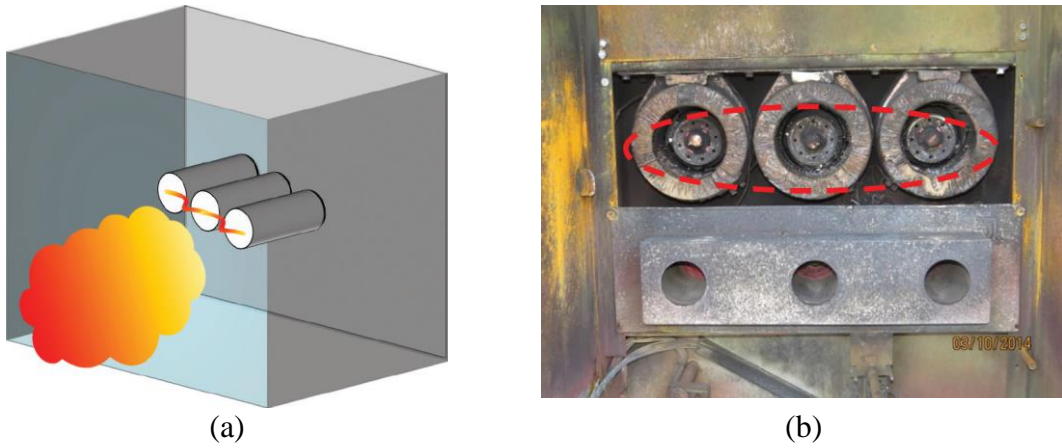
Figura 3 - Comparação entre as configurações de eletrodos em VCBB



Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018)

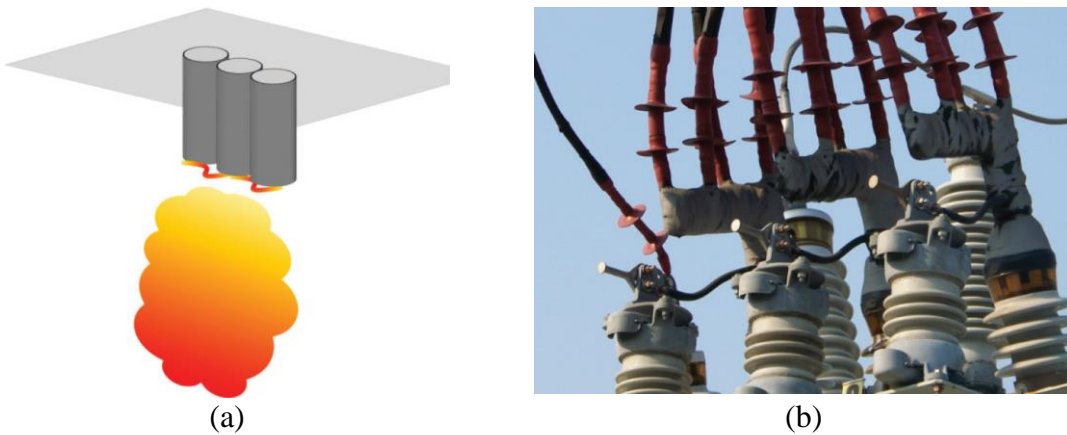


Figura 4 - Comparação entre as configurações de eletrodos em HCB



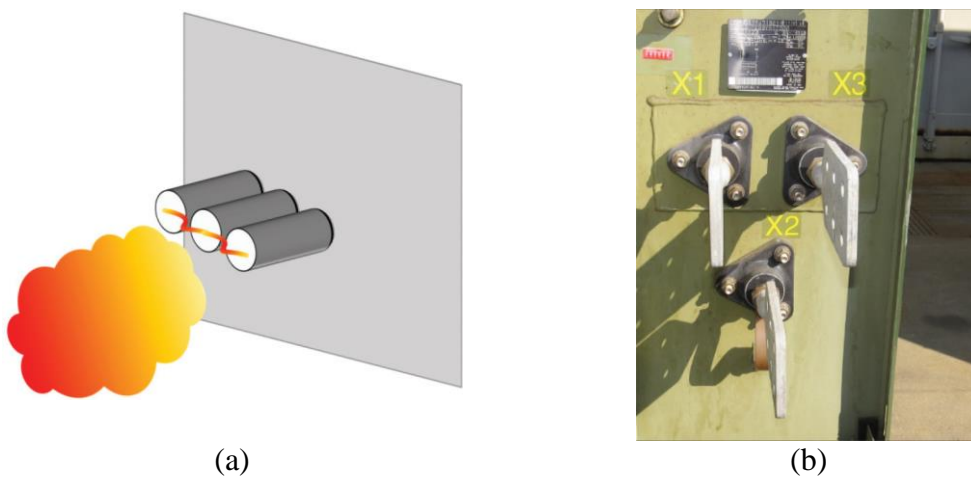
Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018)

Figura 5 - Comparação entre as configurações de eletrodos em VOA



Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018)

Figura 6 - Comparação entre as configurações de eletrodos em HOA



Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018)

## 2.4 NORMATIZAÇÃO

### 2.4.1 A NORMA BRASILEIRA

No Brasil, a principal norma que trata sobre o trabalho em instalações elétricas e a segurança de seus trabalhadores é a NR-10, publicada em 1978. Esta norma foi criada com o objetivo de estabelecer condições mínimas para implementação de medidas de controle para aqueles que, direta ou indiretamente, trabalham em instalações elétricas ou com serviços de eletricidade.

Apesar de sua importância para o setor elétrico nacional e de suas diversas alíneas de detalhamento nas regras a serem seguidas, não se tem uma abordagem direta sobre os cuidados a exposição do arco elétrico. Indiretamente, contém alguns trechos que mencionam o assunto como no item 10.3.9.a, por exemplo:

**10.3.9** O memorial descritivo do projeto deve conter, no mínimo, os seguintes itens de 4 segurança:

a) especificação das características relativas à proteção contra choques elétricos, queimaduras e outros riscos adicionais;

O risco de um arco voltaico também pode ser considerado ao interpretar o item 10.12.1:

#### **10.12 - SITUAÇÃO DE EMERGÊNCIA:**

**10.12.1** As ações de emergência que envolvam as instalações ou serviços com eletricidade devem constar do plano de emergência da empresa.

Neste item, pode-se interpretar que como um risco conhecido, o arco elétrico tem que ser considerado no plano de emergência da empresa.

O item 10.2.9.2, citado abaixo, deixa evidente a preocupação com o arco elétrico, uma vez que informa ser necessário o correto dimensionamento das vestimentas perante as influências eletromagnéticas e todos os riscos inerentes:

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

A Norma Regulamentadora 10 recomenda que, em caso de ausência às normas técnicas vigentes, deve-se ser consultado as normas internacionais cabíveis, conforme o item 10.1.2:

**10.1.2** Esta NR se aplica às fases de geração, transmissão, distribuição e consumo, incluindo as etapas de projeto, construção, montagem, operação, manutenção das instalações elétricas e quaisquer trabalhos realizados nas suas proximidades, observando-se as normas técnicas oficiais estabelecidas pelos órgãos competentes e, na ausência ou omissão destas, as normas internacionais cabíveis. (NR10, 2019, p.01).

Sendo assim, torna-se necessário a utilização das normas NFPA 70E e IEEE Std 1584 (IEEE, 2018), como normas internacionais cabíveis, para a determinação de energia incidente e ATPV, sendo consideradas influências eletromagnéticas, e para a determinação das categorias de equipamento de proteção individual, como determinação adequada das vestimentas de trabalho.

#### 2.4.2 NFPA

É importante fazer uma abordagem sucinta acerca das normas que regem a segurança de trabalhos em sistemas elétricos. Em 1970, foi criada a OSHA, do inglês “*Occupational Safety and Health Administration*”, para estabelecer as normas que regulamentam as práticas de trabalho seguras em instalações elétricas. Em 1979, foi criada a Associação Nacional de Proteção contra Fogo (*National Fire Protection Association*, NFPA) com a função de auxiliar a OSHA na preparação de normas técnicas específicas para segurança elétrica. A partir daí, aconteceram mais edições da NFPA, sempre intensificando as práticas de segurança em trabalhos envolvendo eletricidade.

Ainda com relação às normas internacionais, destacam-se as normas NFPA 2112 e NFPA 70E como as referências para a especificação das vestimentas, sendo a NFPA 2112 uma norma que estabelece as características, critérios e ensaios para vestimentas protegidas contra

o fogo repentino. Em 1982 foi criada a NFPA 70E (*Standard for Electrical Safety in Workplace*), com o propósito de providenciar uma prática segura de trabalho para os trabalhadores que estão relacionados aos perigos eminentes com o uso de eletricidade e ela vem sendo atualizada periodicamente.

O presente trabalho irá utilizar a NFPA 70E para determinar, através das tabelas apresentadas nas seções seguintes, a vestimenta antichama correta para o caso apresentado. A norma também relata que uma análise do risco de arco elétrico deve ser realizada para determinar o limite de aproximação seguro, a energia incidente a uma determinada distância de trabalho e os EPIs que os trabalhadores devem utilizar. A NFPA 70E também delimita que, para as condições apresentadas no presente trabalho, o método correto para calcular a energia incidente e distância segura de trabalho é o proposto pelo Guia IEEE 1584 para Realização de Cálculos de Risco de Arco, do inglês “*IEEE Standard Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*”.

#### 2.4.3 COMPARAÇÃO ENTRE A IEEE 1584 2002:2018

A IEEE 1584-2018 é a revisão da anteriormente publicada IEE 1584-2002, que sofreu alterações em 2004 e 2011. Esta norma tem como objetivo providenciar um modelo analítico em que seja possível calcular uma energia térmica incidente prevista e o limite do arco voltaico. O processo envolve diversos dados das aplicações de campo, considerações do sistema de energia e seus diversos cenários de operações.

A primeira diferença entre os dois modelos para cálculo do arco elétrico é a quantidade de amostragens, enquanto a IEEE 1584-2002 teve aproximadamente 300 testes aplicados, sua revisão teve mais de 1800. A primeira versão possuía somente dois modelos, sendo um empírico, para sistemas de 208 V e 15 kV e outro teórico, baseado no modelo de (LEE, 1982), para tensões elevadas. Não abrange sistemas de corrente alternada monofásicos nem sistemas de corrente contínua. A equação que determina a corrente de arco elétrico alterna conforme a tensão do sistema avaliado, sendo este maior ou menor que 1 kV. A norma de 2002 demanda que seja calculado uma corrente de arco reduzida, usando somente 85% do valor anteriormente determinado.

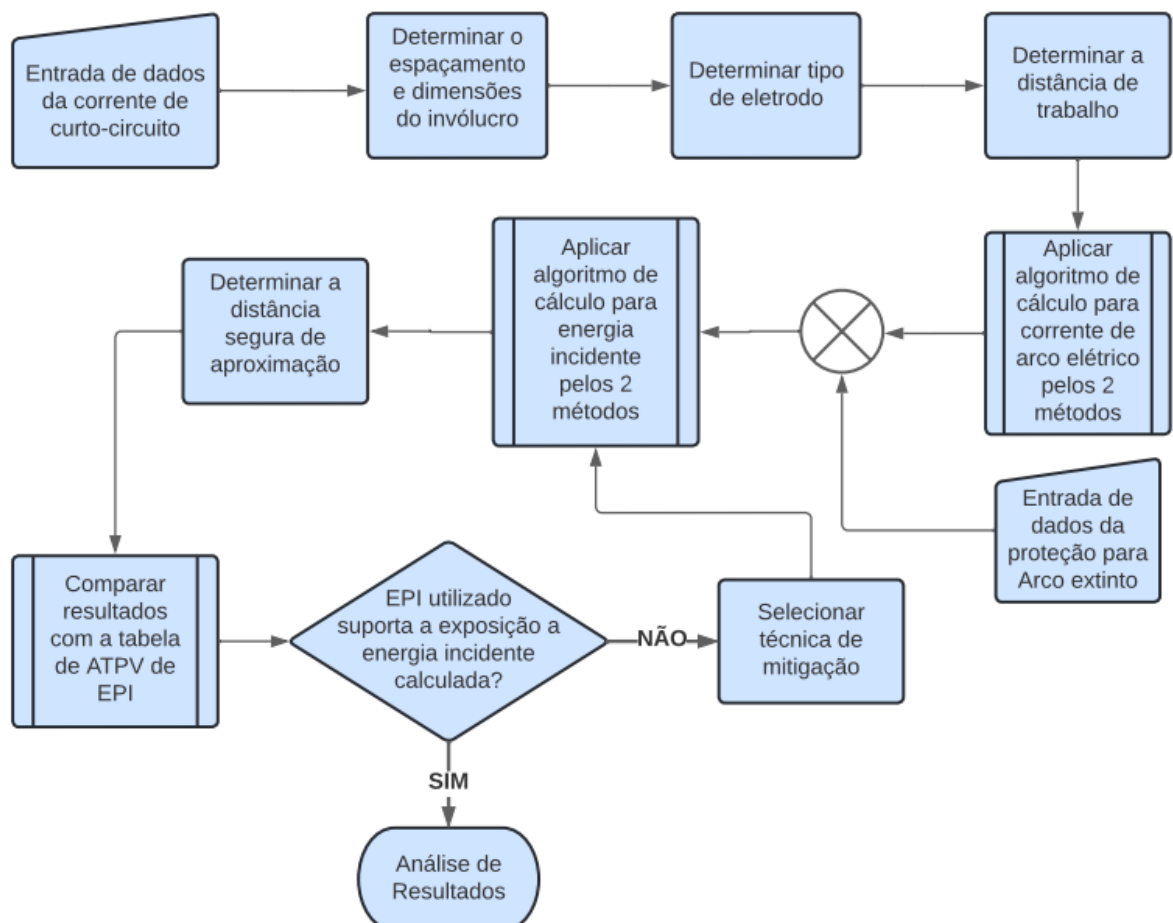
Com a atualização do método o modelo teórico anteriormente citado foi excluído e o empírico foi incorporado minuciosamente para dividir os casos entre sistemas de trifásicos de 208 V até 600 V ou 601 V até 15 kV. As equações, que anteriormente eram linearizadas uma para baixa tensão e outra para média tensão, foram substituídas por um método de interpolação para o nível de tensão desejado, utilizando as equações propostas pelo estudo sobre 600 V, 2700 V e 14300 V. Diferentemente do método de 2002, o método da IEEE 1584-2018 demanda que seja calculado uma corrente mínima de arco elétrico, através da determinação do fator de correção da variação da corrente de arco. Além da diferença matemática, foram incluídos diversos fatores que influenciam na energia incidente, como o dimensionamento dos eletrodos e o tamanho do invólucro; ambos acompanhados de fatores de correção para abranger as particularidades do sistema analisado. Foram inclusas 5 configurações distintas de eletrodos: VCB, VCBB, HCB, VOA e HOA (NFPA 70E, 2021). Mesmo não abrangendo sistemas de corrente alternada monofásicos nem sistemas de corrente contínua, a atualização do método faz menção de algumas orientações e referências para estas aplicações. Já o aterramento do sistema deixou de ser considerado visto que os novos resultados não foram significativos (IEEE-1584, 2018).

Diferentemente da versão de 2002, que recomendava a não aplicação do modelo para equipamentos abaixo de 240 V e alimentados por um transformador inferior a 125 kVA, sua atualização, em contrapartida, recomenda a aplicação do modelo, informando que, mesmo em sistemas elétricos de 240 V ou com uma corrente de curto-circuito inferior a 2000 A, é possível a ocorrência de um arco elétrico.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia do presente trabalho, as etapas a serem seguidas e os cálculos a serem realizados, a fim de determinar a categoria de EPI adequada ao nível de energia incidente calculada para manutenção em painéis de subestações de baixa tensão. A Figura 7, mostra o fluxograma da metodologia aplicada.

Figura 7 - Fluxograma da metodologia aplicada



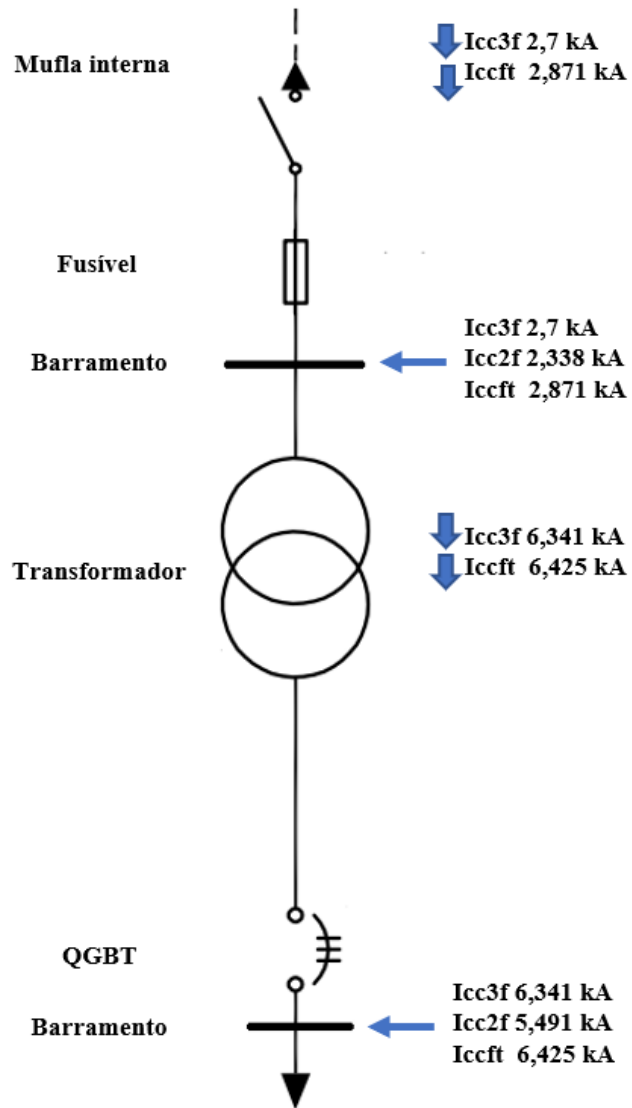
Fonte: Autor

### 3.1 CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Para realização dos cálculos necessários neste trabalho, precisa-se levar em consideração as correntes de curto-circuito trifásico franco. Essas informações são necessárias para calcular a corrente de arco elétrico e identificar o tempo de extinção do mesmo. É necessário considerar todas as correntes de curto-circuito, tanto as simétricas quanto as assimétricas, máximas e mínimas. Correntes de curto-circuito mais altas podem resultar em tempos de disparo mais curtos para dispositivos de proteção de sobrecorrente, resultando em uma energia incidente menor. Correntes de falta mais altas sem uma diminuição no tempo de abertura do dispositivo de proteção de sobrecorrente resultam em uma energia incidente maior. Correntes de falta mais baixas podem resultar em um tempo de abertura mais longo para o dispositivo de proteção de sobrecorrente, aumentando assim a energia incidente (IEEE, 2018).

Os valores da corrente de curto-circuito devem ser determinados, principalmente, nos pontos da instalação onde os trabalhadores realizam o trabalho de manutenção, como pode ser visto na Figura 8. Serão utilizados como entrada, no presente trabalho, dados de curto-circuito estabelecidos por estudo de coordenação e seletividade atual da subestação de baixa tensão em questão.

Figura 8 - Exemplo de pontos para determinação da corrente de curto-circuito



Fonte: Autor.

### 3.2 DIMENSÕES DO INVÓLUCRO E TIPOS DE ELETRODO

Nesta etapa, deve-se estabelecer as distâncias entre os condutores e as dimensões do painel e as suas configurações. Em muitos casos, não é viável obter tais dados através de medidas. Portanto, a IEEE 1584 apresenta valores testados em laboratórios para cada possibilidade de equipamento.



Para cada equipamento que faz parte do estudo, a tensão do sistema e a classe de equipamento podem ser usadas para estabelecer os espaçamentos típicos entre os condutores ou barramentos, como mostrado na Tabela 1, já que estes podem ser difíceis de medir ou obter do fabricante. Os valores de espaçamento fornecidos na Tabela 1 foram obtidos com base nos espaçamentos utilizados nos testes de energia incidente em laboratório e não nos testes reais do equipamento, mas podem aproximar as falhas do condutor no equipamento real.

A Tabela 1 também fornece informações sobre os tamanhos dos invólucros usados para cada classe de tensão, que foram usados para derivar o fator de correção de energia incidente do tamanho do invólucro.

Tabela 1 - Classe de equipamento e dimensões do invólucro

Classe do equipamento	Distância padrão entre condutores (mm)	Dimensões do invólucro (A x L x P) (mm)
Painel de distribuição 15 kV	152	1.143 x 762 x 762
CCM de 15 kV	152	914,4 x 914,4 x 914,4
Painel de distribuição de 5 kV	104	914,4 x 914,4 x 914,4
Painel de distribuição de 5 kV	104	1.143 x 762 x 762
CCM de 5 kV	104	660,4 x 660,4 x 660,4
Painel de distribuição de baixa tensão	32	508 x 508 x 508
CCMs e painéis rasos de distribuição de baixa tensão	25	355,6 x 304,8 x < 203,2
CCMs e painéis profundos de distribuição de baixa tensão	25	355,6 x 304,8 x > 203,2
Caixa de junção de cabos	13	355,6 x 304,8

Fonte: Adaptado de IEEE 1584 (2018)

### 3.3 DISTÂNCIA DE TRABALHO

Nesta etapa, a IEEE 1584-2018 estabelece distâncias típicas de trabalho entre o operador e a fonte de origem do arco. A proteção contra arco elétrico é baseada no nível de energia incidente que atinge a face ou o tronco do trabalhador a uma determinada distância, e não na energia incidente que atinge seus braços e mãos. O nível do dano depende da porcentagem da pele do corpo de uma pessoa que sofre uma queimadura, a cabeça e o tronco representam a maior parte do corpo humano, por isso queimaduras nessas áreas são mais graves e por isso são levadas em consideração. A Tabela 2, apresenta as distâncias de trabalho típicas de acordo com o tipo de equipamento (IEEE, 2018).

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

Tabela 2 – Equipamentos e distâncias típicas de trabalho

Equipamento	Distância de trabalho típica (mm)
Painel de distribuição 15 kV	910
Painel de 5 kV	910
Painel de baixa tensão	610
CCM e quadros elétricos de baixa tensão	455
Cabos	455
Outros	A ser determinado no local

Fonte: Adaptado de IEEE 1584 (2018)

### 3.4 CORRENTE DE ARCO ELÉTRICO

Ambos os modelos IEEE:2002 e IEEE:2018, possuem diferentes métodos e modelos para diferentes faixas de operação. Nesta seção será demonstrado o equacionamento necessário para determinação, da corrente de arco elétrico como posteriormente, na seção 3.6, para a energia incidente, para níveis de baixa tensão.

### 3.4.1 IEEE 1584 2002

Nesta versão do guia, dois modelos são apresentados: o empírico, para sistemas de 208 V a 15 kV e o teórico, para sistemas acima de 15 kV. Neste trabalho será utilizado o modelo empírico, pois inclui a faixa de operação do estudo.

O modelo empírico da IEEE:2002 é aplicado para sistemas que possuem as seguintes características:

- Tensões trifásicas de 208 V a 15 kV;
- Frequência de 50 Hz ou 60 Hz;
- Corrente de falta franca entre 700 A e 106 kA;
- Aterramentos de todos os tipos ou não-aterado;
- Compartimentos de tamanhos comumente empregados;
- Espaçamento entre os eletrodos de 13 a 152 mm;
- Faltas envolvendo as três fases.

A corrente de arco trifásica deve ser calculada a fim de determinar o tempo de operação necessário dos dispositivos de proteção do sistema. Para sistemas com tensão aplicada menor que 1000 V utiliza-se a equação (5) e posteriormente é utilizada a equação (6) para determinar a corrente de arco.

$$\log I_a = K + 0,662 \log I_{bf} + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588(V \times \log I_{bf}) - 0,00304(G \times \log I_{bf}) \quad (5)$$

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

Onde:

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

Posteriormente, é necessário calcular uma segunda corrente de arco, equivalente a 85% da anterior, tornando possível que, posteriormente, seja calculado um segundo tempo de duração do arco.

### 3.4.2 IEEE 1584 2018

Nesta versão do guia são apresentados dois modelos, o primeiro para o intervalo de tensão entre 600 V e 15 kV, e o que será utilizado neste trabalho, para o intervalo de tensão entre 208 V e 600 V.

O segundo modelo, com intervalo de tensão entre 208 V e 600 V, possui as seguintes características:

- Tensões de 208 V a 600 V, trifásico, linha a linha;
- Frequência de 50 Hz ou 60 Hz;
- Corrente de falta franca de 500 A a 106 kA;
- Espaçamento entre condutores de 6,35 mm a 76,2 mm;
- Distâncias de trabalho iguais ou maiores que 305 mm;
- Dimensões-limite para sistema confinado de 508 mm (altura ou largura ou profundidade);
- Configurações dos eletrodos conforme figuras apresentadas na seção 2.3.

Para calcular a corrente de arco, é usada a equação (7), que estima um valor intermediário, que ao ser utilizado na equação (8), resulta no valor final. Para determinar o valor intermediário provido pela equação (7), precisa-se utilizar os coeficientes que constam na Tabela A. 1.

$$I_{600} = 10^{(k_1 + k_2 \log I_{bf} + k_3 \log G)} (k_4 I_{bf}^6 + k_5 I_{bf}^5 + k_6 I_{bf}^4 + k_7 I_{bf}^3 + k_8 I_{bf}^2 + k_9 I_{bf} + k_{10}) \quad (7)$$

Onde:

- $I_{bf}$  é a corrente de falta franca trifásica, em kA;
- $I_{600}$  é a estimativa intermediária da corrente de arco para  $V = 600$  V, em kA;
- $G$  é o espaçamento entre os condutores, em mm;
- $\log$  é o  $\log_{10}$ ;

- $k_1$  a  $k_{10}$  são os coeficientes disponibilizados na Tabela A. 1.

$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{0,6}{V_{oc}}\right]^2 \times \left[\frac{1}{I_{600}^2} - \left(\frac{0,6^2 - V_{oc}^2}{0,6^2 \times I_{bf}^2}\right)\right]}} \quad (8)$$

Onde:

- $V_{oc}$  é a tensão do circuito, em kV;
- $I_{bf}$  é a corrente de falta franca trifásica, em kA;
- $I_{arc}$  é a corrente de arco final na tensão especificada, em kA;
- $I_{600}$  é a estimativa intermediária da corrente de arco para  $V = 600$  V, em kA.

Semelhante a (IEEE, 2002), em virtude da variação da magnitude que pode ocorrer com o arco elétrico, é necessário calcular um segundo valor de corrente de arco mínima. A energia incidente final ou a distância segura de aproximação é o maior dos dois valores calculados. Utilizando a equação (9), chega-se no resultado da corrente de arco mínima a ser utilizada, e utilizando a equação (10) tem-se o fator de correção da variação da corrente de arco.

$$I_{arc\_min} = I_{arc} \times (1 - 0,5 \times VarC_f) \quad (9)$$

$$VarC_f = k_1 V_{oc}^6 + k_2 V_{oc}^5 + k_3 V_{oc}^4 + k_4 V_{oc}^3 + k_5 V_{oc}^2 + k_6 V_{oc} + k_7 \quad (10)$$

Onde:

- $VarC_f$  é o fator de correção da variação da corrente de arco;
- $I_{arc}$  é a corrente de arco final na tensão especificada, em kA;
- $I_{arc\_min}$  é o valor reduzido da corrente de arco baseado no fator de correção, em kA;
- $V_{oc}$  é a tensão do circuito, em kV;
- $k_1$  a  $k_7$  são os coeficientes disponibilizados na Tabela A. 2.

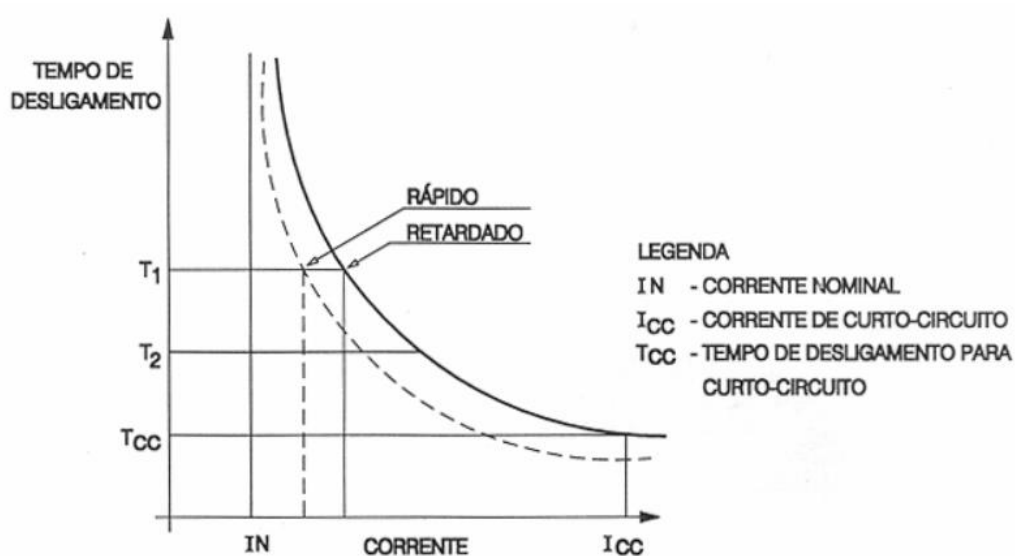
### 3.5 ENTRADA DE DADOS DE PROTEÇÃO DO SISTEMA

A determinação da duração do arco deve ser realizada a partir do tempo de atuação das proteções do sistema, sempre considerando o equipamento de proteção existente à montante que interromperá a corrente de arco no caso da falta. Nas aplicações mais comuns, se faz uso de relés de detecção e arco, relés com contadores e disjuntores ou até fusíveis termomagnéticos.

Para fusíveis, as curvas de tempo/corrente dos fabricantes podem incluir o tempo de fusão e de interrupção. Neste caso, deve-se adotar o tempo de interrupção. Caso o fabricante forneça somente a média do tempo de fusão, deve-se somar 10% e mais um adicional de 0,004 segundos no tempo de fusão, para determinar o tempo total de fusão. Se o tempo total de interrupção da corrente de falta de arco é menor que 0,01, este deverá ser usado. É importante salientar que para estudos que consideram dispositivos de proteção é necessário que seja considerado o cenário mais pessimista possível, cujo dispositivo demore o maior tempo para atuar, assim será simulado o cenário mais conservador possível, determinando as melhores medidas de proteção e segurança. A Figura 9 demonstra uma curva típica de um fusível de diazed, para auxiliar no entendimento.

Figura 9 - Curva típica tempo x corrente para fusível de diazed

Fonte: SENAI (2019)



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

### 3.6 ENERGIA INCIDENTE

#### 3.6.1 IEEE 1584 2002

No método de 2002, a IEEE começa por calcular o logaritmo da energia incidente normalizada através da equação (11). Essa equação é baseada em dados padrões como tempo de arco de 0.2 segundos e distância de arco de 610 mm.

$$\log E_n = k_1 + k_2 + 1,081 \log I_a + 0,0011G \quad (11)$$

Onde:

- $\log$  é o  $\log_{10}$ ;
- $E_n$  é a energia incidente normalizada para o intervalo de tempo e distância propostos, em J/cm<sup>2</sup>;
- $k_1$  é -0,555 para equipamentos fechados em configuração enclausurada;
- $k_2$  é -0,113 para sistemas aterrados;
- $G$  é o espaço entre os condutores de acordo com a Tabela 3, em mm.
- $I_a$  é a corrente de arco, em kA;

Posteriormente ao cálculo do logaritmo natural da energia incidente normalizada, usa-se a equação de apoio (12) para determinar a energia incidente normalizada e utilizá-la na equação (13), com o auxílio da Tabela 3, para resultar na energia incidente.

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

$$E = 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{D^x} \right) \quad (13)$$

Onde:

- $E$  é a energia incidente, em J/cm<sup>2</sup>;
- $C_f$  é uma constante de cálculo, sendo 1,5 para tensões abaixo de 1 kV;
- $E_n$  é a energia incidente normalizada;
- $t$  é o tempo de arco, em segundos;
- $D$  é a distância de trabalho, em mm;
- $x$  é o expoente de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Fator para equipamento conforme classe de tensão

Tensão do sistema (kV)	Tipo de Equipamento	Distância padrão entre os condutores (mm)	Fator x
0,208 - 1	Ao ar livre	10 - 40	2
	Comutador	32	1,473
	CCM e painéis	25	1,641
	Cabos	13	2

Fonte: adaptado de IEEE 1584 (2002)

### 3.6.2 IEEE 1584 2018

De acordo com a (IEEE, 2018), para definição dos valores de energia incidente, deve-se primeiro definir o fator de correção (CF) das dimensões do invólucro para as configurações em caixa (VCB, VCBB e HCB). As equações para essas configurações são normalizadas para compartimentos de tipo raso, com 508 mm de comprimento, altura e profundidade. O compartimento é considerado do tipo raso se:

- A tensão alternada do sistema seja menor que 600 V;
- Ambos os comprimento e altura sejam inferiores que 508 mm;
- A profundidade do compartimento seja menor ou igual à 203,2 mm.

Caso uma dessas condições não seja atendida o compartimento em avaliação leva o nome de compartimento típico, tornando-se necessária a determinação do CF a fim de ajustar o valor de energia incidente. O estudo também informa que a profundidade não é considerada a menos que a largura e a altura sejam ambas menores que 508 mm e que em casos de compartimentos com áreas de abertura superiores a 1.244,6 mm x 1.244,6 mm, o CF para 1.244,6 mm x 1.244,6 mm pode ser fixado para aplicação deste método. A Tabela A.3. auxilia na determinação da altura e do comprimento equivalente conforme as dimensões reais.

Em caso de compartimento típico, as equações (14) e (15) são utilizadas para determinação dos valores equivalentes de comprimento e altura, respectivamente.

$$\text{Comprimento}_1 = \left( 660,4 + (\text{Comprimento} - 660,4) \times \left( \frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right) \times 25,4^{-1} \quad (14)$$



$$Altura_1 = \left( 660,4 + (Altura - 660,4) \times \left( \frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right) \times 25,4^{-1} \quad (15)$$

Onde:

- *Comprimento<sub>1</sub>* é o comprimento equivalente do compartimento;
- *Comprimento* é valor real do comprimento, em mm;
- *Altura<sub>1</sub>* é a altura equivalente do compartimento;
- *Altura* é o valor real da altura, em mm;
- *V<sub>oc</sub>* é a tensão do circuito, em kV;
- *A* é uma constante igual a 4 para VCB e 10 para VCBB e HCB;
- *B* é uma constante igual a 20 para VCB, 24 para VCBB e 22 para HCB.

Posteriormente, deve-se utilizar a equação (16) para determinar o valor equivalente de dimensionamento do compartimento (EES) e com o auxílio da Tabela 5, utilizar a equação (17) para determinar o fator de correção (CF) para um compartimento típico.

$$EES = \frac{Comprimento_1 + Altura_1}{2} \quad (16)$$

$$CF = b_1 \times EES^2 + b_2 \times EES + b_3 \quad (17)$$

Onde:

- *CF* é o fator de correção do dimensionamento do compartimento;
- *EES* é o valor equivalente de dimensionamento utilizado para determinar o CF;
- *b<sub>1</sub>*, *b<sub>2</sub>* e *b<sub>3</sub>* são coeficientes retirados da Tabela 4.

Tabela 4 - Coeficientes para determinação do fator de correção

E.C.	b1	b2	b3
VCB	-0,0003020	0,03441	0,4325
VCBB	-0,0002976	0,03200	0,4790
HCB	-0,0001923	0,01935	0,6899

Fonte: adaptado de IEEE 1584 (2018)

Com o valor do CF definido, é possível obter o valor de energia incidente. Se a tensão do sistema for entre 208 V e 600 V, utiliza-se a equação (18) para determinação do valor intermediário, que neste caso, é a mesma que a energia incidente final.

$$E_{\leq 600} = \frac{12,552}{50} t \times 10^{(k_1 + k_2 \log G + C + k_{11} \log I_{bf} + k_{12} \log D + k_{13} \log I_{arc} + \log \frac{1}{CF})} \quad (18)$$

$$C = \frac{k_3 I_{arc600}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} \quad (19)$$

Onde:

- $C$  é uma constante de substituição para facilitação do entendimento;
- $E_{\leq 600}$  é a energia incidente para  $V_{oc} \leq 600$  V, em J/cm<sup>2</sup>;
- $t$  é o tempo de duração do arco, em ms;
- $G$  é a distância entre os condutores, em mm;
- $I_{arc600}$  é a corrente de arco para 600 V, em kA;
- $I_{arc}$  é a corrente de arco para  $V_{oc} \leq 600$  V, obtida pela equação (8), em kA;
- $I_{bf}$  é a corrente de falta franca trifásica, em kA;
- $D$  é a distância de trabalho, em mm;
- $CF$  é o fator de correção, obtido pela equação (17);
- $\log$  é o  $\log_{10}$ ;
- $k_1$  a  $k_{13}$  são os coeficientes fornecidos na Tabela A. 4.

A fim de converter o valor de J/cm<sup>2</sup> para cal/cm<sup>2</sup> (unidade mais usual, especialmente no que se refere à classificação de EPIs), o valor de energia incidente final em J/cm<sup>2</sup>, é dividido por 4,184.

### 3.7 DISTÂNCIA SEGURA DE APROXIMAÇÃO

Nesta etapa, será determinado a distância segura de aproximação em caso de ocorrência de arco elétrico. O método da (IEEE,2002) não informava claramente como se determinar este fator, diferentemente da sua atualização (IEEE, 2018).

#### 3.7.1 IEEE 1548 2002

Rearranjando as equações (12) e (13), pode-se obter uma equação para calcular a distância de segurança que pode ser utilizada, por exemplo, para determinar as distâncias de delimitação das zonas de risco ou controlada. Assim, a equação (20) sugere a distância de

segurança para sistemas com tensão entre 208 V e 15.000 V, nas condições dentro da faixa do modelo (IEEE,2002):

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (20)$$

Onde:

- $D_B$  é a distância segura de aproximação ao ponto do arco, em mm;
- $C_f$  é uma constante de cálculo, sendo 1,5 para tensões abaixo de 1 kV;
- $E_n$  é a energia incidente normalizada;
- $E_B$  é a energia incidente na distância segura de aproximação, em J/cm<sup>2</sup>;
- $t$  é o tempo de arco, em segundos;
- $D$  é a distância de trabalho, em mm;
- $x$  é o expoente de acordo com a Tabela 4.

Nesta equação será fixado o valor de  $E_B$  em 5 J/cm<sup>2</sup> visto a necessidade de descobrir a distância segura de aproximação para um trabalhador sem EPI, para facilitar as comparações dos métodos.

### 3.7.2 IEEE 1548 2018

A distância segura de aproximação ao arco elétrico é a distância de uma fonte de arco na qual a energia incidente calculada é 5,0 J/cm<sup>2</sup> ou 1,2 cal/cm<sup>2</sup>. A relevância desse valor consiste no fato de esta ser quantidade de energia incidente requerida para produzir uma queimadura de segundo grau curável em uma pele desprotegida (IEEE, 2018). Para o cálculo da distância segura de aproximação em sistemas com tensão abaixo de 600 V, é utilizada a equação (21).

$$AFB_{\leq 600} = 10^{\left( \frac{k_1 + k_2 \log G + C + k_{11} \log I_{bf} + k_{13} \log I_{arc} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{t}}{-k_{12}} \right)} \quad (21)$$

Onde:

- $C$  é a constante da equação (19);
- $AFB_{\leq 600}$  é a distância limite de aproximação para  $V_{oc} \leq 600$  V, em mm;
- $t$  é o tempo de duração do arco, em ms;

- $G$  é a distância entre os condutores, em mm;
- $I_{arc_{600}}$  é a corrente de arco para 600 V, em kA;
- $I_{arc}$  é a corrente de arco para  $V_{oc} \leq 600$  V, obtida pela equação (8), em kA;
- $I_{bf}$  é a corrente de falta franca trifásica, em kA;
- $CF$  é o fator de correção, obtido pela equação (17);
- $\log$  é o  $\log_{10}$ ;
- $k_1$  a  $k_{13}$  são os coeficientes fornecidos na Tabela A. 3.

### 3.8 NFPA 70E 2021

O método de análise de energia incidente considera que o nível de exposição à energia incidente deve ser baseado na distância de trabalho das áreas do rosto e peito do trabalhador a partir da possível fonte de arco para a específica tarefa a ser realizada, sendo as vestimentas de proteção e outros EPIs utilizados pelo trabalhador de acordo com esse valor de energia incidente (NFPA, 2021).

Quatro categorias de EPI são definidas na (NFPA, 2021), e as diferenças entre as suas categorias são determinadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Categorias de EPI conforme NFPA 70E-2021

Categoria	EPI
1	<p><b>Vestimenta:</b> Camiseta de manga longa e calças AR ou macacão AR, escudo facial AR ou capuz AR, jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete AR (opcional);</p> <p><b>Equipamentos de proteção:</b> Capacete, óculos de proteção, protetor auricular de inserção, luvas de couro para trabalho pesado, luvas AR ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro e calçado de couro (opcional).</p>
2	<p><b>Vestimenta:</b> Camiseta de manga longa e calças AR ou macacão AR, escudo facial AR ou capuz AR e balaclava AR, jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete AR (opcional);</p> <p><b>Equipamentos de proteção:</b> Capacete, óculos de proteção, protetor auricular de inserção, luvas de couro para trabalho pesado, luvas AR ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro e calçado de couro.</p>
3	<p><b>Vestimenta:</b> Camiseta de manga longa AR (conforme requerido), calças AR (conforme requerido), macacão AR (conforme requerido), jaqueta e calças do traje AR (conforme requerido), capuz AR, luvas AR ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro, jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete AR (opcional);</p> <p><b>Equipamentos de proteção:</b> Capacete, óculos de proteção, protetor auricular de inserção e calçado de couro.</p>
4	<p><b>Vestimenta:</b> Camiseta de manga longa AR (conforme requerido), calças AR (conforme requerido), macacão AR (conforme requerido), jaqueta e calças do traje AR (conforme requerido), capuz AR, luvas AR ou luvas de borracha isolantes com protetores de couro, jaqueta, parca, roupa refletiva, capa de chuva ou forro de inverno para capacete AR (opcional);</p> <p><b>Equipamentos de proteção:</b> Capacete, óculos de proteção, protetor auricular de inserção e calçado de couro.</p>

Fonte: Adaptado de (NFPA, 2021)

Tendo o resultado da energia incidente, será utilizado a Tabela 6 para determinar qual equipamento de proteção deve ser utilizado pelo trabalhador que, em caso de arco elétrico, se encontrará exposto a determinada energia incidente (NFPA, 2021).

Tabela 6 - Categorias de EPI conforme energia incidente

Categoria de EPI	cal/cm <sup>2</sup>	J/cm <sup>2</sup>
1	4	16,75
2	8	33,50
3	25	104,70
4	40	167,50

Fonte: Adaptado de (NFPA, 2021)

### 3.9 TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO

A diminuição dos riscos sob um ponto de vista ergonômico seria evitar a demasiada banalização de equipamentos de proteção individual. Quando determinada a classe de um equipamento de proteção individual deve ser considerado sua eficácia, protegendo o trabalhador a energia incidente exposta e com relação à sua portabilidade. Entende-se aqui portabilidade principalmente no sentido de não causar desconforto e não dificultar as ações dos trabalhadores. Considerar o uso de EPI's como uma solução paliativa, em que muitas vezes atrapalha o desenvolvimento da manutenção, aumentando o esforço e diminuindo a naturalidade dos movimentos, deveria ser uma prerrogativa para impulsionar ainda mais as medidas efetivas de proteção, baseando em diferentes soluções técnicas e organizacionais (Ergonomia, 2018).

Embora seja possível diminuir os níveis de energia incidente através da redução do tempo de atuação das proteções, esta hipótese resultaria na alteração do estudo de coordenação e seletividade das proteções. Portanto, mesmo sendo uma hipótese mais vantajosa economicamente, tendo em vista que o presente estudo de caso é para uma indústria em atuação, este método torna-se mais vantajoso se utilizado em fase de projeto e não será utilizado neste trabalho. Os métodos para a redução da corrente de curto-circuito, normalmente, sugerem a alteração de equipamentos na subestação, hipótese que é mais aconselhada se feita na etapa de

projeto. Como a subestação em análise já se possui carga, esta hipótese também não será avaliada.

Como será visto no estudo de caso, os dispositivos de proteção analisados na Seção 5.1 e 5.2 já atuam no período instantâneo, e a fim de reduzir o nível de energia incidente neste trabalho, será utilizado uma vara de manobra, permitindo ao trabalhador aumentar a distância de trabalho padrão em 305 milímetros, resultando numa distância de 760 milímetros, este novo valor deve ser realimentado nas equações dos métodos propostos.

## 4 ESTUDO DE CASO

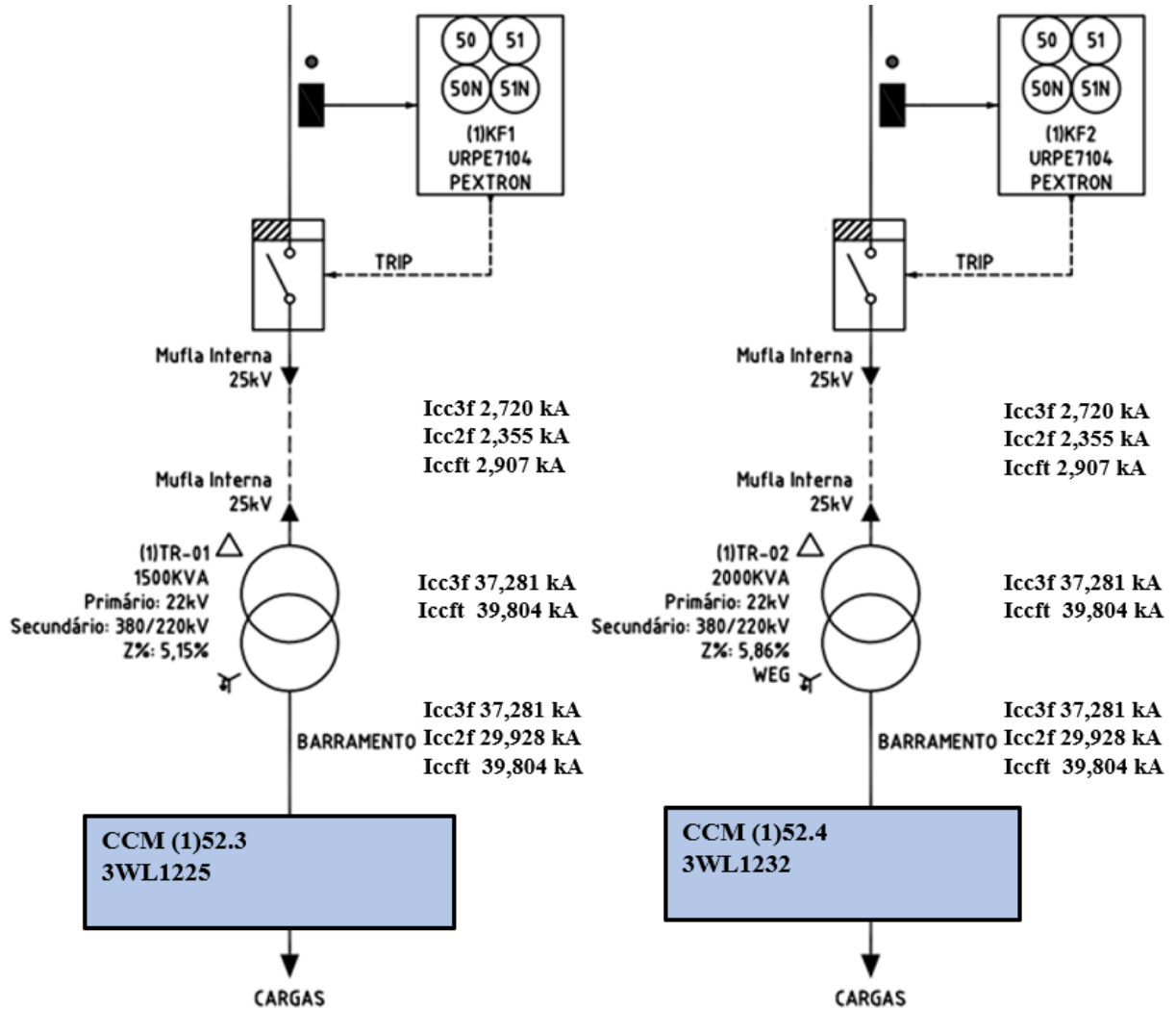
Neste trabalho será aplicado a metodologia, vista na seção anterior, para cálculo de ATPV, correntes de arco elétrico e distâncias seguras de aproximação, para os painéis de baixa tensão da subestação do setor de extração de óleo de soja da planta analisada. Foi determinado esta subestação em específico pelos altos valores de corrente de curto-circuito e pela dificuldade e alta frequência de manutenção no local. A SE-01 Extração, possui entrada de 25kV na mufla interna, transformador de potencial, chaves seccionadoras, relés de proteção, contadores, transformadores de corrente, transformadores abaixadores e disjuntores de baixa tensão, conforme pode ser visto no diagrama unifilar da subestação em questão representado pela Figura B.1.

No presente estudo de caso, será considerado para fins de cálculo as informações de coordenação e seletividade atuais da planta e os tempos de atuação para os disjuntores SIEMENS 3WL1225 e 3WL1232 parametrizados com as configurações atuais da planta, e respectivamente atribuídos aos painéis (1)52.3 e (1)52.4, destacados no diagrama unifilar reduzido e representado pela Figura 9. Os painéis elétricos que serão analisados neste estudo de caso têm dimensionamento de 0,80 m x 2,1 m x 0,8 m (comprimento, altura e profundidade), dimensionamento classificado como “típico” (IEEE, 2018). A Figura 10 também demonstra as correntes de curto-circuito utilizadas como dados de entrada neste estudo de caso. A corrente de curto-circuito trifásica franco, a ser considerada nos métodos propostos para os pontos estudados, é de 37,281 kA.

Posteriormente a definição das características do sistema analisado será determinado por algoritmo de cálculo desenvolvido em Matlab as correntes de arco voltaico e arco reduzidas, energia incidente e distâncias seguras de aproximação, para ambos os métodos IEEE:2002 e IEEE:2018. Os resultados obtidos serão demonstrados para avaliação e comparação no presente estudo de caso.



Figura 10 - Diagrama Unifilar com as correntes de curto-circuito



Fonte: Autor

#### 4.1 DISJUNTOR SIEMENS 3WL1225

Na subestação SE-01 há o disjuntor do CCM (1)52.3, cujo modelo é Siemens 3WL1225, com as parametrizações abaixo informadas:

- IR: 2250 A;
- tR: 10 segundos;
- Isd: 10000 A;
- tsd: 0,02 segundos;

- Ii: 50000 A.

Resultando na curva tempo x corrente, retirado do software próprio da Siemens, demonstrada na Figura 11.

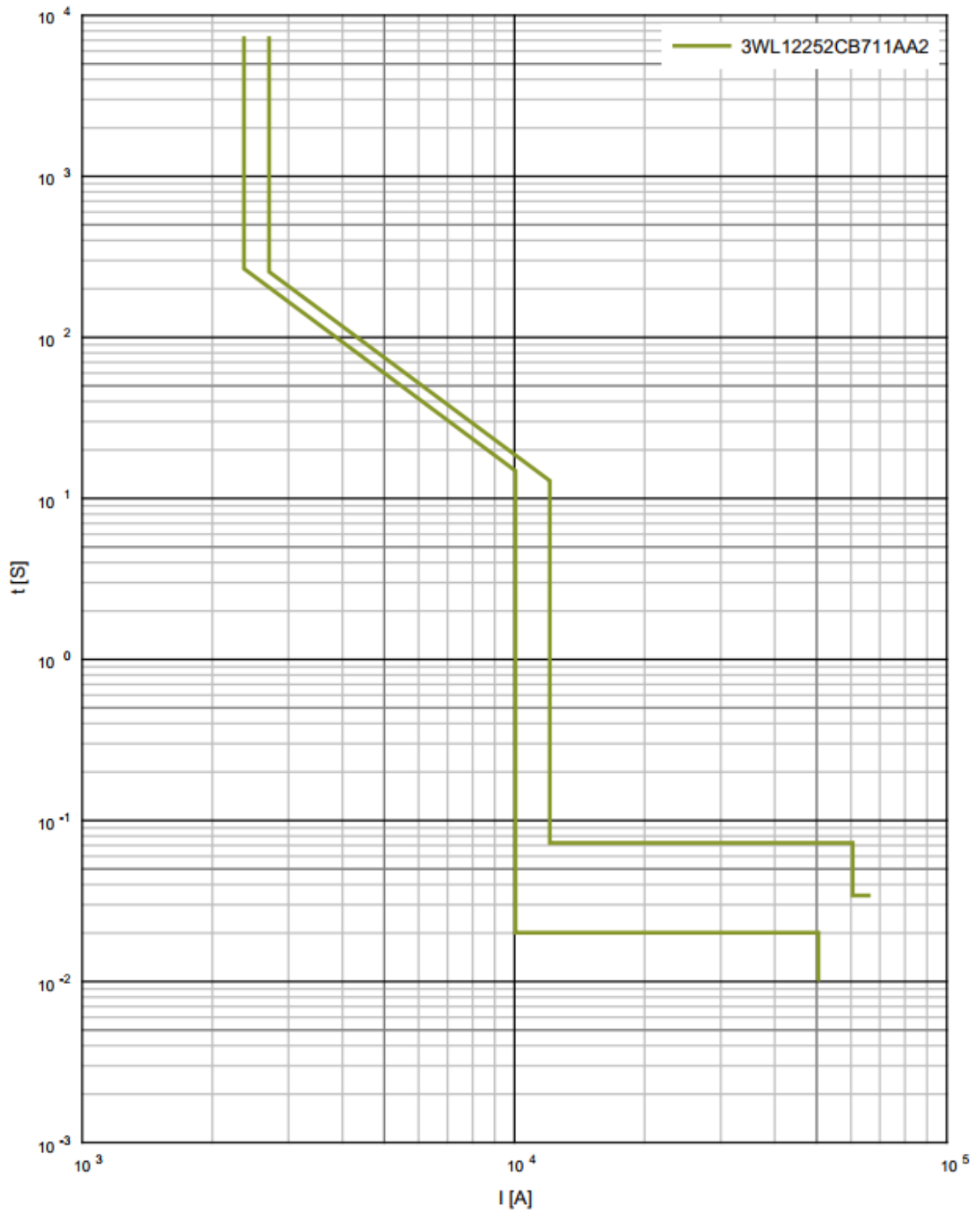
#### 4.2 DISJUNTOR SIEMENS 3WL1232

Na subestação SE-01 há o disjuntor do CCM (1)52.4, cujo modelo é Siemens 3WL1232, com as parametrizações abaixo informadas:

- IR: 3200 A;
- tR: 10 segundos;
- Isd: 9600 A;
- tsd: 0,02 segundos;
- Ii: 64000 A.

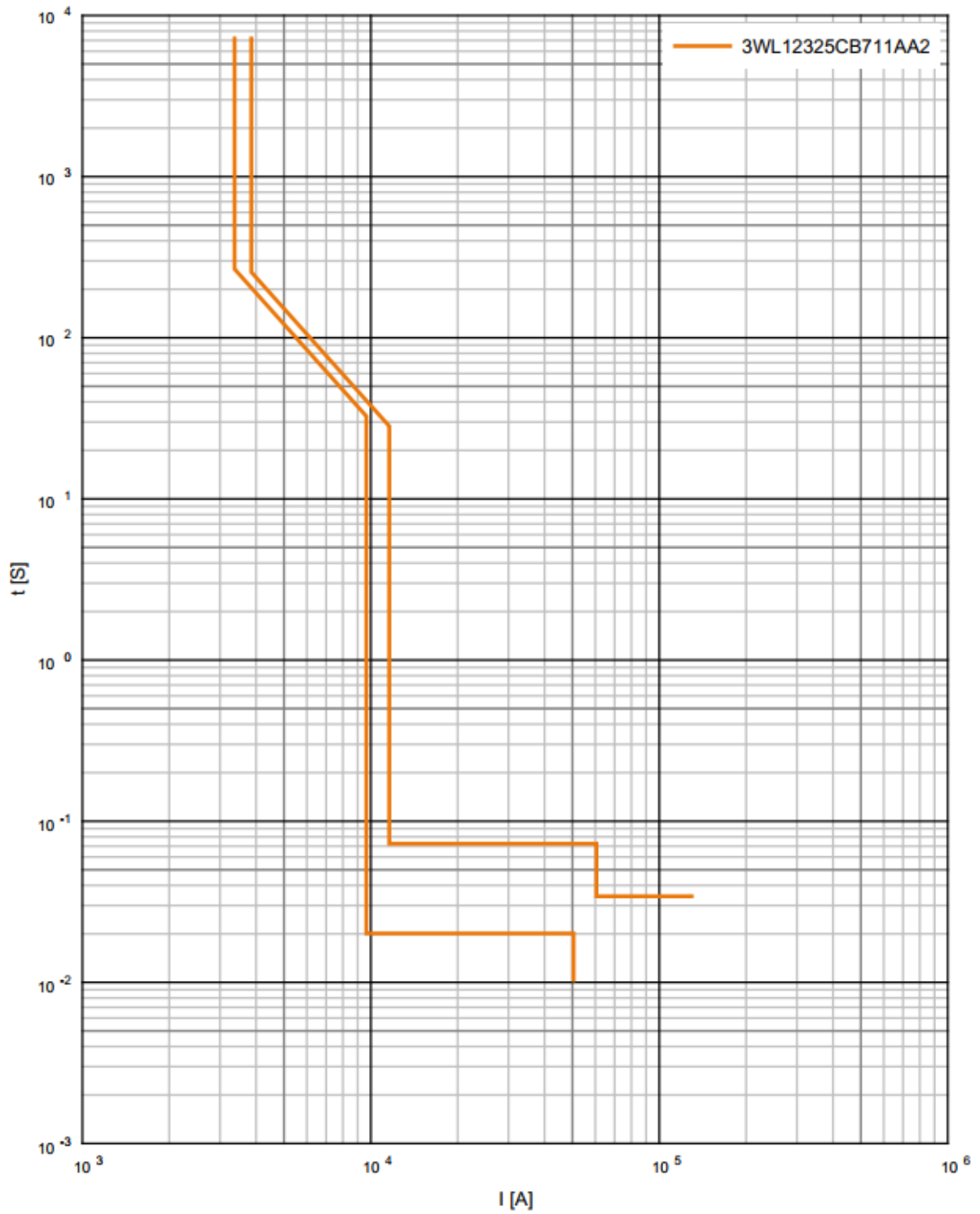
Resultando na curva tempo x corrente, retirado do software próprio da Siemens, demonstrada na Figura 12.

Figura 11 - Curva tempo x corrente para disjuntor 3WL1225



Fonte: Software Siemens

Figura 12 - Curva tempo x corrente para disjuntor 3WL1232



Fonte: Software Siemens

## 5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo será exibido os resultados das simulações de acordo com a metodologia proposta, tanto para o método IEEE:2002 quanto para o método IEEE:2018. Serão apresentadas maneiras de se diminuir a classe de EPI selecionado visando conseguir um resultado mais ergonômico, para os trabalhadores, e com um menor custo de fabricação, para a indústria considerada no estudo de caso.

### 5.1 MÉTODO IEEE:2002

A fim de calcular a energia incidente, distância segura de aproximação e classe de EPI correta, é necessário utilizar os seguintes parâmetros apresentados na Tabela 7.

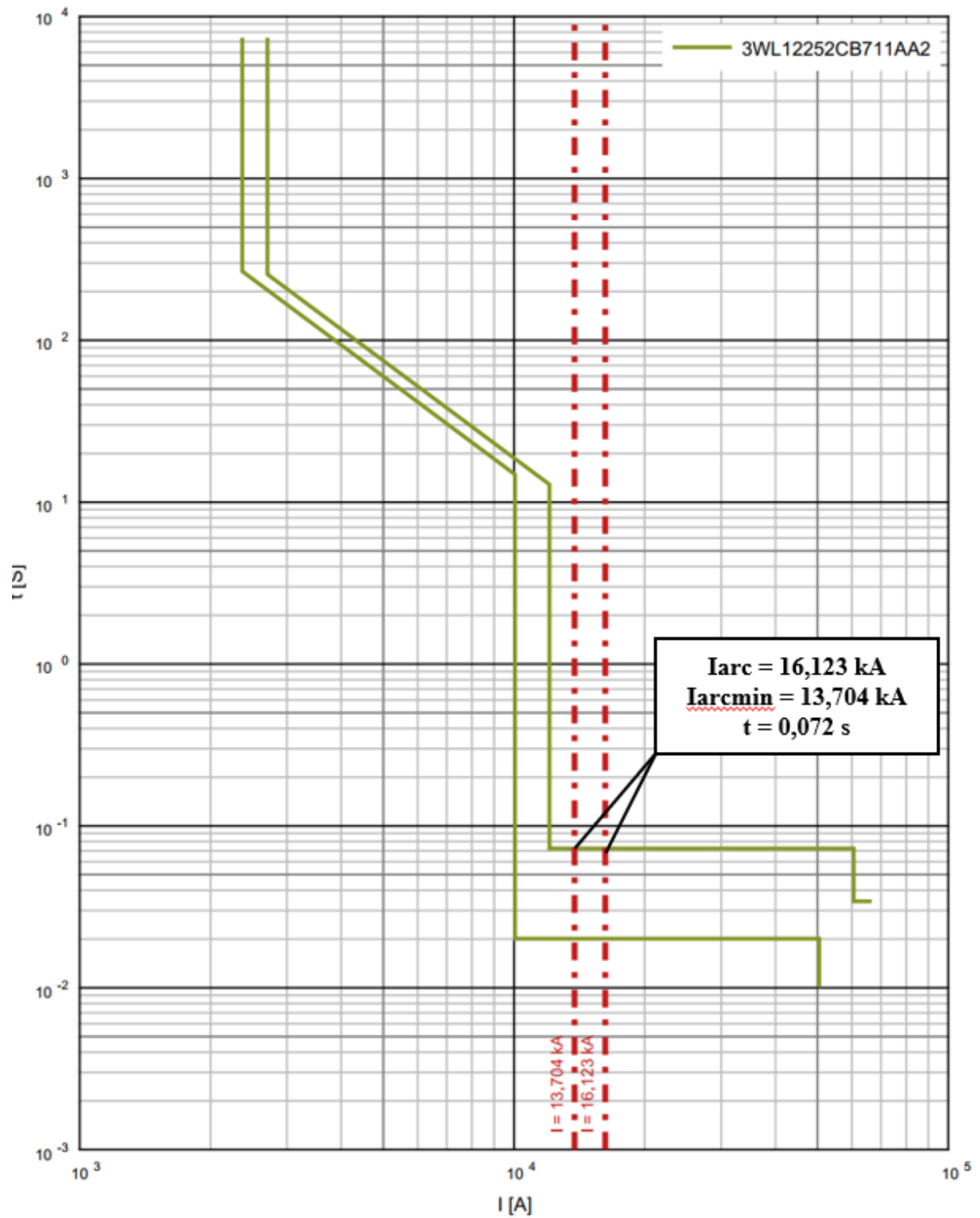
Tabela 7 - Parâmetros para aplicação do método IEEE:2002

Tensão do sistema (kV)	0,380
Corrente de falta franca trifásica (kA)	37,281
Espaçamento entre os condutores (mm)	25
Distância de trabalho (mm)	455

Fonte: Autor

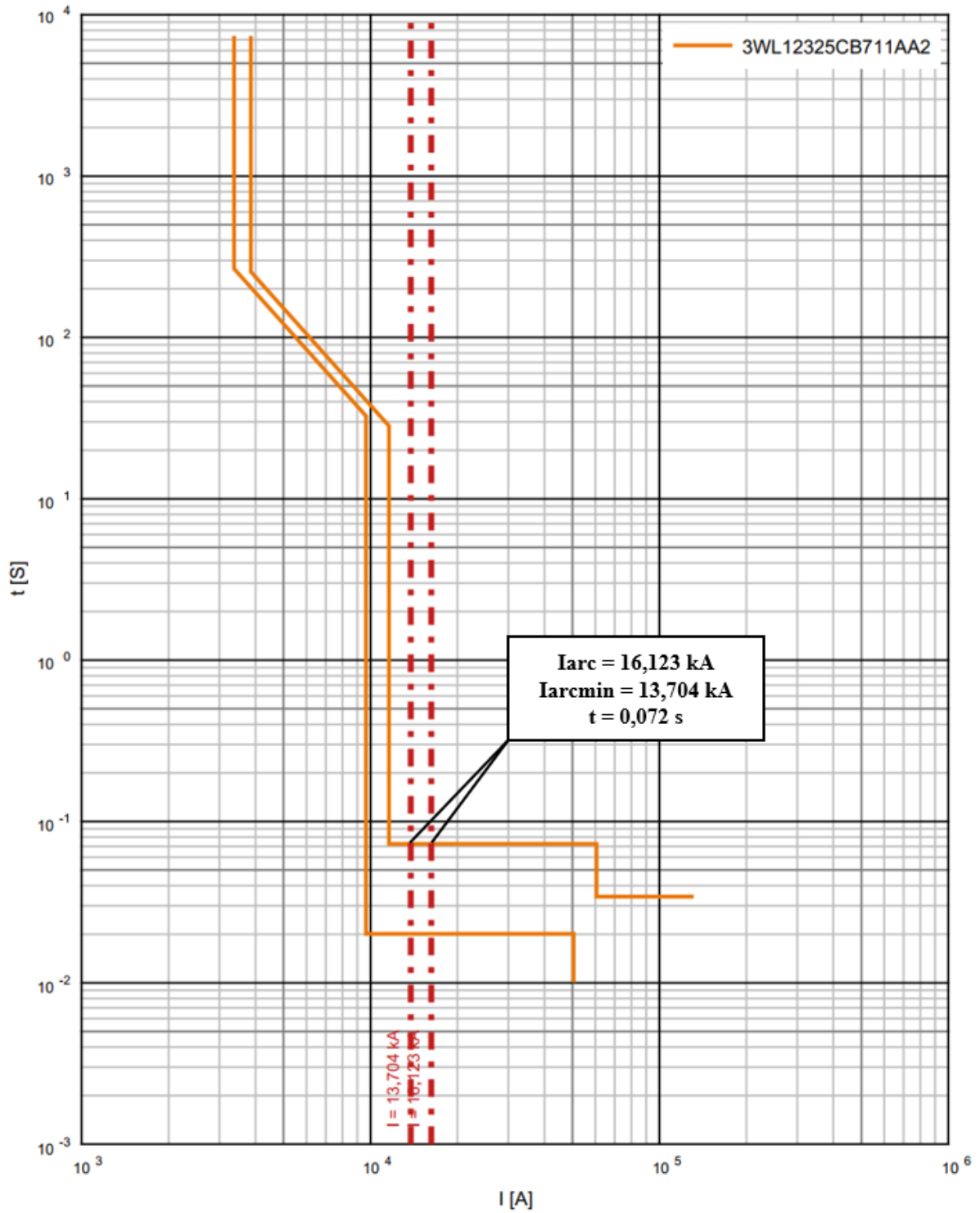
A IEEE:2002 determina o cálculo das correntes de arco voltaico através das equações (5) e (6), conforme cálculo em Matlab. Este método determina que seja calculado novamente, considerando 85% da corrente do arco elétrico estimado, e dentre estas duas comparações, seja utilizado o que resulta na maior energia incidente para o estudo. As Figuras 13 e 14, demonstram a curva tempo x corrente dos disjuntores 3WL1225 e 3WL1232 respectivamente, com os valores de corrente de arco e corrente de arco reduzida resultantes da aplicação do método. Assim, pode-se determinar qual o tempo de atuação da proteção para estes valores de corrente.

Figura 13 - Curva tempo x corrente do disjuntor 3WL1225 para as correntes de arco



Fonte: Adaptado de Software Siemens

Figura 14 - Curva tempo x corrente do disjuntor 3WL1232 para as correntes de arco



Fonte: Adaptado de Software Siemens

De acordo com os gráficos apresentados, é correto afirmar que ambos os disjuntores analisados possuem o mesmo tempo de atuação, 0,072 segundos, para ambas as correntes de arco determinadas pelo método. Como ambos os dispositivos de proteção atuam no período instantâneo, e na mesma faixa de valor, é possível considerar que os dois painéis terão os mesmos resultados determinados pelo método proposto. Para o cálculo da energia incidente é necessário utilizar o tempo de exposição ao arco voltaico, cujo é definido pelo tempo de atuação acrescido do tempo de abertura do dispositivo de proteção (IEEE, 2002). De acordo com o *datasheet* destes dispositivos, o tempo de abertura é 0,034 segundos (SIEMENS, 2019). Com a informação da corrente de curto-circuito, tempo de exposição do arco, corrente de arco e corrente de arco mínima, pode-se chegar aos resultados mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados da IEEE Std 1584:2002 para o estudo de caso

Corrente de arco (kA)	16,123	Corrente de arco reduzida (kA)	13,7045
Tempo de exposição (s)	0,106	Tempo de exposição (s)	0,106
Energia incidente (J/cm <sup>2</sup> )	24,867	Energia incidente (J/cm <sup>2</sup> )	20,861
Energia incidente (cal/cm <sup>2</sup> )	5,943	Energia incidente (cal/cm <sup>2</sup> )	4,985
Distância de aproximação segura (m)	1,209	Distância de aproximação segura (m)	1,086

Fonte: Autor

Como ambas as correntes de arco estão no período de atuação instantânea do dispositivo de proteção, tem-se que a maior energia incidente, e que deve ser considerada, se dá quando é considerada a maior corrente de arco. Portanto, aplicando o método da IEEE Std 1584 2002, tem-se que a energia incidente para este estudo de caso é de 24,8678 J/cm<sup>2</sup>. De acordo com a Tabela 6, pode-se afirmar que para este nível de energia incidente será necessário o uso de EPI classe 2, o qual protege o trabalhador a uma exposição de até 33,5 J/cm<sup>2</sup>.



## 5.2 MÉTODO IEEE:2018

A fim de calcular a energia incidente, distância segura de aproximação e classe de EPI correta, é necessário utilizar os seguintes parâmetros apresentados na Tabela 9.

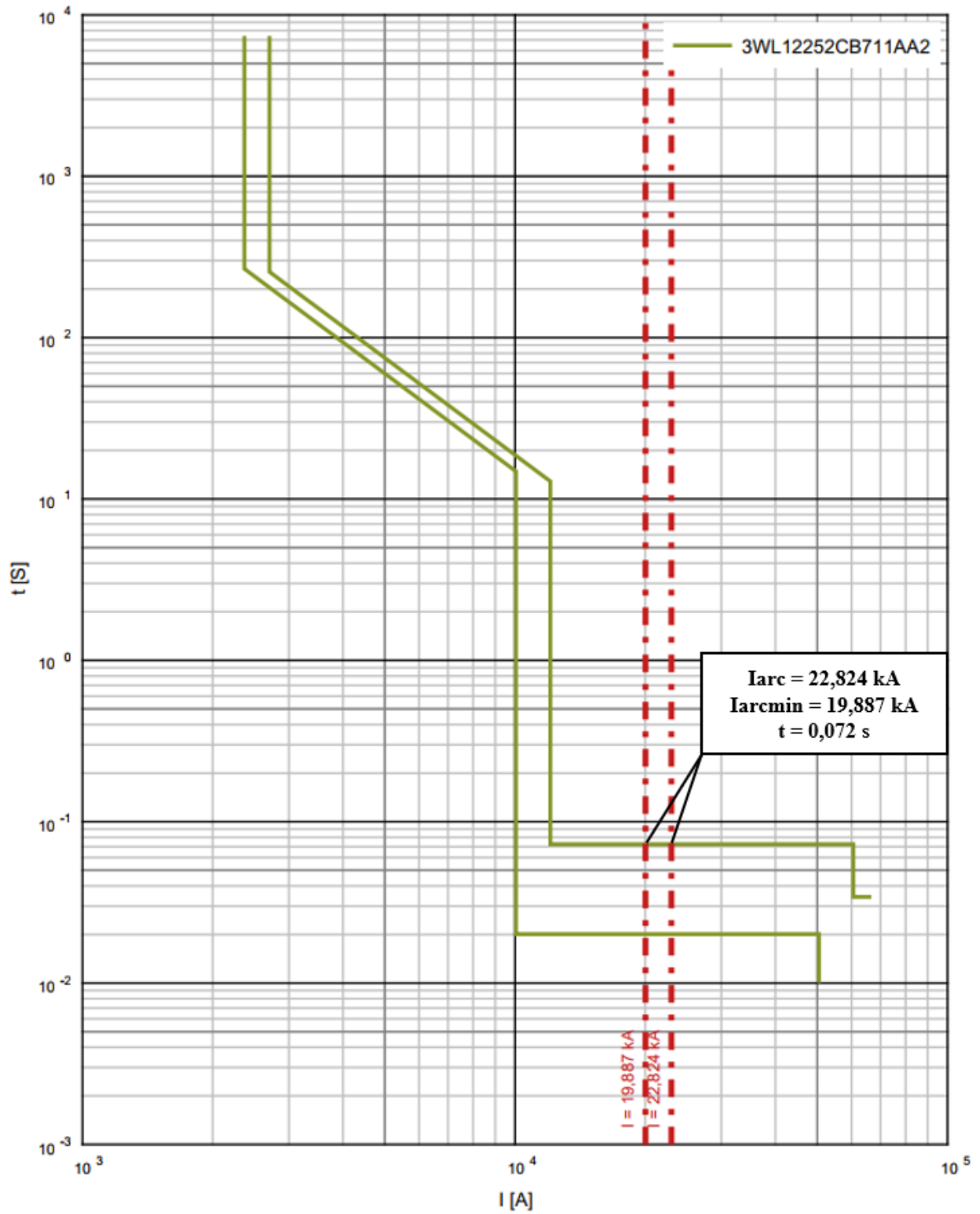
Tabela 9 - Parâmetros para aplicação do método IEEE:2018

Tensão do sistema (kV)	0,380
Corrente de falta franca trifásica (kA)	37,281
Espaçamento entre os condutores (mm)	25
Distância de trabalho (mm)	455
Corrente de arco para 600 V (kA)	28,857

Fonte: Autor

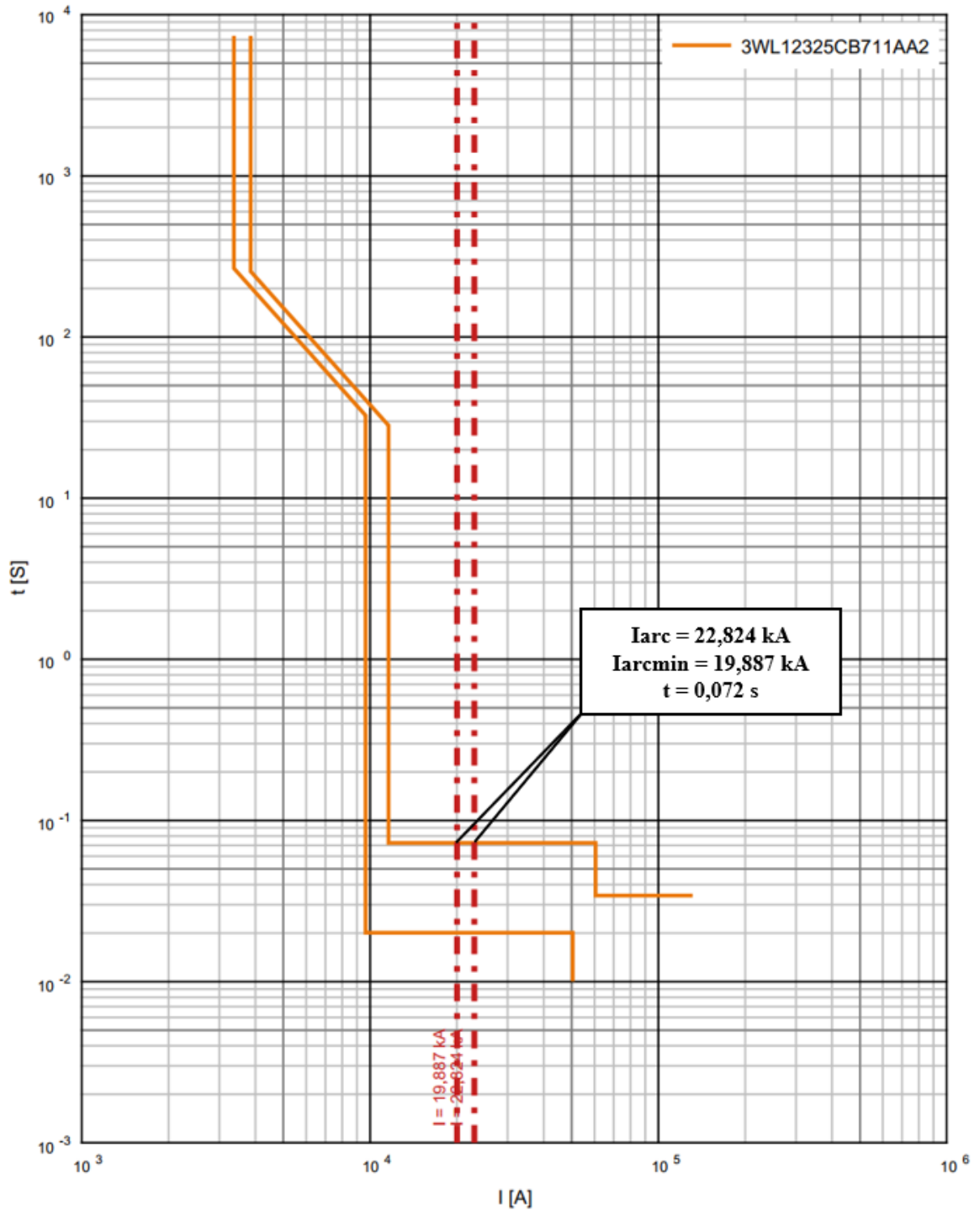
Semelhante a (IEEE, 2002), em virtude da variação da magnitude que pode ocorrer com o arco elétrico, a (IEEE, 2018) determina que seja calculado um segundo valor de corrente de arco mínima como foi mostrado na Seção 3.4.2. através da Equação (9). A energia incidente final ou a distância segura de aproximação é o maior dos dois valores calculados. As Figuras 15 e 16, demonstram a curva tempo x corrente dos disjuntores 3WL1225 e 3WL1232 respectivamente, com os valores de corrente de arco e corrente de arco mínima resultantes da aplicação do método. Assim, podemos determinar qual o tempo de atuação da proteção para estes valores de corrente.

Figura 15 - Curva tempo x corrente do disjuntor 3WL1225 para as correntes de arco



Fonte: Adaptado de Software Siemens

Figura 16 - Curva tempo x corrente do disjuntor 3WL1232 para as correntes de arco



Fonte: Adaptado de Software Siemens

De acordo com os gráficos apresentados, e semelhante ao método anteriormente proposto, é correto afirmar que ambos os disjuntores analisados, para as atuais parametrizações e configurações conforme estudo de coordenação e seletividade da planta, possuem o mesmo tempo de atuação, 0,072 segundos, para ambas as correntes de arco determinadas pelo método. Como ambos os dispositivos de proteção atuam no período instantâneo, e na mesma faixa de valor, é possível considerar que os dois painéis terão os mesmos resultados determinados pelo método proposto. Para o cálculo da energia incidente é necessário utilizar o tempo de exposição ao arco voltaico, cujo é definido pelo tempo de atuação acrescido do tempo de abertura do dispositivo de proteção (IEEE, 2002). De acordo com o *datasheet* destes dispositivos, o tempo de abertura é 0,034 segundos (SIEMENS, 2019). Com a informação da corrente de curto-circuito, tempo de exposição do arco, corrente de arco e corrente de arco mínima, pode-se chegar aos resultados mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 -Resultados da IEEE Std 1584:2018 para o estudo de caso

Corrente de arco (kA)	22,824	Corrente de arco mínima (kA)	19,887
Tempo de exposição (s)	0,106	Tempo de exposição (s)	0,106
Energia incidente (J/cm <sup>2</sup> )	19,328	Energia incidente (J/cm <sup>2</sup> )	16,941
Energia incidente (cal/cm <sup>2</sup> )	4,619	Energia incidente (cal/cm <sup>2</sup> )	4,049
Distância de aproximação segura (m)	1,057	Distância de aproximação segura (m)	0,973

Fonte: Autor

Como ambas as correntes de arco estão no período de atuação instantânea do dispositivo de proteção, tem-se que a maior energia incidente, e que deve ser considerada, se dá quando é considerada a maior corrente de arco. Portanto, aplicando o método da IEEE Std 1584 2018, tem-se que a energia incidente para este estudo de caso, agora aplicando a atualização do método, é de 19,3284 J/cm<sup>2</sup>. De acordo com a Tabela 6, pode-se afirmar que para este nível de energia incidente será necessário o uso de EPI classe 2, o qual protege até 33,5 J/cm<sup>2</sup>. Ao comparar os resultados obtidos pelas aplicações de ambos os métodos é correto

afirmar que o método atual, ao considerar mais parâmetros de classificação para o sistema analisado, e com a inclusão de etapas minuciosas, resultou para todas as simulações em valores de energia incidente e distâncias de aproximação seguras menores se comparado com o modelo da IEEE 1584:2002.

### 5.3 ANÁLISE DA TÉCNICA DE MITIGAÇÃO

Visando a melhor ergonomia do trabalhador, e uma possível economia para a indústria cujo planta é utilizada neste estudo de caso, nesta seção será utilizado de uma técnica de mitigação, para os resultados obtidos pelos métodos anteriormente propostos. A fim de diminuir a classe de equipamento de proteção individual, porém mantendo a segurança de isolamento para energia incidente e ATPV propostos no estudo de caso.

No objetivo de reduzir o nível de energia incidente neste trabalho, será utilizado uma vara de manobra, permitindo ao trabalhador aumentar a sua distância de trabalho em 305 milímetros. Alterando o parâmetro utilizado para a distância de trabalho, a corrente de arco e o tempo de atuação dos dispositivos não mudam, bem como a distância de aproximação segura, pois as equações previstas pelos métodos não utilizam desta distância, porém a energia incidente é alterada, como pode ser visto na Tabela 11 e 12, que demonstra respectivamente a comparação dos modelos IEEE:2002 e IEEE:2018 com a alteração deste parâmetro.

Tabela 11 - Comparação dos resultados da IEEE Std 1584:2002 com a utilização de vara de manobra

Distância de trabalho (mm)	455	Distância de trabalho (mm)	760
Corrente de arco (kA)	16,123	Corrente de arco reduzida (kA)	16,123
Tempo de exposição (s)	0,106	Tempo de exposição (s)	0,106
Energia incidente (J/cm <sup>2</sup> )	24,867	Energia incidente (J/cm <sup>2</sup> )	10,715
Energia incidente (cal/cm <sup>2</sup> )	5,943	Energia incidente (cal/cm <sup>2</sup> )	2,5611
Distância de aproximação segura (m)	1,209	Distância de aproximação segura (m)	1,209

Fonte: Autor

Tabela 12 - Comparação dos resultados da IEEE Std 1584:2018 com a utilização de vara de manobra

Distância de trabalho (mm)	455	Distância de trabalho (mm)	760
Corrente de arco (kA)	22,824	Corrente de arco reduzida (kA)	22,824
Tempo de exposição (s)	0,106	Tempo de exposição (s)	0,106
Energia incidente (J/cm <sup>2</sup> )	19,328	Energia incidente (J/cm <sup>2</sup> )	8,514
Energia incidente (cal/cm <sup>2</sup> )	4,619	Energia incidente (cal/cm <sup>2</sup> )	2,035
Distância de aproximação segura (m)	1,057	Distância de aproximação segura (m)	1,057

Fonte: Autor

De acordo com os resultados obtidos, é correto afirmar que para o método da IEEE:2002, com a utilização da vara de manobra, a energia incidente no painel estudado seria de 10,7157 J/cm<sup>2</sup> e respectivamente, para o método atualizado, a energia incidente neste mesmo painel seria de 8,5145 J/cm<sup>2</sup>. Ao compararmos estes resultados com os demonstrados na Tabela 6 – Categorias de EPI conforme energia incidente, é determinado que para ambos os valores de energia incidente resultantes será necessário o uso de EPI classe 1, o qual protege o trabalhador a uma exposição de até 16,75 J/cm<sup>2</sup> ou 4 cal/cm<sup>2</sup>. Entretanto, mesmo com a utilização da vara de manobra proposta, não poderá ser realizada a manutenção nos painéis analisados sem a utilização de EPI, pois ambos os valores foram maiores que 5,0 J/cm<sup>2</sup>, que é a quantidade de energia incidente requerida para produzir uma queimadura de segunda grau curável em uma pele desprotegida (IEEE, 2018).

## 6 CONCLUSÕES

A motivação para a realização deste trabalho foi a falta de materiais e normas brasileiras disponíveis para se determinar corretamente a proteção adequada para a realização de trabalhos em painéis elétricos de baixa tensão. Através das atualizações e revisões dos métodos de cálculo da energia incidente é notório que este assunto tem tido importância no cenário de engenharia elétrica mundial. Diante destas atualizações, os métodos tornam-se cada vez mais complexos e, conseqüentemente, mais próximos da realidade. Entretanto, o Brasil ainda carece de normas que detalhem os métodos de cálculo para energia incidente, e atribuições para o equipamento de proteção individual de forma sucinta. Resultando no apoio em normas estrangeiras para determinação destes resultados.

Com o objetivo de demonstrar a importância do trabalho proposto, foi elencado os riscos do arco voltaico, bem como seus tipos de categorias, propostos ao trabalhador que, porventura, presenciar este evento. Também são abordados neste trabalho, normas nacionais e estrangeiras, cujo são necessárias para tratar da estimativa e proteção a este evento. A fim de calcular a energia incidente e a distância segura de aproximação em caso de arco elétrico, foram utilizadas as normas americanas IEEE 1584 e NFPA 70E, com todo o seu equacionamento, tanto na IEEE *Standard* 1584:2002 quanto na sua atualização IEEE *Standard* 1584:2018, programado via software de Matlab e convertendo as unidades de medida para o Sistema Internacional, quando necessário.

A revisão de 2018 da norma IEEE 1584 passou a determinar, de forma muito mais detalhada, o cálculo da energia incidente se comparada com a versão de 2002, que era modelada em grande parte por equações baseadas no método de Ralph Lee, com poucas constantes, linearizadas a partir dos ensaios realizados e/ou equações empíricas. A atualização da norma, dispõe de interpolações para adaptar os parâmetros do sistema em questão, com a adição de diversas etapas, melhorando a aproximação para a classificação do sistema analisado, alterando as constantes e o equacionamento conforme as definições do sistema atual. Foram incluídos tipos de configuração dos eletrodos e as dimensões dos painéis para os locais em que o estudo determina a energia incidente no caso de arco elétrico. A atualização também determina uma realimentação mais efetiva na hora de calcula a corrente de arco elétrico, através da adição do

fator de correção da variação da corrente de arco, etapa que no modelo anterior era definida como, basicamente, 85% da corrente calculada.

Ao comparar os resultados obtidos pelo estudo de caso é correto afirmar que o método atual, ao considerar mais parâmetros de classificação para o sistema analisado, e com a inclusão de etapas minuciosas, resultou para todas as simulações em valores de energia incidente e distâncias de aproximação seguras menores se comparado com o modelo desatualizado. Ao realizar uma análise mais aprofundada dos resultados, pode-se chegar à conclusão de que a diferença de resultados para painéis de baixa tensão é pequena, porém dependendo do painel a ser considerado, este delta pode resultar na determinação de uma classe de EPI incorreta, escolha esta que possivelmente resultaria numa fatalidade. Desta forma, como é de obrigação do empregador fornecer para o colaborador as condições de trabalho mais seguras e a fim de se proteger de acordo com as normas vigentes, torna-se necessário a recorrente utilização do método atualizado e demonstrado nesse estudo, para painéis de baixa tensão, para todo painel elétrico onde ocorra manutenção na planta, a fim de determinar de forma segura a manutenção.

Dessa forma, pode-se concluir que o presente trabalho de conclusão foi bastante proveitoso e estimulante para o aluno, tendo em vista que possibilitou o contato com diversas áreas da engenharia elétrica, imersão em normas estrangeiras e a análise de uma indústria em funcionamento para o estudo de caso. Tendo em vista as ressalvas do presente trabalho, é de suma importância estar sempre procurando por atualizações no desenvolvimento de procedimentos para a manutenção no setor elétrico, a fim de constantemente aumentar a proteção ao trabalhador e diminuir os possíveis riscos que a atividade propõe.

O presente trabalho poderá contribuir para estudos que visam determinar a corrente de arco voltaico, energia incidente, ATPV, distâncias seguras de aproximação e uma correta determinação das vestimentas antichamas necessárias, tanto para a baixa tensão quanto para a média tensão. Os algoritmos compartilhados nos apêndices deste trabalho podem ser incrementados, com o intuito de analisar uma planta industrial em sua totalidade.



## REFERÊNCIAS

- ABRACOPEL. **Anuário estatístico brasileiro dos acidentes de origem elétrica.** p. 18–37, 2021.
- AMERICAN BURN ASSOCIATION. **National Burn Repository 2019 Update: Report of Data From 2009-2018.** Chicago, IL, USA, 2019.
- DAS, J. C. **Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation.** [s.l.] Wiley-IEEE Press, 2021.
- DOAN, D. R. **Arc Flash Calculations for Exposures to DC Systems.** IEEE Transactions on Industry Applications, v. 46, n. 6, Nov. 2010.
- DOUGHTY, R. L. et al. **Testing update on protective clothing and equipment for electric arc exposure.** Record of Conference Papers. IEEE Industry Applications Society 44th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference. Anais... Banff, Alberta, Canadá: IEEE, 1997.
- DOUGHTY, R. L.; NEAL, T. E.; FLOYD, H. L. **Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600 V power distribution systems.** Record of Conference Papers. IEEE Industry Applications Society 45th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference (Cat. No.98CH36234). Anais... Indianapolis, IN, USA: IEEE, 1998.
- DOUGHTY, R. L.; NEAL, T. E.; FLOYD, H. L. Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600-V power distribution systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 36, n. 1, p. 257–269, 2000.
- DUNKI-JACOBS, J. R. **The Escalating Arcing Ground-Fault Phenomenon.** IEEE Transactions on Industry Applications, v. IA-22, n. 6, p. 1156–1161, Nov. 1986.
- FALZON, P. **Ergonomia.** Ed.: 2ª edição. Brasil: Blucher. 2018.
- GOLOVKOV, M.; SCHAU, H.; BURDGE, G. **Electric arc: Protecting against thermal effect.** **Professional Safety**, v. 62, p. 49–54, 2017.
- IEEE. **1584-2002 - IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations.** [s.l.] IEEE, 2002.

IEEE. **1584-2018 - IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations (Revision of IEEE Std 1584-2002)**. [s.l.] IEEE, 2018.

KAUFMANN, R. H.; PAGE, J. C. **Arcing Fault Protection for Low-Voltage Power Distribution System - Nature of the Problem**. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, v. 79, n. 3, p. 160–165, Abr. 1960.

LEE, R. H. **The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. IA-18, n. 3, p. 246–251, 1982.

NFPA. **Electrical Safety in the Workplace (NFPA 70E)**, 2021.

NR-10. **Norma Regulamentadora 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**, Portaria SEPRT n.º 915, de 30 de julho de 2019.

SENAI. **Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial**, Curso de Eletricidade Predial, Unidade 3, Texto complementar II: Dispositivos de Proteção, São Paulo, 2019.

SHIELDS, F. J. **The Problem of Arcing Faults in Low-Voltage Power Distribution Systems**. IEEE Transactions on Industry and General Applications, v. IGA-3, n. 1, p. 15–25, Jan. 1967.

## ANEXO A

Tabelas para auxílio na determinação de coeficientes pelo método IEEE Std 1584:2018.

Tabela A. 1 - Coeficientes para determinação da corrente de arco intermediária

<b>E.C.</b>	<b>Voc</b>	<b>k1</b>	<b>k2</b>	<b>k3</b>	<b>k4</b>	<b>k5</b>	<b>k6</b>	<b>k7</b>	<b>k8</b>	<b>k9</b>	<b>k10</b>
<b>VCB</b>	600 V	-0,04287	1,035	-0,083	0	0	-4,78E-09	1,96E-06	-0,00023	0,003141	1,092
<b>VCBB</b>	600 V	-0,017432	0,98	-0,05	0	0	-5,77E-09	2,52E-03	-0,00034	0,01187	1,013
<b>HCB</b>	600 V	0,054922	0,988	-0,11	0	0	-5,38E-09	2,32E-03	-0,00302	0,0091	0,9725
<b>VOA</b>	600 V	0,043785	1,04	-0,18	0	0	-4,78E-09	1,96E-03	-0,00023	0,003141	1,092
<b>HOA</b>	600 V	0,111147	1,008	-0,24	0	0	-3,90E-09	1,64E-03	-0,0002	0,002615	1,1

Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018)

Tabela A. 2 - Coeficientes para determinação do fator de correção da variação da corrente de arco

<b>E.C</b>	<b>k1</b>	<b>k2</b>	<b>k3</b>	<b>k4</b>	<b>k5</b>	<b>k6</b>	<b>k7</b>
<b>VCB</b>	0	-1,4269E-06	8,3137E-05	-0,0019382	0,022366	-0,12645	3,02E-01
<b>VCBB</b>	0,001138	-0,60287	0,0012758	-0,013778	0,080217	-0,24066	3,35E-01
<b>HCB</b>	0	-0,003097	0,00016405	-0,0033609	0,033308	-0,16182	3,46E-01
<b>VOA</b>	0,0095606	-0,51543	0,0011161	-0,01242	0,075125	-0,23584	3,37E-01
<b>HOA</b>	0	-0,031555	0,0001682	-0,0034607	0,034124	-0,1599	3,46E-01

Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018)

Tabela A. 3 - Determinação dos valores equivalentes de comprimento e altura

E.C	Dimensão	<508 (mm)	>508 e <660,4 (mm)	>660,4 e <1244,6 (mm)	>1244,6 (mm)
<b>VCB</b>	Comprimento 1	20	0,03937 x Comprimento	Equação (14) c/ Comprimento Atual	Equação (14) c/ Comprimento = 1244,6
	Altura1	20	0,03937 x Altura	0,03937 x Altura	49
<b>VCB B</b>	Comprimento 1	20	0,03937 x Comprimento	Equação (14) c/ Comprimento Atual	Equação (14) c/ Comprimento = 1244,6
	Altura1	20	0,03937 x Altura	Equação (15) c/ Altura Atual	Equação (15) c/ Altura = 1244,6
<b>HCB</b>	Comprimento 1	20	0,03937 x Comprimento	Equação (14) c/ Comprimento Atual	Equação (14) c/ Comprimento = 1244,6
	Altura1	20	0,03937 x Altura	Equação (15) c/ Altura Atual	Equação (15) c/ Altura = 1244,6

Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018)

Tabela A. 4 - Coeficientes para determinação da energia incidente para sistemas entre 208 V e

600 V

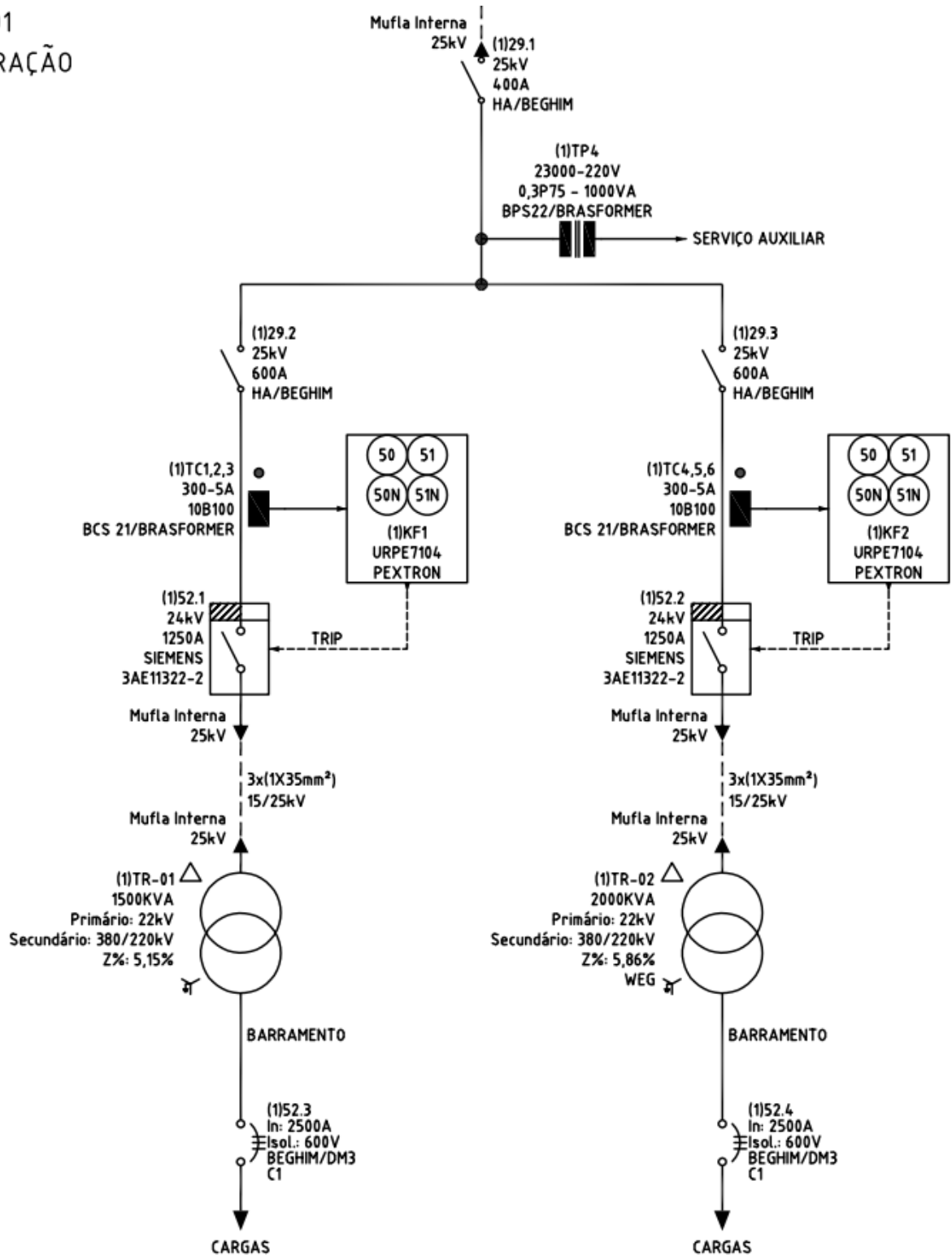
E.C./Voc	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
<b>VCB</b>	0,753364	0,566	1,752636	0	0	-4,783E-09	1,96E-06	-2,29E-04	0,003141	1,092	0	-1,598	0,957
<b>VCBB</b>	3,068459	0,26	-0,098107	0	0	-5,767E-09	2,52E-06	-3,40E-04	0,01187	1,013	-0,06	-1,809	1,19
<b>HCB</b>	4,073745	0,344	-0,370259	0	0	-5,382E-09	2,32E-06	-3,02E-04	0,0091	0,9725	0	-2,03	1,036
<b>VOA</b>	0,679294	0,746	1,222636	0	0	-4,783E-09	1,96E-06	-2,29E-04	0,003141	1,092	0	-1,598	0,997
<b>HOA</b>	3,470417	0,465	-0,261863	0	0	-3,895E-09	1,64E-06	-1,97E-04	0,002615	1,1	0	-1,99	1,04

Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018)

ANEXO B

Figura B. 1 – Diagrama Unifilar da SE-01 Extração

SE-01  
EXTRAÇÃO



## APÊNDICE A

Algoritmos de cálculo desenvolvidos em Matlab, para aplicação do método IEEE Std 1584:2002.

Apêndice A.1 – Algoritmo de cálculo para determinação da corrente de arco e corrente de arco reduzida.

%IEEE 2002 - CORRENTE DE ARCO ELÉTRICO

clear

K = -0.097; %constante devido ao ambiente enclausurado

Ibf = 37.281; %corrente de falta franca trifásica em kA

V = 0.380; %tensão do sistema em kV

G = 25; %espaçamento entre os condutores em mm

$\log I_a = K + 0.662 \cdot \log_{10}(I_{bf}) + 0.0966 \cdot V + 0.000526 \cdot G + 0.5588 \cdot V \cdot \log_{10}(I_{bf}) - 0.00304 \cdot G \cdot \log_{10}(I_{bf});$

logIa

Ia = 10^(logIa);

Ia %em kA

Ia2 = Ia\*0.85;

Ia2 %em kA

Apêndice A.2 – Algoritmo de cálculo para determinação da energia incidente.

```
%IEEE 2002 - ENERGIA INCIDENTE
```

```
%
```

```
%ENERGIA INCIDENTE EM J/cm^2, para transformar em cal/cm^2 dividir por 4.184
```

```
%
```

```
clear
```

```
K1 = -0.555; %para equipamentos fechados em configuração enclausurada
```

```
K2 = -0.113; %para sistemas aterrados
```

```
G = 25; %espaçamento entre os condutores em mm
```

```
Ia = 16.123; %em kA, CORRENTE DE ARCO TIRADO DO EXECUTÁVEL  
"IEEE_2002_CORRENTE_ARCO"
```

```
logEn = K1 + K2 + 1.081*log10(Ia) + 0.0011*G ;
```

```
logEn
```

```
%En é a ENERGI INCIDENTE NORMALIZADA para o intervalo de tempo e distância  
propostos
```

```
En = 10^(logEn);
```

```
En
```

```
Cf = 1.5; %constante de cálculo, sendo 1,5 para tensões abaixo de 1 kV
```

```
D = 455; %distancia de trabalho em mm
```

```
t = 0.106; %tempo de arco em segundos;
```

```
x = 1.641; %fator para equipamento conforme classe de tensão
```

```
E = 4.184*Cf*En*(t/0.2)*(610^x/D^x);
```

```
E
```

```
Ecal = E/4.184;
```

```
Ecal
```

Apêndice A.3 – Algoritmo de cálculo para determinação da distância segura de aproximação.

```
%IEEE 2002 - ENERGIA INCIDENTE
```

```
%
```

```
%DISTÂNCIA SEGURA DE APROXIMAÇÃO
```

```
clear
```

```
Cf = 1.5;%Cf é uma constante de cálculo, sendo 1,5 para tensões abaixo de 1 kV;
```

```
En = 4.6211;%En é a energia incidente normalizada;
```

```
Eb = 5;%Eb é a energia incidente na distância segura de aproximação, em J/cm2;
```

```
t = 0.106;%t é o tempo de arco, em segundos;
```

```
D = 455;%D é a distância de trabalho, em mm;
```

```
x = 1.641;%x é o expoente de acordo com a Tabela 4.
```

```
%Db é a distância segura de aproximação ao ponto do arco, em mm;
```

```
Db = [4.184*Cf*En*(t/0.2)*(610x / Eb)]^(1/x);
```

```
Db
```



## APÊNDICE B

Algoritmos de cálculo desenvolvidos em Matlab, para aplicação do método IEEE Std 1584:2018.

Apêndice B.1 – Algoritmo de cálculo para determinação da corrente de arco e corrente de arco mínima.

%IEEE 2018 - CORRENTE DE ARCO ELÉTRICO

clear

Ibf = 37.281; %corrente de falta franca trifásica em kA

V = 0.380; %tensão do sistema em kV

G = 25; %espaçamento entre os condutores em mm

k1 = -0.04287; %k's de acordo com tabela, para VCB - 600V;

k2 = 1.035;

k3 = -0.083;

k4 = 0;

k5 = 0;

k6 = -4.783e-09;

k7 = 1.962e-06;

k8 = -0.000229;

k9 = 0.003141;

k10 = 1.092;

%I600 é a estimativa intermediária da corrente de arco para V = 600 V, em kA;

$$I600 = 10^{(k1 + k2 \cdot \log_{10}(Ibf) + k3 \cdot \log_{10}(G))} \cdot (k4 \cdot Ibf^6 + k5 \cdot Ibf^5 + k6 \cdot Ibf^4 + k7 \cdot Ibf^3 + k8 \cdot Ibf^2 + k9 \cdot Ibf + k10);$$

I600

%Iarc é a corrente de arco elétrico!!

$$Iarc = 1/\sqrt{((0.6/V)^2 \cdot [1/(I600^2) - (0.6^2 - V^2)/(0.6^2 \cdot Ibf^2)]]);}$$

Iarc

%% Fator de Correção para determinação da CORRENTE DE ARCO MÍNIMA

```
c1 = 0; %c's de acordo com tabela, para VCB;  
c2 = -0.0000014269;  
c3 = 0.000083137;  
c4 = -0.0019382;  
c5 = 0.022366;  
c6 = -0.12645;  
c7 = 0.30226;
```

```
VarCf = c1*V^6 + c2*V^5 + c3*V^4 + c4*V^3 + c5*V^2 + c6*V + c7;
```

```
VarCf
```

```
Iarc_min = Iarc*(1-0.5*VarCf);
```

```
Iarc_min
```

Apêndice B.2 - Algoritmo de cálculo para determinação da energia incidente.

%IEEE 2018 - ENERGIA INCIDENTE

%

%ENERGIA INCIDENTE EM J/cm<sup>2</sup>, para transformar em cal/cm<sup>2</sup> dividir por 4.184

clear

Comprimento = 800; % Comprimento é valor real do comprimento em mm;

Altura = 1244.6; % Altura é valor real da altura em mm;

V = 0.380; %tensão do sistema em kV

A = 4; % A é uma constante igual a 4 para VCB e 10 para VCBB e HCB;

B = 20; % B é uma constante igual a 20 para VCB, 24 para VCBB e 22 para HCB;

b1 = -0.000302;

b2 = 0.03441;

b3 = 0.4325;

%Parâmetros pré energia incidente

% Comprimento1 é o comprimento equivalente do compartimento;

Comprimento1 = (660.4 + (Comprimento-660.4) \* ((V+A)/B)) \* 25.4<sup>(-1)</sup>;

Comprimento1

% Altura1 é a altura equivalente do compartimento;

%Altura1 = (660.4 + (Altura-660.4) \* ((V+A)/B)) \* 25.4<sup>(-1)</sup>;

Altura1 = 49;

% EES é o valor equivalente de dimensionamento utilizado para determinar o CF;

EES = (Comprimento1 + Altura1)/2;

EES

CF = b1\*(EES<sup>2</sup>) + b2\*EES + b3;

CF

%% ENERGIA INCIDENTE

% ENERGIA INCIDENTE EM J/cm<sup>2</sup>, para transformar em cal/cm<sup>2</sup> dividir por 4.184

t = 106; %tempo de arco em ms

G = 25; %espaçamento entre os condutores em mm

I600 = 28.8570; %é a corrente de arco para 600 V, em kA

Iarc = 22.824; %é a corrente de arco para Voc < 600 V, obtida pela equação (8), em kA

Ibf = 37.281; %corrente de falta franca trifásica em kA

D = 455; %distancia de trabalho em mm

k1 = 0.753364; %k's de acordo com tabela, para VCB - 600V;

k2 = 0.566;

k3 = 1.752636;

k4 = 0;

```
k5 = 0;  
k6 = -4.783E-09;  
k7 = 0.000001962;  
k8 = -0.000229;  
k9 = 0.003141;  
k10 = 1.092;  
k11 = 0;  
k12 = -1.598;  
k13 = 0.957;
```

%C é uma constante de auxílio para a próxima equação

```
C = (k3*I600)/(k4*Ibf^7 + k5*Ibf^6 + k6*Ibf^5 + k7*Ibf^4 + k8*Ibf^3 + k9*Ibf^2 +  
k10*Ibf);
```

```
C
```

%E é a energia incidente

```
E = (12.552/50)*t*10^(k1 + k2*log10(G) +(C)+ k11*log10(Ibf) + k12*log10(D) +  
k13*log10(Iarc) + log10(1/CF));
```

```
E
```

```
Ecal = E/4.184;
```

```
Ecal
```

Apêndice B.3 – Algoritmo de cálculo para determinação da distância segura de aproximação.

```
%IEEE 2018 - ENERGIA INCIDENTE
```

```
%
```

```
%DISTÂNCIA SEGURA DE APROXIMAÇÃO
```

```
%
```

```
%A distância segura de aproximação ao arco elétrico é a distância de
```

```
%uma fonte de arco na qual a energia incidente calculada é 5,0 J/cm2 ou 1,2 cal/cm2.
```

```
%A relevância desse valor consiste no fato de esta ser quantidade de energia incidente  
requerida
```

```
%para produzir uma queimadura de segundo grau curável em uma pele desprotegida (IEEE,  
2018).
```

```
clear
```

```
C = 1.3797;% C é a constante da equação (19);
```

```
t = 106;% t é o tempo de duração do arco, em ms;
```

```
G = 25;% G é a distância entre os condutores, em mm;
```

```
I600 = 28.8570; % é a corrente de arco para 600 V, em kA
```

```
Iarc = 22.824; % é a corrente de arco para Voc < 600 V, obtida pela equação (8), em kA
```

```
Ibf = 37.281; % corrente de falta franca trifásica em kA
```

```
CF = 1.3052;% CF é o fator de correção, obtido pela equação (17);
```

```
k1 = 0.753364; %k's de acordo com tabela, para VCB - 600V;
```

```
k2 = 0.566;
```

```
k3 = 1.752636;
```

```
k4 = 0;
```

```
k5 = 0;
```

```
k6 = -4.783E-09;
```

```
k7 = 0.000001962;
```

```
k8 = -0.000229;
```

```
k9 = 0.003141;
```

```
k10 = 1.092;
```

```
k11 = 0;
```

```
k12 = -1.598;
```

```
k13 = 0.957;
```

```
%AFB600 é a distância limite de aproximação para Voc menor que 600 V, em mm
```

```
AFB600 = 10^((k1 + k2*log10(G) + C + k11*log10(Ibf) + k13*log10(Iarc) + log10(1/CF) -  
log10(20/t)) / (-k12));
```

```
AFB600
```