

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

Gilnei José Gama dos Santos

**METODOLOGIA PARA CLASSIFICAR REDES DE DISTRIBUIÇÃO EM  
CATEGORIAS CONFORME NFPA70E-2018 E CÁLCULOS DE  
ENERGIA INCIDENTE DO GUIA IEEE 1584-2018**

Santa Maria, RS  
2020

**Gilnei José Gama dos Santos**

**METODOLOGIA PARA CLASSIFICAR REDES DE DISTRIBUIÇÃO EM  
CATEGORIAS CONFORME NFPA 70E-2018 E CÁLCULOS DE ENERGIA  
INCIDENTE DO GUIA IEEE 1584-2018**

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

Orientador: Prof. Dr. Tiago Bandeira Marchesan

Santa Maria, RS  
2020

Santos, Gilnei José Gama dos

METODOLOGIA PARA CLASSIFICAR REDES DE DISTRIBUIÇÃO EM CATEGORIAS CONFORME NFPA 70E-2018 E CÁLCULOS DE ENERGIA INCIDENTE DO GUIA IEEE 1584-2018 / Gilnei José Gama dos Santos.- 2020.

84 p.; 30 cm

Orientador: Tiago Bandeira Marchesan  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2020

1. NFPA 70E - 2018 2. IEEE 1584 - 2018 3. Energia Incidente 4. Categoria de EPI I. Marchesan, Tiago Bandeira II. Título.

Gilnei José Gama dos Santos

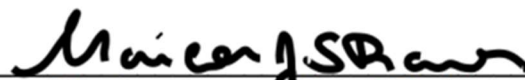
**METODOLOGIA PARA CLASSIFICAR REDES DE DISTRIBUIÇÃO EM  
CATEGORIAS CONFORME NFPA 70E-2018 E CÁLCULOS DE ENERGIA  
INCIDENTE DO GUIA IEEE 1584-2018**

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

Aprovado em 31 de agosto de 2020:

  
\_\_\_\_\_  
**Tiago Bandeira Marchesan / Dr. Eng. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
**Daniel Bernardon (UFSM)**

  
\_\_\_\_\_  
**Maicon Jaderson Silveira Ramos (UFRGS) - Videoconferência**

Santa Maria, RS  
2020

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha querida e sempre estimada esposa, **Mara Jéssica Machado de Souza**, que com muito carinho e apoio, não mediu esforços para que eu atingisse meu objetivo.*

*Ao meu filho **Rafael Souza dos Santos** que possibilitou ampliar a minha vida, em todos os aspectos.*

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço ao meu orientador professor Tiago Bandeira Marchesan por acreditar na relevância deste trabalho sua orientação precisa foi essencial para concretização dos objetivos proposto.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSM minha gratidão por compartilharem suas experiências e conhecimento, em especial ao professor Daniel Bernardon. Todos foram fundamentais e proporcionaram a ampliação de meu crescimento profissional e pessoal.

Ao grupo CPFL pelo apoio técnico e financeiro, através do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento PD-00063-3069/2020 com recursos do programa de P&D da ANEEL.

A minha família e amigos pelo apoio incondicional de sempre, especialmente aos meus pais e mais uma vez a minha querida esposa pelo incentivo e compreensão pelas ausências ao longo desta jornada.

“Fazer o teu melhor na condição que você tem  
enquanto não tem condições melhores  
de fazer melhor ainda.”

Mário Sérgio Cortella

## **RESUMO**

### **METODOLOGIA PARA CLASSIFICAR REDES DE DISTRIBUIÇÃO EM CATEGORIAS CONFORME NFPA 70E-2018 E CÁLCULOS DE ENERGIA INCIDENTE DO GUIA IEEE 1584-2018**

AUTOR: Gilnei José Gama dos Santos  
ORIENTADOR: Tiago Bandeira Marchesan

Este trabalho apresenta uma metodologia para classificar redes aéreas de distribuição de energia elétrica de média tensão em categorias para seleção de Equipamento de Proteção Individual (EPI) nas atividades de linha viva. A categoria de um EPI é parâmetro de quanto o equipamento de proteção para o risco térmico de um arco elétrico suporta de Energia Incidente (EI) em sua superfície sem causar dano permanente em seu usuário. A NFPA 70E, em sua versão mais recente, 2018, é a norma que estabelece dois métodos para a identificação da EI. Um dos métodos apresentados é a utilização de tabelas com um conjunto de parâmetros técnicos pré-estabelecidos aos quais uma determinada EI é atribuída. O segundo método consiste em estimar a EI através de modelamentos matemáticos de uma condição específica em estudo. Para calcular a EI, entre os métodos existentes, será abordada em detalhes a metodologia de cálculos e energia incidentes padronizados no guia IEEE std 1584 de 2018. Tanto o método por tabela quanto o de cálculo de EI não atendem plenamente todas as necessidades das atividades de LV (Linha Viva), seja porque as tabelas em algumas condições apresentam resultados que são muito conservadores superdimensionando desnecessariamente os EPI, seja pela necessidade de calcular a EI a cada novo conjunto de fatores. Com a metodologia proposta será possível estimar a EI com maior precisão em relação às tabelas, e sem a necessidade de estimar a EI a cada condição, proporcionando aos usuários realizarem melhores agrupamentos em seus estudos, incluindo opções como: por zona de proteção, alimentadores, subestações ou até mesmo conjunto de subestações.

Palavras-chave: NFPA 70E – 2018, IEEE 1584 – 2018, Energia Incidente, Categoria de EPI.



## **ABSTRACT**

### **METHODOLOGY FOR CLASSIFYING DISTRIBUTION NETWORKS IN CATEGORIES ACCORDING TO NFPA 70E - 2018 AND INCIDENT ENERGY CALCULATIONS OF THE IEEE 1584 - 2018 GUIDE**

AUTHOR: Gilnei José Gama dos Santos

ADVISOR: Tiago Bandeira Marchesan

This work presents a methodology to classify overhead medium voltage electric power distribution networks into categories for the selection of Personal Protective Equipment (PPE) in live line activities. A category of PPE is a parameter of how much protective equipment for the thermal risk of an electric arc supports Incident Energy (EI) on its surface without causing permanent damage to its user. NFPA 70E, in its most recent version of 2018, is the standard that establishes the two methods for the identification of EI. One of the methods presented is the use of tables with a set of pre-established technical parameters to which a specific EI is assigned. The second method consists estimating the EI through mathematical modeling of a specific condition under study. To calculate the EI, among the existing methods, the methodology of calculations and incident and energy standardized in the IEEE std 1584 guide of 2018 will be covered in detail. Both the table method and the EI calculation method do not fully meet all the needs of the activities of LV, either because the tables in some conditions present results that are very conservative and needlessly oversized the PPE, or because of the need calculate the EI for each new set of factors. With the proposed methodology, it was possible to estimate the EI with greater precision in relation to the tables, and without the need to estimate the EI for each condition, providing the users with better groupings in their studies, including options such as by protection zone, feeders, substations or even a set of substations.

Keywords: NFPA 70E – 2018, IEEE 1584 – 2018, Incident Energy, PPE Category.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Afastamentos mínimos com o condutor no topo do isolador .....	21
Figura 2 – Afastamentos mínimos entre condutores e, chaves ou para-raios.....	22
Figura 3 – Estrutura com eletrodos na vertical .....	23
Figura 4 – Curva característica de HDC de 4, 8 e 12 cal/cm <sup>2</sup> .....	26
Figura 5 – Posicionamento de uma equipe de LV.....	28
Figura 6 – Diferença entre EPI dimensionado para Categoria 2 e categoria 4.....	31
Figura 7 – Modelagem de arco pelo método do ARCPRO.....	40
Figura 8 – Configurações dos eletrodos.....	41
Figura 9 – Configuração de ensaio com eletrodos na horizontal (HOA) .....	45
Figura 10 – Configuração de ensaio com eletrodos na vertical (VOA).....	45
Figura 11 – Configuração eletrodos na vertical (VOA).....	48
Figura 12 – Configuração eletrodos na horizontal (HOA).....	48
Figura 13 – Fluxograma do desenvolvimento do método.....	58
Figura 14 – Categoria de EPI conforme dados de entrada da simulação 1 .....	60
Figura 15 – Categoria de EPI conforme dados de entrada da simulação 2 .....	61
Figura 16 – Curva característica das categorias de EPI conforme simulação 2.....	62
Figura 17 – Curva características das categorias de EPI variando tensão .....	64
Figura 18 – Relação entre corrente de curto-circuito ( $I_{bf}$ ) e corrente de arco ( $I_{arc}$ ) ....	66
Figura 19 – Relações entre corrente de arco ( $I_{arc}$ ), tempo e Energia Incidente.....	67
Figura 20 – Relação entre curva lenta doselos 6 e 40K, e a curva de categoria .....	68
Figura 21 – Ponto de inflexão em uma curva de disjuntor .....	69
Figura 22 – Trechos de atuação dos dispositivos de proteção e a $I_{bf}$ .....	71
Figura 23 – Coordenograma dos relés, religador e elos fusíveis .....	72
Figura 24 – Ajuste na curva do relé de para reduzir a categoria .....	75
Figura 25 – Resultado da aplicação da metodologia.....	76
Figura 26 – Certificação da classificação das categorias .....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Afastamentos entre partes energizadas em pontos fixos .....	21
Tabela 2 – Afastamentos mínimos de chaves e para-raios.....	22
Tabela 3 – Afastamentos entre condutores nus do mesmo circuito .....	22
Tabela 4 – ATPV de EPI em função das categorias de risco .....	30
Tabela 5 – Categorias de EPI para sistemas de corrente alternada (AC).....	32
Tabela 6 – Categorias de risco <i>versus</i> Categoria de EPI.....	33
Tabela 7 – Relações entre a EI, $I_{arc}$ , $V_{oc}$ e tempos de extinção do arco* .....	34
Tabela 8 – Sistemas de vestimenta e vestuário — $V_{oc}$ , $I_{bf}$ e tempo de falha .....	35
Tabela 9 – Métodos de cálculo de EI .....	37
Tabela 10 – Seleção de EPI pelo método de cálculo de EI.....	38
Tabela 11 – Métodos razoáveis para cálculo de EI segundo OSHA1.....	39
Tabela 12 – Dados de entrada e parâmetros do ARCPRO 3.0.....	40
Tabela 13 – Dados de entrada e parâmetros do Guia IEEE 1584 .....	42
Tabela 14 – Coeficientes $k$ para Equação (1) .....	51
Tabela 15 – Coeficientes $k$ para Equação (6) .....	53
Tabela 16 – Coeficientes $K$ para as equações (7), (8) e (9).....	54
Tabela 17 – Coeficientes $K$ para as equações (13), (14) e (15).....	56
Tabela 18 – Dados de entrada da simulação 1 .....	59
Tabela 19 – Relações entre $I_{arc}$ \ $I_{bf}$ e EI para as tensões de 13,8; 11,9 e 6 kV .....	63
Tabela 20 – Distâncias mínimas por categoria para EI resultante $<1,2$ cal/cm <sup>2</sup> .....	65
Tabela 21 – Equipamentos de proteção, correntes e tempo de extinção do arco.....	73
Tabela 22 – EI estimada e classificação de categorias dos trechos .....	74
Tabela 23 – EI estimada e classificação de categorias dos trechos revisada .....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATPV	<i>Arc Thermal Performance Value</i>
EI	Energia Incidente
EPI	Equipamento de Proteção Individual
$I_{arc}$	Corrente de Arco Elétrico
$I_{arc\_min}$	Corrente de Arco Elétrico Mínima ou Reduzida
$I_{bf}$	Corrente de falha franca trifásica
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
NBR	Norma Brasileira
NEC	<i>National Electrical Code</i>
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i>
NR	Norma Regulamentadora
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIT	Secretaria Especial do Trabalho
$V_{oc}$	Tensão Nominal do Sistema

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	MOTIVAÇÃO .....	17
1.2	ESTADO DA ARTE .....	17
1.3	OBJETIVO GERAL .....	18
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICO .....	18
1.5	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO .....	19
1.6	ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS .....	19
<b>2</b>	<b>ASPECTOS DO SEP PARA CÁLCULO DA EI</b> .....	<b>20</b>
2.1	REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....	20
<b>2.1.1</b>	<b>Distâncias entre eletrodos</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Configuração dos eletrodos</b> .....	<b>23</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Níveis de tensão</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Correntes de curto-circuito</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Dispositivos de proteção dos sistemas elétricos</b> .....	<b>25</b>
2.2	ATIVIDADES NAS REDES ENERGIZADAS DE MT .....	27
<b>2.2.1</b>	<b>Normas relacionadas às atividades de Linha Viva</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Seleção de EPI para o risco do arco elétrico</b> .....	<b>29</b>
2.2.2.1	<i>Os riscos do arco elétrico</i> .....	29
2.2.2.2	<i>Critérios para seleção dos EPI</i> .....	30
<b>2.2.3</b>	<b>Método para seleção de EPI por tabelas</b> .....	<b>31</b>
2.2.3.1	<i>Seleção de EPI pela tabela da NFPA 70E</i> .....	32
2.2.3.2	<i>Seleção de EPI pela tabela OSHA</i> .....	33
2.2.3.3	<i>Seleção de EPI pela tabela da NESC C2</i> .....	35
<b>2.2.4</b>	<b>Seleção de EPI pelo método de cálculo de EI</b> .....	<b>36</b>
2.2.4.1	<i>Métodos de cálculo de EI recomendados pela NFPA 70E e OSHA</i> .....	36
2.2.4.2	<i>Método de cálculo de EI utilizando o ARCPRO</i> .....	39
2.2.4.3	<i>Método de cálculo de EI conforme guia IEEE 1584</i> .....	41
2.2.4.4	<i>Comparação dos métodos existentes</i> .....	42
<b>3</b>	<b>CALCULO DE ENERGIA INCIDENTE SEGUNDO GUIA IEEE 1584</b> .....	<b>43</b>
3.1	EVOLUÇÃO DO MODELO DO GUIA IEEE 1584 .....	43
3.2	TESTES EM LABORATÓRIO E SEUS RESULTADOS .....	44
3.3	ABRANGÊNCIA E PARÂMETROS DO MODELO PARA REDE DE MT .....	45
<b>3.3.1</b>	<b>Coleta de dados</b> .....	<b>45</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Tensão (<math>V_{oc}</math>)</b> .....	<b>46</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Frequência (Hz)</b> .....	<b>46</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Corrente de falha franca (kA)</b> .....	<b>46</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Distância entre condutores (mm)</b> .....	<b>47</b>
<b>3.3.6</b>	<b>Configurações dos eletrodos (HOA, VOA)</b> .....	<b>47</b>
<b>3.3.7</b>	<b>Distância de trabalho e o limite do arco elétrico (mm)</b> .....	<b>48</b>
<b>3.3.8</b>	<b>Tempo de extinção do arco (ms)</b> .....	<b>49</b>
3.4	APLICAÇÃO DO MODELAMENTO MATEMÁTICO .....	50
<b>3.4.1</b>	<b>Determinação da corrente de arco</b> .....	<b>50</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Determinação da corrente de arco reduzida</b> .....	<b>52</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Determinação da EI</b> .....	<b>53</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Identificação do limite do arco elétrico (AFB)</b> .....	<b>55</b>

3.5	APLICAÇÃO DOS RESULTADOS DA EI ESTIMADA.....	57
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>58</b>
4.1	DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO.....	58
<b>4.1.1</b>	<b>Desenvolvimento de simulador de cálculo de EI.....</b>	<b>59</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Análise de sensibilidade dos parâmetros de modelagem .....</b>	<b>62</b>
4.1.2.1	<i>Variação do nível tensão .....</i>	62
4.1.2.2	<i>Variação da distância entre eletrodos.....</i>	63
4.1.2.3	<i>Variação na configuração dos eletrodos.....</i>	64
4.1.2.4	<i>Variação da distância de trabalho.....</i>	65
4.1.2.5	<i>Variação da corrente de arco e de arco reduzida .....</i>	65
4.2	METODOLOGIA PROPOSTA .....	66
<b>4.2.1</b>	<b>Identificação dos pontos para cálculo de EI .....</b>	<b>66</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Cálculo de EI e classificação em categoria.....</b>	<b>70</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Determinação da categoria por trecho .....</b>	<b>70</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Uniformização dos resultados.....</b>	<b>70</b>
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>71</b>
5.1	APLICAÇÃO DO MÉTODO .....	71
5.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>80</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS.....	82
6.2	TRABALHOS PUBLICADOS.....	82
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais, os órgãos reguladores exigem das distribuidoras de energia elétrica maior confiabilidade no fornecimento de energia elétrica, gerando desafios em relação ao desenvolvimento de métodos de manutenção para que não ocorram interrupções no fornecimento de energia elétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, 2018). As técnicas de trabalho, em rede energizada ao contato, (Linha Viva) utilizadas na manutenção das redes aéreas de Média Tensão (MT) dispensam desligamentos, contribuindo para atender aos níveis de confiabilidade impostos. Mesmo assim, as intervenções nas redes energizadas possuem riscos intrínsecos à atividade em eletricidade como, por exemplo, choque e queimadura por arco elétrico (Brasil, 2019).

Ainda que as técnicas de trabalho sejam desenvolvidas com o objetivo de impedir a formação de um arco, no transcorrer das atividades existem condições que fogem ao controle, entre elas estão: falha humana, falha em equipamento ou ação de um agente externo. Essas condições isoladas ou somadas, podem causar a geração de um arco elétrico indesejado. Nesse contexto, visando mitigar o dano à saúde, é fundamental que o trabalhador esteja utilizando Equipamento de Proteção Individual (EPI) para a temperatura gerada por um arco elétrico no local de trabalho (SHORT, 2011).

No Brasil, a Norma Regulamentadora nº 10 (NR 10) – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade (Brasil, 2019), estabelece os requisitos e condições mínimas a serem seguidos para garantir a segurança e saúde dos trabalhadores que interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade. Nesta norma, não há critérios específicos para mitigar o risco de queimaduras causadas por um arco elétrico. Sua abordagem é mais abrangente, orientando que as vestimentas devem contemplar a prevenção contra a inflamabilidade e riscos adicionais, e se houver ausência ou omissão nas normas nacionais, deve-se buscar nas normas internacionais cabíveis. Na NR 6 Equipamento de Proteção Individual – EPI (Brasil, 2018) é prevista a vestimenta contra o risco térmico, porém não traz nenhum tipo de classificação ou método de seleção, entretanto, no Manual de Orientação para Especificação das Vestimentas de Proteção Contra os Efeitos Térmicos do Arco Elétrico e do Fogo Repentino (BRASIL, 201-?) estão referenciadas

normas internacionais a serem seguidas, entre elas a *National Fire Protection Association* (NFPA) 70 E de 2012, para padronização de EPI em *Arc Thermal Performance Value* (ATPV).

A NFPA 70E (2018) é um padrão norte-americano para segurança elétrica no local de trabalho que foi elaborado em consenso e aprovado pelo *American National Standards Institute* (ASTM). Nele são apresentados dois métodos para selecionar o EPI adequado ao risco de um arco elétrico. Um dos métodos apresentados é uma tabela, que apresenta categorias de EPI para um conjunto de condições técnicas pré-estabelecidas presentes no local de trabalho. As quatro categorias de EPI, previstas na norma, são parâmetros de quanto um EPI deve suportar de EI em sua superfície sem causar dano permanente ao trabalhador. A metodologia para seleção de EPI, por critérios pré-estabelecidos e elaborados para condições específicas, ou não atendem na totalidade as condições previstas para atividades de LV ou seus agrupamentos resultam em superdimensionamento de EPI, inviabilizando as atividades. O segundo método prevê a aplicação de modelamento matemático para estimar a EI em uma condição específica para, então, selecionar o EPI adequadamente. Apesar disso, a EI de um arco elétrico não é facilmente estimada.

Existem várias metodologias que se propõem a calcular a EI em um determinado cenário (MARROQUIN, 2020). O *Guide to Performing Arc-Flash Hazard Calculations* (guia IEEE 1584) de 2018, apresenta uma dessas metodologias de cálculo. Nesse guia, não somente, é apresentado o método de cálculos, mas também toda a sua fundamentação. Segundo o guia IEEE, para se estimar a EI são necessários dados do sistema elétrico no ponto, como: nível de tensão, corrente de curto-circuito, tempo de atuação da proteção, posição e distância entre os eletrodos e a distância do ponto de trabalho em relação a fonte do arco. Como esses dados se alteram ao longo das redes de distribuição de MT, não é possível afirmar que calculando um ponto específico da rede, o resultado da EI é o mesmo para todos os pontos existentes em uma rede, seja na subestação, alimentador ou zona de equipamentos de proteção. Também não é viável calcular a EI em cada ponto no qual haverá intervenção de Linha Viva, e a partir do resultado selecionar os EPI conforme a categoria.



## 1.1 MOTIVAÇÃO

Quanto maior a categoria de EPI, em função de suas características, maior será o desconforto do usuário, limitações de movimento e visibilidade, e conforme o caso, inviabilizará a execução das atividades de LV. Dessa forma, mesmo que o superdimensionamento não represente um problema sob o aspecto de seleção de EPI para o risco do arco elétrico, esta prática traz uma série de outras implicações desnecessárias que podem ser evitadas. Por outro lado, um EPI subdimensionado pode implicar em aumento do dano por queimadura em uma eventual exposição a um arco elétrico. Dentro desse contexto, como se certificar de que os EPIs utilizados no local de trabalho pelas equipes de LV em atividades na rede de MT estão adequados para a EI estimada em uma eventual formação de um arco elétrico?

## 1.2 ESTADO DA ARTE

Esta pesquisa sobre o estado da arte, busca identificar as linhas de pesquisa para estimar a EI e certificar da correta seleção de EPI para o risco do arco elétrico presente em atividades por equipes de LV na rede aéreas de MT. Segundo a NFPA 70E (2018) dois métodos são utilizados para a seleção de EPI. Tabelas, elaboradas por um conjunto de critérios pré-estabelecidos, que vinculam, a uma determinada categoria EPI e a realização da estimativa de EI, através de modelamentos matemáticos ou programas computacionais.

O método por tabelas é apresentado na NFPA 70E (2018), também são apresentadas tabelas na *Occupational Safety and Health Administration – OSHA (2020)* e *National Electrical Safety Code - NESC C2 (IEEE, 2012)*. Para estimar a EI através de modelamento matemático a NFPA 70E (2018) cita o guia IEEE 1584 de 2012, uma vez que a OSHA (2020) além de referenciar o guia IEEE 1584 de 2012 também cita o programa computacional ARCPRO (Kinectrics, 2017).

### 1.3 OBJETIVO GERAL

Esta dissertação tem por objetivo propor uma metodologia para classificar as redes de MT em categorias, permitindo certificar da correta seleção de EPI para o risco de arco elétrico em atividade de LV, seja ao longo de um trecho de rede de MT entre dispositivos de proteção, de um alimentador, ou conjunto de alimentadores.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICO

Apresentar os parâmetros, aplicando o modelamento matemático previsto no guia IEEE 1584 (2018) para estimar a EI em redes de MT para atividade de LV. Analisando a sensibilidade dos parâmetros de cálculo da EI segundo o guia IEEE 1584 (2018) para cenários elaborados com características das redes de MT nacional. Através da EI resultante de uma vasta variedade de cenários calculados, validando as seguintes suposições:

- a) Não é razoável assumir que a EI estimada no ponto de origem da rede é refletida em toda a sua extensão, uma vez que a os resultados de EI ao longo da rede para valores maiores ou menores.
- b) A menor unidade de rede, para estimar a EI e classificá-la em categorias, são os trechos supervisionados por dispositivos de proteção.
- c) Para garantir uma modelagem precisa, mesmo para um pequeno trecho sob supervisão de um dispositivo de proteção, é necessário estimar a EI no mínimo: no início, no fim e em um eventual ponto de inflexão da curva do dispositivo que possa surgir.

Proporcionando a análise inversa das metodologias existentes. Ao invés de selecionar o EPI a partir do resultado do calcular a EI, identificar quais os trechos das redes possuem EI resultante igual ou menor que a padronização dos EPI e restringir os demais trechos. Apresentando os subsídios necessários para que estudos de proteção possam considerar a EI resultante como um dos parâmetros para ajustes de proteção.

## 1.5 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Para desenvolver a metodologia que se proponha a responder a questão de “como certificar de que os EPIs utilizados no local de trabalho pelas equipes de LV em atividades na rede de MT estão adequados para a EI estimada em uma eventual formação de um arco elétrico”, o trabalho se limitou a pesquisa bibliográfica aplicada (com ênfase em normas nacionais e internacionais, e artigos científicos depositados na plataforma do IEEE) e o desenvolvimento de um simulador no Microsoft Excel (2016) para estimativa EI de cenários nacionais segundo critérios e modelamento matemático do guia IEEE 1584 (2018).

## 1.6 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

- a) Capítulo 2: **Aspectos do SEP para cálculo da EI** – Apresenta as características construtivas e elétricas, atividades de LV, a legislação vigente e as análises de risco e medidas de controle do risco do arco elétrico;
- b) Capítulo 3: **Cálculo de EI segundo guia IEEE 1584** – Expõe a forma de calcular a EI para que o usuário possa replicar o método desenvolvido;
- c) Capítulo 4: **Metodologia** – Mostra a fundamentação da metodologia e como aplicá-la;
- d) Capítulo 5: **Estudo de caso** – Demonstra a aplicação prática da metodologia a fim de testar e validar o método; e
- e) Capítulo 6: **Conclusões** – Discorre sobre as conclusões, as principais contribuições deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## **2 ASPECTOS DO SEP PARA CÁLCULO DA EI**

### **2.1 REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Em vários pontos do guia IEEE 1584 (2018) é enfatizada a necessidade da coleta de dados de forma correta e precisa para o cálculo de EI. As características técnicas da rede são os dados de entrada para os cálculos de EI, e, por consequência, o dimensionamento adequando dos EPI. Neste tópico serão abordadas as configurações e distâncias dos eletrodos (pontos energizados) nas redes de distribuição, como identificar os níveis de curto circuito nos pontos de interesse, e os tipos e características dos dispositivos de proteção para definir o tempo de extinção do arco.

#### **2.1.1 Distâncias entre eletrodos**

As Normas brasileiras, NBR 15688 (Associação Brasileira de Normas Técnica - ABNT, 2012) e NBR 15992 (ABNT, 2011b), padronizam as estruturas para redes de distribuição aérea com condutores nus e condutores cobertos fixados em espaçadores, respectivamente. Entre as características padronizadas nessas normas, estão os afastamentos mínimos nas montagens das estruturas para rede de Média Tensão (MT).

De acordo com NBR 15992 (ABNT, 2011b), os cabos cobertos devem ser considerados condutores nus no que se refere a todos os afastamentos mínimos padronizados para redes primárias nuas. Nesse sentido, seguem, abaixo, 3 tabelas apresentadas na NBR 15688 (ABNT, 2012) com afastamentos mínimos entre eletrodos em condições específicas de montagem. A Tabela 1 apresenta os afastamentos pontos fixos.

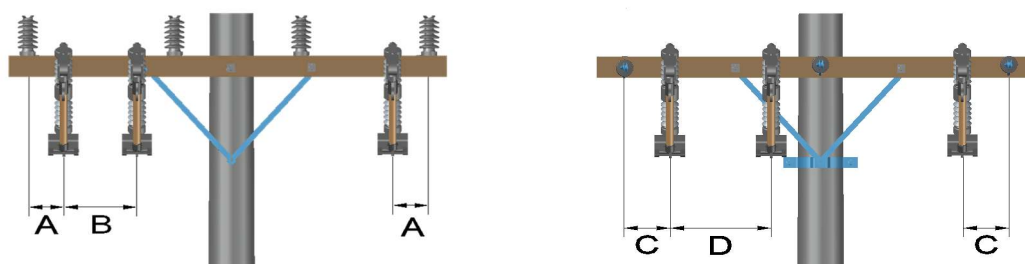


Tabela 2 – Afastamentos mínimos de chaves e para-raios

Tensão $U$ kV	Afastamento mínimo mm			
	A	B	C	D
15	150	300	200	450
24,2	200	400	250	550
36,2	250	400	250	550

Fonte: (ABNT, 2012, p. 30).

Figura 2 – Afastamentos mínimos entre condutores e, chaves ou para-raios



Fonte: Autor.

A Tabela 3 mostra os afastamentos mínimos entre condutores do mesmo circuito para condutores nus. Esse conjunto de afastamentos se aplica pela presença de vãos (ABNT, 1992) nas montagens das redes aéreas. Quanto maior o vão, maior a necessidade de afastar os condutores para evitar toques acidentais entre fases no meio do vão. Por esse motivo, que os afastamentos não se aplicam em condutores cobertos com espaçador (ABNT, 2011b), porque, no máximo a cada 12 metros, há um ponto de fixação dos condutores, seja nos espaçadores ou nas estruturas.

Tabela 3 – Afastamentos entre condutores nus do mesmo circuito

Tensão $U$ kV	Afastamento mínimo mm
$U \leq 1$	200
$1 < U \leq 15$	500
$15 < U \leq 36,2$	600

Fonte: (ABNT, 2012, p. 8).

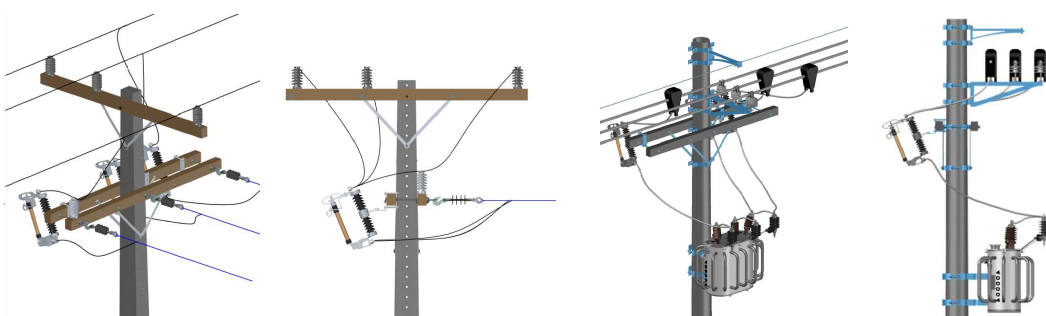
### 2.1.2 Configuração dos eletrodos

Outra característica relevante para calcular a EI apresentada no guia IEEE 1584 (2018) é a configuração dos eletrodos. Há uma diferença significativa no resultado do cálculo da EI se forem considerados os eletrodos posicionados na horizontal ou na vertical. Para identificar essas características nas redes de distribuição em MT, serão apresentadas as montagens das redes com eletrodos na vertical e na horizontal.

Eletrodos na horizontal são praticamente a totalidades das linhas aéreas de distribuição. Trata-se de condutores montados em estruturas com arranjos horizontais ou triangulares (ABNT, 1992). As estruturas que não possuem 2º nível compõem essa característica. A exemplo da estrutura apresentada na Figura 1, os equipamentos no mesmo nível da linha de distribuição em que os condutores e as conexões dos equipamentos estejam direcionados horizontalmente.

Os eletrodos dispostos na vertical estão presentes em estruturas com equipamentos, como para-raios, religadores, transformadores e chaves fusíveis; e estruturas com 2º nível como em derivações de ramais de alimentadores ou de clientes. Os terminais da chave fusível ilustrados na Figura 3 representam um exemplo de eletrodos na vertical.

Figura 3 – Estrutura com eletrodos na vertical



Fonte: Autor.

Observa-se que, mesmo a estrutura possuindo eletrodos na vertical, em vários pontos, também há eletrodos na horizontal, caracterizando assim, de forma geral, as redes de distribuição de MT como eletrodos na horizontal para fins de cálculo de EI.

### 2.1.3 Níveis de tensão

Os níveis de tensão previstos na NBR 14039 (ABNT, 2005) como média tensão (MT) e nas NBR 15688 e NBR 15992 (ABNT, 2012, 2011b) como tensão primária possuem intervalo de 1 a 36,2 kV. Esses níveis de tensão são dados de entrada nos cálculos de EI para redes de MT. No guia IEEE 1584 (2018) é definido que se deve utilizar a tensão nominal do sistema trifásico ou tensão de utilização, não sendo necessário considerar nos cálculos as tolerâncias admitidas no nível de tensão no Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, 2018) referente a qualidade do produto ou NBR 6939 (ABNT, 2018) para tolerância de sobretensão na coordenação de isolamento. Ainda que a fundamentação do cálculo esteja baseada em sistemas trifásicos, o guia prevê a aplicação do cálculo, também em sistemas monofásicos (fase-fase, fase-terra), porém, ressaltando que se espera um resultado de EI conservador (maior).

### 2.1.4 Correntes de curto-circuito

Outra informação necessária, para os cálculos de EI, é o valor de correntes de curto-circuito trifásicas em falha de impedância zero. Essas informações são necessárias para calcular a corrente de arco elétrico e identificar o tempo de extinção do arco através das curvas de tempo *versus* corrente do dispositivo de proteção da zona em estudo.

Existem várias metodologias para calcular a corrente de curto-circuito. Em (IEEE, 2018) não é mencionado qual padrão que deve ser utilizado para calcular a corrente de curto-circuito, requer apenas que o tipo de curto-circuito seja trifásico. Também é previsto que se há estudos de curto-circuito, esses podem ser utilizados, desde que se certifique que os mesmos estejam atualizados em relação a realidade das instalações.

Em (MAJD *et al.* 2019) é apresentada uma análise comparativa entre o padrão ANSI e o IEC para o cálculo de curto-circuito e definição da EI. O autor conclui que ambas as metodologias são válidas. A metodologia ANSI, por ser mais abrangente, resulta em dados mais conservadores e cita que no próprio padrão, ANSI C37.010, é



prevista a utilização de outros métodos de acordo com a precisão necessária. A metodologia IEC, por ser mais detalhada, tem uma precisão maior em seus resultados. Assim sendo, fica a cargo do responsável pelo estudo, a partir dos seus objetivos, escolher qual a metodologia utilizar.

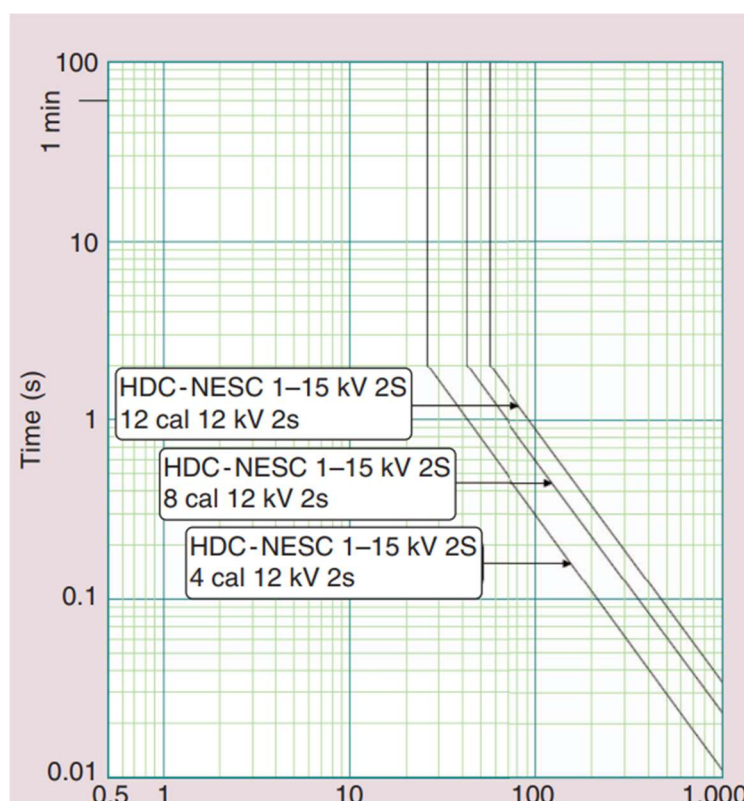
### **2.1.5 Dispositivos de proteção dos sistemas elétricos**

Os dispositivos de proteção são equipamentos dispostos nas redes de MT com a função de realizar um seccionamento na rede, impedindo a continuidade de uma corrente, como um curto-circuito causado por uma falha. O objetivo desses seccionamentos é evitar danos aos ativos das redes de distribuição bem como ao patrimônio público e privado, minimizando os impactos da descontinuidade do fornecimento, segregando apenas a zona para a qual o dispositivo está ajustado para atuar, de forma geral, protegendo as pessoas e animais, e em particular os trabalhadores das redes de distribuição. Segundo MAMEDE FILHO e MAMEDE (2013) existem dois tipos construtivos de dispositivos para proteção contra curto-circuito. Os fusíveis que operam através da fusão do elemento fusível e os equipamentos que operam com a aberturas dos contatos. Os fusíveis são construídos para operar em condições de temperatura, causadas pela circulação das correntes. Os critérios de operação são apresentados através da relação de tempo *versus* corrente. Por seu princípio ser de fusão, o efeito de sua atuação é permanente. Os fusíveis padronizados no Brasil e suas curvas características de tempo *versus* corrente estão padronizados na NBR 7282 (ABNT, 2011a). O princípio de funcionamento dos equipamentos que atuam por abertura de contato como disjuntores, seccionadores e religadores, permitem grande flexibilidade para reconexão, por exemplo: em religadores, é possível reestabelecer o sistema de forma remota ou automática, também, ajustes nas curvas características de tempo *versus* corrente, permitem inclusive proteger os elos fusíveis de falhas transitórias. Cada dispositivo de proteção tem suas curvas características de tempo *versus* corrente, e esses dados têm fundamental importâncias nos cálculos de EI. De acordo com SALEHI (2016) uma das formas para determinar o tempo de extinção do arco, é calcular a corrente de arco e identificar o tempo relacionado indicado nas curvas do dispositivo de proteção responsável por atuar na zona do arco. Deve-se considerar

sempre o tempo total para extinção da corrente. As curvas características de tempo *versus* corrente estão disponíveis nos manuais dos equipamentos.

Estudos recentes, citados por SALEHI (2016), defendem a integração das curvas características dos dispositivos de proteção com as chamadas Curvas de Mesma Energia (EEL - Equal Energy Lines). BROOKS (2014) traçou essas curvas conforme as categorias de EPI previstas na NFPA 70E (2018), e definiu estas curvas como Curva de Dano Humano (HDC - Human Damage Curve). A Figura 4 ilustra as curvas de HDC para as categorias de EPI 1, 2 e 3, de acordo com as configurações apresentadas nas tabelas elaboradas por BROOKS (2014), para tensão de 12,4kV, distância de trabalho de 15 polegadas e tempo de extinção ou afastamento do arco de 2 segundos.

Figura 4 – Curva característica de HDC de 4, 8 e 12 cal/cm<sup>2</sup>



Fonte: BROOKS (2014).

As curvas características dos dispositivos de proteção não podem ser comparadas diretamente com as HDCs em função das primeiras tratarem das correntes de falha do sistema e a segunda das correntes de arco. Segundo SALEHI (2016), como as correntes de arco são em torno de 85% da corrente de falta, e por

consequência um tempo maior para atuação do dispositivo de proteção, essa diferença pode resultar em uma EI maior e, eventualmente, pode ser necessária uma categoria de EPI maior.

## 2.2 ATIVIDADES NAS REDES ENERGIZADAS DE MT

### 2.2.1 Normas relacionadas às atividades de Linha Viva

A Norma Regulamentadora nº10 (Brasil, 2019) é a norma brasileira que regulamenta os serviços em eletricidade. Nela está descrita a priorização das medidas de controle de risco que se deve seguir nos serviços em eletricidade. A norma define a ordem de prioridade das medidas de controle, sendo: desenergização, emprego de tensão de segurança, isolamento das partes vivas, obstáculos, barreiras, sinalização, sistema de seccionamento automático de alimentação e bloqueio do religamento automático. Quando essas medidas de controle não forem viáveis ou insuficientes, deve-se adotar o emprego de medidas de controle individual como a utilização de EPI.

Na impossibilidade de emprego da desenergização ou tensão de segurança, as atividades passam a ser de intervenção na rede energizada ou em sua proximidade, exigindo a adoção de técnicas e instrumentos apropriados para o trabalho. Definido pela NBR 5460 (ABNT, 1992) como “trabalho ao vivo”, há três métodos de trabalho com rede energizada:

- a) Trabalho a distância de segurança: o trabalhador permanece a uma distância mínima especificada em relação às partes sob tensão e executa seu trabalho, utilizando ferramentas intercambiáveis, fixadas em uma extremidade de bastões adequados. Essa técnica, normalmente, é utilizada em operações de chaves e equipamentos;
- b) Trabalho com as mãos nuas: o trabalhador executa seu trabalho com as mãos nuas em contato (mecânico) com as partes sob tensão, após ter sido elevado ao potencial do equipamento; e
- c) Trabalho com luvas isolantes: o trabalhador, com as mãos protegidas por luvas isolantes e, eventualmente, com os braços cobertos por mangas isolantes, executa seu trabalho em contato mecânico direto com as partes

sob tensão. Essa técnica é apresentada, neste trabalho, como atividade de Linha Viva (LV) nas redes de MT.

As atividades de linha viva são utilizadas em manutenções preventivas e corretivas das redes aéreas com o objetivo de evitar ou minimizar a descontinuidade do fornecimento. As atividades realizadas, a partir dessa técnica de trabalho, compreendem troca de componentes como: isoladores, chaves, cruzetas, ferragens; refazer conexões e interligações. Em alguns casos desconectar e reconectar trechos da rede para mitigar o impacto no fornecimento. Para execução das atividades de LV, são fornecidos ao trabalhador ferramentas, equipamentos de proteção coletiva e individual adequados a esse tipo de intervenção na rede. Para chegar até a rede, o trabalhador é suspenso através uma cesta aérea isolada, seguindo os requisitos do Anexo XII da NR12 (2019), para isolar os potenciais que não sofrerão intervenção são adotadas coberturas isolantes rígidas e flexíveis como proteção para o risco de um evento não previsto. Segundo Manual de Orientação para Especificação das Vestimentas de Proteção Contra os Efeitos Térmicos do Arco Elétrico e do Fogo Repentino (BRASIL, 201-?) devem ser utilizadas luvas e mangas isolantes, capacete, óculos, balaclava, calçados e a vestimenta. A Figura 5 ilustra o posicionamento de uma equipe de LV, devidamente, equipada para execução de uma atividade em uma estrutura de rede de MT.

Figura 5 – Posicionamento de uma equipe de LV



Fonte: Banco de imagens da internet.

## 2.2.2 Seleção de EPI para o risco do arco elétrico

Na NR 10 (Brasil, 2019), não há uma citação direta sobre a necessidade de adoção de medidas de controle de risco térmico em função de um arco elétrico, tão pouco há nas normas nacionais a definição de como dimensionar corretamente os EPI para o risco de inflamabilidade mencionado pela NR. A única menção é a orientação da necessidade de adoção de medidas preventivas de controle para riscos adicionais, e se houver ausência ou omissão nas normas nacionais, deve-se buscar em normas internacionais.

A NR 10 (Brasil, 2019) está em revisão, sua versão em consulta pública propõe suprir essa necessidade pelo seguinte texto: “Para a especificação das vestimentas de trabalho com proteção para o risco dos efeitos térmicos do arco elétrico e do fogo repentino deve ser seguido o Anexo IV - Especificação das Vestimentas de Proteção desta NR”. O anexo citado não foi disponibilizado ao público até a data da publicação desta dissertação. Durante o tempo em que essa revisão da NR não entrar em vigência, a norma internacional de referência para dimensionar vestimenta é a NFPA 70E (2018). Segundo (NEITZEL, NFPA, 2016, 2018) os trabalhadores devem utilizar EPI com classificação de arco sempre que houver uma possível exposição a um arco elétrico com energia incidente superior a  $1,2 \text{ cal/cm}^2$  ou  $5 \text{ J/cm}^2$ .

### 2.2.2.1 Os riscos do arco elétrico

Segundo o guia IEEE 1584, (2018), a maioria dos arcos elétricos ocorre quando um trabalhador cria acidentalmente um caminho elétrico entre os terminais ou barramentos energizados. Quando o arco elétrico é iniciado, a corrente gerada cria um campo magnético que afasta a causa do contato elétrico, porém a corrente continua e forma arcos quentes que consomem condutores, ionizando gases e gerando uma nuvem de plasma. Há uma luz muito brilhante e o barulho de uma explosão. Os gases com gotículas de metal líquido e poeira de óxido de metal, rapidamente, expandem-se com uma energia térmica muito elevada. O arco elétrico pode continuar até que um dispositivo de proteção contra sobrecorrente a montante atue ou o arco se autoextinguir.

A energia térmica gerada por um arco elétrico projetada no local de trabalho é chamada de energia incidente. Essa quantidade de energia térmica impressa em uma unidade de área é expressa em calorias por centímetro quadrado ( $\text{cal/cm}^2$ ) ou Joule por centímetro quadrado ( $\text{J/cm}^2$ ). Conforme (ABNT, NFPA, 2017, 2018), o valor limiar da EI para queimadura de segundo grau na pele humana é assumidamente igual a  $1,2\text{cal/cm}^2$  ou  $5\text{ J/cm}^2$ . Supõe-se que uma queimadura de segundo grau seja curável. Valores de EI superiores a esses, deve-se utilizar EPI para o risco de arco elétrico.

#### 2.2.2.2 Critérios para seleção dos EPI

Existem vários tipos de EPI com níveis distintos de recursos de proteção térmica, denominados Valores de Exposição ao Desempenho Térmico do Arco (ATPV - *Arc Thermal Performance Value*) ou a Energia do Limite de Abertura ( $E_{BT50}$  - *Energy of Breakopen Threshold*) (NFPA; ABNT, 2018, 2017). Eles são classificados com a unidade da EI  $\text{cal/cm}^2$ . O valor de ATPV ou o  $E_{BT50}$  representa o valor máximo de EI sobre o EPI que resulta em uma energia no lado protegido que poderia, com 50% de probabilidade com base na curva de Stoll, causar queimaduras de segundo grau (ABNT, 2017). Para identificar os EPI para o trabalho em rede energizada, o nível correto de capacidade de proteção térmica deve ser determinado pelos correspondentes valores de EI. No “Manual de Orientação para Especificação das Vestimentas de Proteção Contra os Efeitos Térmicos do Arco Elétrico e do Fogo Repentino” emitido pela Secretaria Especial do Trabalho - SIT (Brasil, 201-?) é apresentada uma tabela adaptada da versão de 2012 da NFPA 70E (2018), como referência para identificar o ATPV conforme EI estimada. Essa referência é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – ATPV de EPI em função das categorias de risco

Risco	Energia Incidente ( $\text{cal/cm}^2$ )	Categoria de Risco	ATPV Mínimo Requerido para EPI ( $\text{cal/cm}^2$ )
Mínimo	Até 1,2	0	Não aplicável
Leve	1,2 a 4	1	4
Moderado	4,1 a 8	2	8
Elevado	8,1 a 25	3	25
Elevadíssimo	25,1 a 40	4	40

Fonte: adaptado (Brasil, 2020a, p.4).

Nas atividades de LV, o correto dimensionamento de EPI para o risco de arco elétrico, evita o desconforto para o usuário, limitações de movimento e visibilidade, inviabilidade da execução de algumas atividades e custos desnecessários. A Figura 6 ilustra a diferença de EPI entre as categorias 2 e 4. Três diferenças significativas se destacam, são elas: conforto térmico, mobilidade e visibilidade.

Figura 6 – Diferença entre EPI dimensionado para Categoria 2 e categoria 4



Fonte: Banco de imagens internet.

Nas normas brasileiras não há uma padronização para identificar a EI presente em um arco elétrico, contudo na NR 10 (Brasil, 2019) há uma orientação quanto a seguir normas internacionais pertinentes, e ainda nas normas brasileiras (ABNT; Brasil, 2011b; 2018, 2017) citam as normas internacionais como referência. Serão abordadas neste trabalho as orientações previstas em (IEEE, 2012, 2013, 2018).

### 2.2.3 Método para seleção de EPI por tabelas

Um dos métodos para seleção de EPI identificados nas normas internacionais (NFPA, OSHA, IEEE, 2018, 2020, 2012) é a utilização de tabelas com uma relação entre um grupo de características técnicas específicas e, a EI resultante ou a categoria de EPI. Exemplo: Partida de motores NEMA E2, 2,3 kV a 7,2 kV; corrente de curto-circuito máxima de 35 kA; tempo de extinção do arco até 0,24 segundos e distância de trabalho mínima de 910 mm a categoria de EPI mínima é 4 ou seja ATPV mínimo de 40 cal/cm<sup>2</sup>.

### 2.2.3.1 Seleção de EPI pela tabela da NFPA 70E

De acordo com o que foi apresentado na Tabela 4, a NFPA 70E de 2012 definia 5 categorias de risco e na revisão de 2015 também. Na versão de 2018, as categorias de risco foram substituídas por categorias de EPI. Com essa alteração a categoria de risco 0 foi extinta. Para as demais categorias de risco há uma equivalência direta com a categoria de EPI ilustrada na Tabela 6.

Com a mudança das categorias de risco para categoria de EPI, a norma apresentou dois métodos para seleção de EPI. O método por análise de EI e o método de categoria do EPI para um grupo específico de características técnicas descritas em tabelas. Para aplicação do método por tabelas para atividades de LV, é necessário consultar duas tabelas da referida norma. A Tabela 5 relaciona o grupo específico de características técnicas com as categorias de EPI descritos na Tabela 6. As variações dos níveis de curto-circuito, tempo de extinção do arco e diferença da distância de trabalho são impeditivos para utilizar o método de categoria de EPI na seleção de EPI para atividades de rede de MT.

Tabela 5 – Categorias de EPI para sistemas de corrente alternada (AC)

(continua)		
Equipamento	Categoria de EPI	Limite do arco elétrico
<b>Painéis ou outros equipamentos, classificados 240 V ou abaixo</b>		
Parâmetros: máximo de 25 kA de ICC; máximo de 0,03 s (2 ciclos) de tempo de extinção do arco; distância mínima de trabalho 455 mm (18 in.)	1	485 mm (19 in.)
<b>Painéis ou outros equipamentos, classificação entre 240 V e 600 V</b>		
Parâmetros: máximo de 25 kA de ICC; máximo de 0,03 s (2 ciclos) de tempo de extinção do arco; distância mínima de trabalho 455 mm (18 in.)	2	900 mm (3 pés)
<b>Centros de controle de motor de classe de 600 V (MCCs)</b>		
Parâmetros: máximo de 65 kA de ICC; máximo de 0,03 s (2 ciclos) de tempo de Extinção do arco; distância mínima de trabalho 455 mm (18 in.)	2	1,5 m (5 pés)
<b>centros de controle de motor de classe de 600 V (MCCs)</b>		
Parâmetros: máximo de 42 kA de ICC; máximo de 0,33 s (20 ciclos) de tempo de extinção do arco; distância mínima de trabalho 455 mm (18 in.)	4	4,3 m (14 HUF)
<b>Comutador de classe 600 V (com disjuntores de potência ou chaves fusíveis) e quadro de distribuição de classe 600 V.</b>		
Parâmetros: máximo de 35 kA corrente de falha disponível; máximo de até 0,5 s (30 ciclos) de tempo de compensação de falha; distância mínima de trabalho 455 mm (18 in.)	4	6 m (20 HUF)



Tabela 5 – Categorias de EPI para sistemas de corrente alternada (AC)

	(conclusão)	
<b>Outros equipamentos de classe 600 V (277 V a 600 V, nominal).</b>		
Parâmetros: máximo de 65 kA de ICC; máximo de 0,3 s (2 ciclos) de tempo de extinção do arco; distância mínima de trabalho 455 mm (18 in.)	2	1,5 m (5 pés)
<b>Partida de motores NEMA E2, 2,3 kV a 7,2 kV.</b>		
Parâmetros: máximo de 35 kA ICC; máximo de até 0,24 s (15 ciclos) de tempo extinção do arco; distância mínima de trabalho 910 mm (36 in.)	4	12 m (40 pés)
<b>Comutador com revestimento metálico, 1 kV a 15 kV.</b>		
Parâmetros: máximo de 35 kA de ICC; máximo de até 0,24 s (15 ciclos) de tempo extinção do arco; distância mínima de trabalho 910 mm (36 in.)	4	12 m (40 pés)
<b>Comutador resistente a arco, de 1 kV a 15 kV (para tempos de extinção de menos de 0,5 s com uma corrente de falta que não exceda a classificação de resistência ao arco do equipamento) e comutador com interruptor blindado, fundido ou não-fundido de construção resistente a arco, de 1 kV a 15 kV.</b>	N/A	N/A
Parâmetros: máximo de 35 kA de ICC; tempo de extinção do arco máximo de até 0,24 s (15 ciclos); distância de trabalho mínima de 910 mm.	4	12 m (40 ft)
<b>Outros equipamentos de 1 kV a 15 kV</b>		
Parâmetros: máximo de 35 kA de ICC; máximo de até 0,24 s (15 ciclos) de tempo de extinção do arco; distância mínima de trabalho 910 mm (36 in.)	4	12 m (40 pés)

Fonte: adaptado de (NFPA, 2018).

Tabela 6 – Categorias de risco *versus* Categoria de EPI

NFPA 70E 2012	NFPA 70E 2015		
	Categoria de Risco	Classificação mínima de arco	
		Categoria de EPI	cal/cm <sup>2</sup>
1	1	4	16,75
2	2	8	33,5
3	3	25	104,7
4	4	40	167,5

Fonte: versão adaptada de (NFPA, 2012, 2015).

### 2.2.3.2 Seleção de EPI pela tabela OSHA

Segundo OSHA (2020), com a Lei de Segurança e Saúde Ocupacional de 1970, o Congresso Americano criou a OSHA para garantir condições de trabalho seguras, estabelecendo, aplicando padrões e fornecendo treinamento, divulgação, educação e assistência. Na legislação americana, a OSHA (2020) é a lei que declara os requisitos de conformidade, enquanto a NFPA 70E (2018) descreve como devem ser cumpridas as regras de segurança elétrica da OSHA.

De acordo com NEITZEL (2016), a revisão da OSHA em 2015 elencou os requisitos para EPI resistentes a chama do arco elétrico. Em seu apêndice E, a OSHA (2020) determina que é obrigação do empregador avaliar o local de trabalho quanto a risco de arco elétrico, estimar a EI a qual os trabalhadores estariam expostos, e selecionar os EPI com ATPV maior ou igual a EI estimada. Além de prever algumas metodologias de cálculo de EI, a OSHA (2020) em seu apêndice E apresenta uma tabela com alguns cenários pré-estabelecidos para estimar a EI. Esses cenários foram elaborados com o auxílio do ARCPRO, um programa computacional comercial para cálculo de EI. Os cenários são para curto-circuito fase-terra, que, por não apresentarem curto-circuito trifásicos e cenários mais específicos, não atendem na totalidade as características das redes de MT no Brasil. A tabela do apêndice E (OSHA, 2020), com seus critérios e requisitos, é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 – Relações entre a EI,  $I_{arc}$ ,  $V_{oc}$  e tempos de extinção do arco\*

Tensão de fase (kV)	I de Falta (kA)	Tempo Máximo de extinção do arco							
		4 Cal/cm <sup>2</sup>		5 Cal/cm <sup>2</sup>		8 Cal/cm <sup>2</sup>		12 Cal/cm <sup>2</sup>	
		(ciclos)	(s)	(ciclos)	(s)	(ciclos)	(s)	(ciclos)	(s)
4 a 15	5	46,00	0,77	58,00	0,97	92,00	1,53	138,00	2,30
	10	18,00	0,30	22,00	0,37	36,00	0,60	54,00	0,90
	15	10,00	0,17	12,00	0,20	20,00	0,33	30,00	0,50
	20	6,00	0,10	8,00	0,13	13,00	0,22	19,00	0,32
15,1 a 25	5	28,00	0,47	34,00	0,57	55,00	0,92	83,00	1,38
	10	11,00	0,18	14,00	0,23	23,00	0,38	34,00	0,57
	15	7,00	0,12	8,00	0,13	13,00	0,22	20,00	0,33
	20	4,00	0,07	5,00	0,08	9,00	0,15	13,00	0,22
25,1 a 36	5	21,00	0,35	26,00	0,43	42,00	0,70	62,00	1,03
	10	9,00	0,15	11,00	0,18	18,00	0,30	26,00	0,43
	15	5,00	0,08	6,00	0,10	10,00	0,17	16,00	0,27
	20	4,00	0,07	4,00	0,07	7,00	0,12	11,00	0,18
36,1 a 46	5	16,00	0,27	20,00	0,33	32,00	0,53	48,00	0,80
	10	7,00	0,12	9,00	0,15	14,00	0,23	21,00	0,35
	15	4,00	0,07	5,00	0,08	8,00	0,13	13,00	0,22
	20	3,00	0,05	4,00	0,07	6,00	0,10	9,00	0,15

Fonte: adaptado de (OSHA, 2020).

Requisitos e critérios presentes na Tabela 7:

- a) Curto-circuito fase-terra;
- b) Classificação dos eletrodos ao ar livre;
- c) Distância de trabalho 15 polegadas;

- d) GAP conforme intervalo de tensão Veja IEEE Std 4-1995;
- 4 kV a 15 kV = 51mm (2 pol.);
  - 15,1 kV a 25 kV = 102 mm (4 pol.);
  - 25,1 kV a 36 kV = 152 mm (6 pol.);
  - 36,1 kV a 46 kV = 229 mm (9 pol.).
- e) Cálculo realizado pelo software comercial ARCPRO.

### 2.2.3.3 Seleção de EPI pela tabela da NESC C2

O *National Electrical Safety Code* - NESC C2 (IEEE, 2012) é uma norma americana de padronização aprovada pela ANSI (ANSI - *American National Standards Institute*). Esse código trata dos critérios básicos de proteção, para pessoas inadvertidas e trabalhadores das distribuidoras de energia elétrica, decorrentes dos riscos da instalação, operação ou manutenção das redes de distribuição e comunicação. A exemplo da OSHA (2020), também está previsto que os empregadores devam realizar uma análise e se for o caso, tomarem as devidas medidas de controle para mitigar o risco térmico em função de um arco elétrico.

No NESC (IEEE, 2012) também são previstas tabelas de cenários de características técnicas pré-estabelecidas, como curto-circuito fase-terra, e por esse motivo também não atende a todas as necessidades do cenário brasileiro. Essa relação, com seus critérios e requisitos, é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Sistemas de vestimenta e vestuário —  $V_{oc}$ ,  $I_{bf}$  e tempo de falha

(continua)

Tensão de fase (kV)	I de Falta (kA)	Tempo Máximo de extinção do arco					
		4 Cal/cm <sup>2</sup>		8 Cal/cm <sup>2</sup>		12 Cal/cm <sup>2</sup>	
		(ciclos)	(s)	(ciclos)	(s)	(ciclos)	(s)
1.1 a 15	5	46,50	0,78	93,00	1,55	139,50	2,33
	10	18,00	0,30	36,10	0,60	54,10	0,90
	15	10,00	0,17	20,10	0,34	30,10	0,50
	20	6,50	0,11	13,00	0,22	19,50	0,33

Tabela 8 – Sistemas de vestimenta e vestuário — Voc, Ibf e tempo de falha

							(conclusão)
<b>15.1 a 25</b>	5	27,60	0,46	55,20	0,92	82,80	1,38
	10	11,40	0,19	22,70	0,38	34,10	0,57
	15	6,60	0,11	13,20	0,22	19,80	0,33
	20	4,40	0,07	8,80	0,15	13,20	0,22
<b>25.1 a 36</b>	5	20,90	0,35	41,70	0,70	62,60	1,04
	10	8,80	0,15	17,60	0,29	26,50	0,44
	15	5,20	0,09	10,40	0,17	15,70	0,26
	20	3,50	0,06	7,10	0,12	10,60	0,18
<b>36.1 a 46</b>	5	16,20	0,27	32,40	0,54	48,60	0,81
	10	7,00	0,12	13,90	0,23	20,90	0,35
	15	4,30	0,07	8,50	0,14	12,80	0,21
	20	3,00	0,05	6,10	0,10	9,10	0,15

Fonte: adaptado 410.1 NESC 2017.

Requisitos e critérios presentes na Tabela 8:

- a) Curto-circuito fase-terra;
- b) Classificação dos eletrodos ao ar livre;
- c) Distância de trabalho 15 polegadas;
- d) GAP conforme intervalo de tensão Veja IEEE Std 4-1995:
  - 1 kV a 15 kV = 5,08 cm (2 pol.),
  - 15,1 kV a 25 kV = 10,16 cm (4 pol.),
  - 25,1 kV a 36 kV = 15,24 cm (6 pol.),
  - 36,1 kV a 46 kV = 22,86 cm (9 pol.).
- e) Cálculo realizado por software comercial.

## 2.2.4 Seleção de EPI pelo método de cálculo de EI

### 2.2.4.1 Métodos de cálculo de EI recomendados pela NFPA 70E e OSHA

O segundo método, para seleção de EPI, é a realização de cálculos para estimar a EI. Há vários métodos de cálculos difundidos e reconhecidos por órgãos reguladores com resultados razoáveis (FARIED, 2019). Na norma NFPA 70E (2018) são apresentados 4 métodos e na norma OSHA (2020) são apresentados 5. De

acordo com o descrito na Tabela 9, na NFPA 70E (2018, anexo D), estão previstos 4 métodos dos quais somente 1 é aplicável em rede de MT.

Tabela 9 – Métodos de cálculo de EI

Seção	Fonte	Limitações/parâmetros
D. 2	Lee, "o outro perigo elétrico: queimaduras elétricas do flash do arco".	Calcula a energia incidente e limite de arco de flash para arco ao ar livre; conservador sobre 600 V e se torna mais conservador como a tensão aumenta.
D. 3	Doughty, et al., "prevendo energia incidente para melhor gerenciar o perigo de arco elétrico em 600 V sistemas de distribuição de energia".	Calcula a energia incidente para o arco trifásico em sistemas avaliados 600 V e abaixo; aplica-se a correntes de curto-circuito entre 16 kA e 50 kA.
D. 4	IEEE 1584, <i>Guia para executar cálculos de flash Arc</i> .	Calcula a energia incidente e limite de arco de flash para: 208 V a 15 kV; trifásica; 50 Hz a 60 Hz; 700 A a 106.000 A de corrente de curto-circuito; e fendas de condutor de 13 mm a 152 mm.
D. 5	Doan, "cálculos Arc flash para a exposição a sistemas DC".	Calcula a energia incidente para sistemas de corrente contínua nominal até 1000 V DC.

Fonte: adaptado de (NFPA, 2018).

Após estimar a EI em cal/cm<sup>2</sup>, a NFPA 70E (2018) orienta selecionar o EPI conforme Tabela 10. Essa tabela destaca que três EPI (protetor facial, balaclava e luva de couro pesada) só podem ser selecionados para exposição de EI entre 1,2 cal/cm<sup>2</sup> a 12 cal/cm<sup>2</sup>. Todos os demais EPI devem ser selecionados com ATPV igual ou superior a EI estimada. A diferença entre as tabelas da NFPA 70E (2018), do método por cálculo de EI (Tabela 10) e por categoria de EPI (Tabela 6), é que, para a Tabela 10, pode-se selecionar o EPI pelo seu ATPV segundo a EI estimada, e não pela categoria de EPI. Por exemplo: Em uma determinada condição o cálculo da EI que resultou em 8,5 cal/cm<sup>2</sup>, se houver um fabricante que produza um EPI com classificação de ATPV de 8,5 cal/cm<sup>2</sup> ou superior, esse EPI pode ser selecionado em detrimento da seleção da Categoria 3 de EPI da Tabela 6, que tem como ATPV mínimo requerido 25 cal/cm<sup>2</sup>.

Tabela 10 – Seleção de EPI pelo método de cálculo de EI

Exposição EI	EPI
1,2 cal/cm <sup>2</sup> a 12 cal/cm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Roupa com classificação de risco igual ou superior a energia incidente estimada; (a)</li> <li>• Camisa de manga comprida e calça ou macacão ou traje de arco; (SR)</li> <li>• Protetor facial e balaclava com classificação de arco ou capuz de proteção para risco de arco elétrico; (SR) (B)</li> <li>• Roupa exterior com classificação de arco (por exemplo, casaco, roupa de chuva, forro de capacete); (AN)</li> <li>• Luvas de couro para serviços pesados ou luvas com classificação de arco ou luvas isolantes de borracha com protetores de couro; (SR) (C)</li> <li>• Capacete;</li> <li>• Óculos de segurança ou óculos de proteção; (SR)</li> <li>• Protetor auricular;</li> <li>• Calçado de couro;</li> </ul>
maior que 12 cal/cm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Roupa com classificação de risco igual ou superior a energia incidente estimada;</li> <li>• Camisa de manga comprida e calça ou macacão ou traje de arco; (SR)</li> <li>• Capuz de proteção para o risco de arco;</li> <li>• Roupa exterior com classificação de risco (quando necessário);</li> <li>• Luvas com classificação de risco ou luvas isolantes de borracha com protetores de couro; (SR) (C)</li> <li>• Capacete;</li> <li>• Óculos de segurança ou óculos de proteção; (SR)</li> <li>• Protetor auricular; e</li> <li>• Calçado de couro.</li> </ul>

Fonte: adaptado de (NFPA, 2018).

(SR) – Seleção de um item das alternativas.

(NA) – Selecionar o item, se for necessário.

(A) – As avaliações do arco podem ser para uma peça ou conjunto de acordo com a especificação dos EPIs e critério de ensaio.

(B) – Segundo avaliação, protetor facial se não houver risco na parte de traz da cabeça, caso contrário, deve-se prever balaclava ou capuz.

(C) – As luvas isolantes de borracha com protetores de couro proporcionam proteção de arco elétrico além de proteção para o risco de choques. Quanto maior a classe das luvas isolantes de borracha com protetores de couro maior a proteção de risco de arco elétrico em função da sua espessura.

No apêndice E da OSHA (2020) é apresentada a Tabela 11 que possui 4 metodologias, nas quais duas delas são aplicáveis para rede de distribuição de MT. O método do guia O IEEE Std 1584b-2011 e o programa computacional comercial ARCPRO.

Tabela 11 – Métodos razoáveis para cálculo de EI segundo OSHA1.

Método de cálculo de energia de incidentes	≤ 600 V <sup>2</sup>			601 V a 15 kV <sup>2</sup>			> 15 kV		
	1Φ	3Φa	3Φb	1Φ	3Φa	3Φb	1Φ	3Φa	3Φb
<b>NFPA 70E-2012, anexo D (equação de Lee)</b>	YC	Y	N	YC	YC	N	N <sup>3</sup>	N <sup>3</sup>	N <sup>3</sup>
<b>Doughty, Neal e Floyd</b>	YC	Y	Y	N	N	N	N	N	N
<b>IEEE Std 1584b-2011</b>	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N
<b>ARCPRO</b>	Y	N	N	Y	N	N	Y	Y <sup>4</sup>	Y <sup>4</sup>

Fonte: adaptado de (OSHA, 2020).

1Φ: Arco monofásico ao ar livre.

3Φa: Arco trifásico ao ar livre.

3Φb: Arco trifásico em um gabinete (caixa).

Y: Aceitável; produz uma estimativa razoável da EI desse tipo de arco elétrico.

N: Não aceitável; não produz uma estimativa razoável da EI desse tipo de arco elétrico.

YC: Aceitável; produz uma estimativa razoável, mas conservadora, da EI desse tipo de arco elétrico.

**Notas:**

<sup>1</sup> Ainda que a OSHA considere esses métodos razoáveis para fins de aplicação quando os empregadores os usarem de acordo com essa tabela, os empregadores devem estar cientes de que os métodos listados não resultam, necessariamente, em estimativas que fornecerão proteção total contra falhas internas em transformadores e equipamentos semelhantes ou de arcos em câmaras de visita ou câmaras subterrâneas.

<sup>2</sup> Para essas tensões, presume-se que o arco seja trifásico, a menos que o empregador possa demonstrar que apenas uma fase está presente ou que o espaçamento das fases é suficiente para impedir a ocorrência de um arco multifásico.

<sup>3</sup> Mesmo que a OSHA considere esse método aceitável para avaliar se a EI excede 2cal/cm<sup>2</sup>, os resultados em tensões superiores a 15 quilovolts são extremamente conservadores e irrealistas.

<sup>4</sup> A OSHA considerará razoáveis os resultados desse método quando o empregador os ajustar, usando os fatores de conversão para arcos trifásicos ao ar livre ou em um recinto, de acordo com o indicado nas instruções do programa.

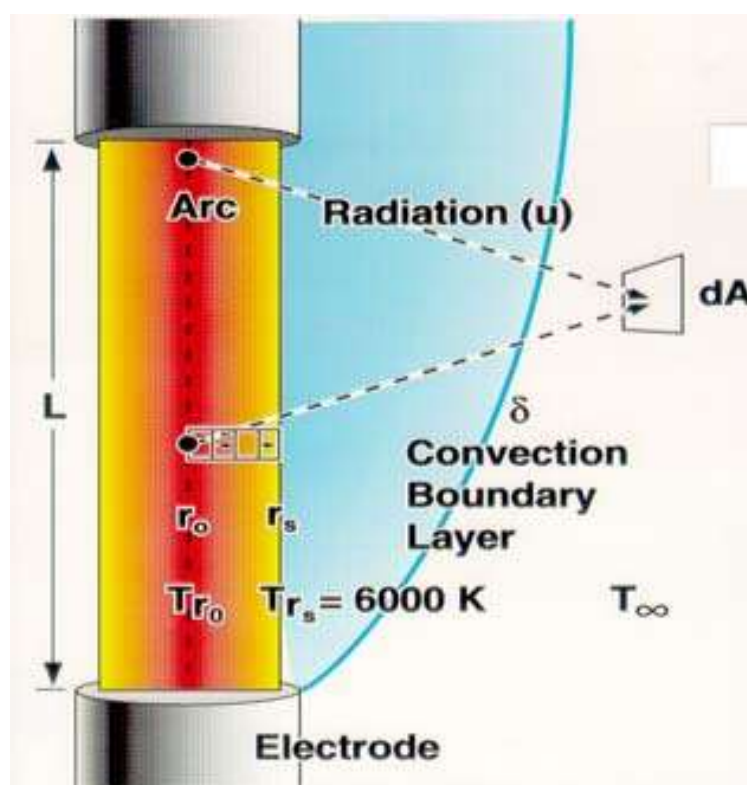
Ainda que existam outros métodos na bibliográfica consultada, serão detalhados, somente, os dois métodos previstos nas normas Americanas. Cálculo de EI, utilizando ARPRO e o cálculo de EI utilizando o guia IEEE 1564 (2018).

#### 2.2.4.2 Método de cálculo de EI utilizando o ARCPRO

O ARCPRO é um programa computacional comercial produzido KINECTRICS que teve sua 3ª versão lançada em 2017. Segundo SHORT (2009), o método de estimativa da EI é baseado em princípios da física e da engenharia de arco elétrico. O software modela o arco de alta potência, levando em consideração variáveis complexas como: propriedades de gás, materiais de eletrodos de arco, radiação térmica e dissipação de energia convectiva. Seu modelamento foi validado em testes de arco elétrico produzidos em laboratório. O modelo calcula a radiação térmica

através da determinação do fluxo de calor e o calor total em cal/cm<sup>2</sup> que são incidentes em uma superfície a uma distância do arco. Esse valor de EI é a referência para selecionar o ATPV do EPI. A Figura 7 ilustra o princípio do modelamento.

Figura 7 – Modelagem de arco pelo método do ARCPRO



Fonte: SHORT (2009).

Tabela 12 – Dados de entrada e parâmetros do ARCPRO 3.0

Parâmetro	Dado de entrada		
	Monofásico	Trifásico	Corrente continua
Corrente (A)	200 a 100.000	200 a 80.000	200 a 80.000
Duração em ciclos (60 Hz)	0,05 a 1000	0,05 a 1000	0,05 a 1000
Abertura do arco (pol.)	1 a 72	1 a 50	1 a 36
Distância ao arco (pol.)	0,4 a 400	0,4 a 400	0,4 a 400
Tensão da fonte (V)	Até 500.000	Até 120.000	Até 1.200
Material do eletrodo	Aço inoxidável e cobre		

Fonte: adaptado de KINECTRICS (2020).



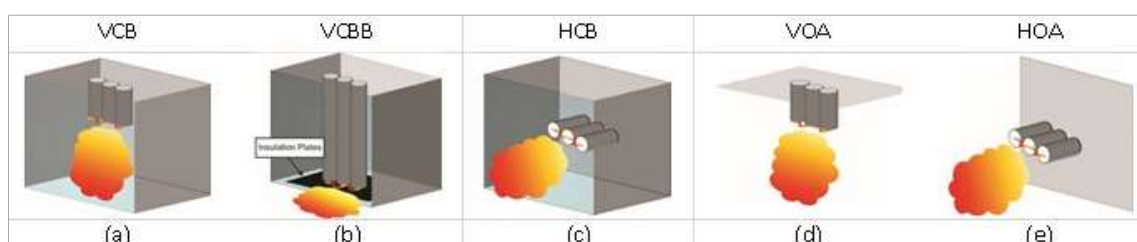
### 2.2.4.3 Método de cálculo de EI conforme guia IEEE 1584

As normas NFPA 70E (2018) e OSHA (2020) citam a metodologia prevista no guia IEEE std 1584 de 2002 como um dos métodos para estimar a EI de um arco elétrico. As normas preveem essa versão, do guia, porque até então não havia sido publicada a versão 2018. Assim sendo, neste trabalho será tratada a versão IEEE 1584 (2018).

O guia apresenta seu método dividido em duas partes. A parte 1 corresponde à tensão de 208V a 600V e a parte 2 corresponde à tensão de 600V até 15kV. Para ambas as partes são apresentadas cinco configurações de disposição dos eletrodos que variam conforme posição vertical ou horizontal e o ambiente em que se encontram (caixa ou ar livre). Essas configurações são descritas, abaixo, e ilustradas na Figura 8.

- a) VCB: condutores/eletrodos verticais dentro de uma caixa/invólucro metálico;
- b) VCBB: condutores/eletrodos verticais terminados em barreira isolante dentro de caixa/invólucro metálico;
- c) HCB: condutores/eletrodos horizontais dentro de uma caixa/invólucro metálico;
- d) VOA: condutores /eletrodos verticais ao ar livre; e
- e) HOA: condutores/eletrodos horizontais ao ar livre.

Figura 8 – Configurações dos eletrodos



Fonte: adaptado de (IEEE, 2018).

Os parâmetros para estimar a EI estão elencados na Tabela 13. Para aplicação nas redes de MT é empregada a parte 2 da metodologia e a configuração dos eletrodos VOA e HOA.

Tabela 13 – Dados de entrada e parâmetros do Guia IEEE 1584

Parâmetro	Dado de entrada	
	Parte 1	Parte 2
<b>Corrente (A)</b>	500 a 106.000	200 a 65.000
<b>Tempo de extinção do arco (ms)</b>	*	*
<b>Distância entre eletrodos (mm)</b>	6,35 a 76,2	19,05 a 254
<b>Distância de Trabalho (mm)</b>	> 305	> 305
<b>Tensão da fonte trifásica (kV)</b>	0,208 a 0,6	0,6 a 15
<b>Frequência (Hz)</b>	50 ou 60	50 ou 60

Fonte: adaptado de (IEEE, 2018).

\* Conforme curva do dispositivo de proteção.

#### 2.2.4.4 Comparação dos métodos existentes

MARROQUIN (2020) realiza uma análise comparativa de diferentes métodos para calcular a EI para média e alta tensão. O autor considerou que sete dos métodos avaliados possuem resultados “razoáveis”. A justificativa é que, com exceção do método LEE, a diferença da EI calculada (EI máxima menos EI mínima) entre resultados dos diferentes métodos não excedeu a 2,1 cal/cm<sup>2</sup>. A metodologia a qual o autor se refere são: métodos derivados com base no teste do Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica (EPRI). Nas pesquisas de Terzija e Konglin, o método do guia IEEE 1584 versão 2002, previsto na NFPA 70E (2018) e OSHA (2020), guia IEEE 1584 (2018), software ARCPRO previsto na OSHA e Duke heat flux calculator.

MARROQUIN (2020) conclui que é imperativo calcular a EI fora do escopo IEEE 1584 (2018), em especial a distância entre condutores/eletrodos, nível de tensão, e maior precisão na determinação da EI em arcos elétricos de origem monofásica, ainda assim, o guia é a metodologia mais recente. Para JORNACION (2020), o guia apresenta resultados mais precisos dentro de seus parâmetros. Suas orientações e equacionamentos estão disponíveis para que o usuário possa realizar seus estudos.

Como o escopo deste trabalho é sobre a aplicação dos resultados de EI ao longo das redes de MT, qualquer método reconhecido pode ser utilizado. Desta forma, como referência para este trabalho, será detalhada e utilizada a metodologia do IEEE 1584 (2018).

### 3 CALCULO DE ENERGIA INCIDENTE SEGUNDO GUIA IEEE 1584

#### 3.1 EVOLUÇÃO DO MODELO DO GUIA IEEE 1584

O padrão IEEE 1584 é uma diretriz amplamente usada para realizar cálculos de arco elétrico desenvolvidos pelo IEEE. O padrão foi lançado, inicialmente em 2002, para estimar a EI e tem sido a referência para muitos estudos de arco elétrico. A versão de 2018 revisa as equações de EI, passando a considerar no cálculo as dimensões de caixas de equipamento e a orientação do eletrodo. O escopo do guia abrange: procedimentos de teste, desenvolvimento de modelo, parâmetros de entrada necessários e exemplos de cálculo reais. Determina também diferentes orientações e configurações de eletrodos necessárias para a aplicação adequada do modelo (MOHLA 2019).

De acordo com JORNACION (2020), o novo padrão forneceu uma estimativa mais precisa das falhas de arco e da EI, contudo traz considerações mais cuidadosas. Novos procedimentos de segurança e métodos de coleta de dados podem ser necessários para reunir informações para implementar o novo modelo. Como exposto por MOHLA (2019), um estudo com arco elétrico requer uma quantidade significativa de dados, algumas vezes, representando metade do esforço de estudo. Muitos desses dados são para a realização de uma investigação de curto-circuito e coordenação, com os resultados de cada um deles se tornando parte integrante do estudo do arco elétrico.

A versão de 2018 do modelo é mais complexa analiticamente e requer maior esforço e tomada de decisão (FARIED, 2019). A versão de 2002 continha três páginas de equações, a de 2018 contém 17 páginas de fórmulas (JORNACION, 2020), levando em consideração a orientação do eletrodo, barreiras e tamanho da caixa. Isso representa a maior mudança no novo modelo. A edição de 2002 incluía eletrodos verticais dentro de uma caixa de metal e ao ar livre. A edição de 2018 adiciona eletrodos verticais terminados em uma barreira, eletrodos horizontais dentro de uma caixa e ao ar livre. Ao invés de calor e plasma que ejetavam de uma caixa através de radiação e pressão prevista na de 2002, na edição de 2018 foram adicionados calor e plasma perpendiculares ao trabalhador (FARIED, JORNACION, 2019, 2020).

### 3.2 TESTES EM LABORATÓRIO E SEUS RESULTADOS

A metodologia apresentada pelo guia IEEE1584 (2018) é um modelo derivado empiricamente, e, assim como o modelo de 2002, é considerada capaz de produzir resultados consistentes quando aplicada dentro da faixa recomendada de seus parâmetros. O modelo de cálculo foi desenvolvido com base em mais de 1860 testes realizados em diferentes níveis de tensão. O desempenho do modelo também foi avaliado em relação aos resultados dos testes realizados para a versão de 2002 (aproximadamente, 300 testes). O desempenho foi avaliado em 932 testes a 208 V a 600V, 325 testes a 2,7 kV, 202 testes a 4kV e mais de 400 testes entre 12 kV a 15 kV (FARIED, IEEE, MOHLA 2019, 2018, 2019).

A análise dos resultados dos testes permitiu concluir que:

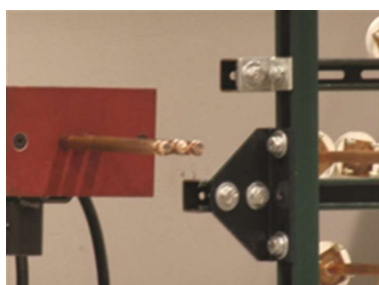
- a) A duração do arco tem um efeito linear sobre a EI;
- b) A distância do arco aos calorímetros tem um efeito exponencial inverso;
- c) A relação entre o sistema X/R, a frequência e o material do eletrodo, foi considerada como tendo pouco ou nenhum efeito na EI e, portanto, são negligenciadas;
- d) A corrente do arco depende: da corrente de curto-circuito disponível, da distância entre eletrodos, das configurações do eletrodo, e da tensão do sistema; e
- e) A EI depende, principalmente, da corrente de arco calculada, da duração do arco e da distância de trabalho. A diferença de material do barramento é um fator menor.

Um destaque importante nos resultados para aplicação em redes de MT é a necessidade de se distinguir a configuração dos eletrodos entre vertical e horizontal. As simulações demonstraram que há uma diferença significativas na direção do arco conforme as configurações ao ar livre (HOA e VOA) ilustradas na Figura 9 e Figura 10, respectivamente, e por consequência na EI estimada.

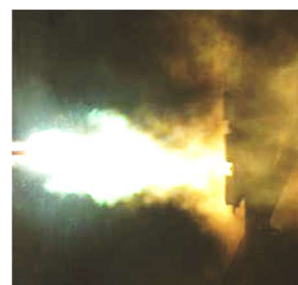
Quando os calorímetros são colocados em frente dos eletrodos horizontais mostrados na Figura 9, o arco é direcionado diretamente para os calorímetros, em contraste com a Figura 10, em que os eletrodos verticais projetam o arco em uma direção descendente que não intercepta a superfície do calorímetro.

Conseqüentemente, a orientação do eletrodo horizontal transmite mais calor ao calorímetro resultando em uma EI maior.

Figura 9 – Configuração de ensaio com eletrodos na horizontal (HOA)



Eletrodo para teste



Teste

Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018).

Figura 10 – Configuração de ensaio com eletrodos na vertical (VOA)



Eletrodo para teste



Teste

Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018).

### 3.3 ABRANGÊNCIA E PARÂMETROS DO MODELO PARA REDE DE MT

#### 3.3.1 Coleta de dados

O primeiro passo para começar a coleta de dados é identificar os diagramas unifilares existentes. Eles deverão ser revisados e atualizados para representar a realidade da rede (IEEE, MOHLA, 2018, 2019). Um aspecto importante a ser considerado é a identificação dos vários modos de operação que possam afetar os resultados do estudo do arco elétrico. Além da configuração normal de funcionamento, deve-se considerar condições de manobra, através de dispositivos de ligação abertos ou fechados, fontes alternativas, como geradores, bem como situações que interfiram nas correntes de curto-circuito e na atuação dos dispositivos de proteção que são

responsáveis pelo tempo de extinção do arco elétrico, e por consequência os resultados da EI.

### **3.3.2 Tensão ( $V_{oc}$ )**

O nível de tensão aplicável para rede de MT está compreendido entre 0,6 e 15 kV. Tensão trifásica (linha-linha). Ainda que os testes tenham sido realizados em condições de laboratório, usando tensões de circuito aberto selecionadas ( $V_{oc}$ ), para aplicar o modelo deve ser utilizado o nível de tensão que antecede o arco elétrico como tensão nominal do sistema, tensão de utilização, etc.

O teste de EI para arco elétrico em sistemas monofásicos não foi suficientemente pesquisado para determinar um método para estimar a EI. Utilizando as equações trifásicas, fornecidas no guia, a tensão do sistema monofásico (linha-linha, linha-terra, tensão de derivação central, etc.), podem ser aplicadas para determinar a corrente de arco. A corrente de arco pode então ser usada para encontrar o tempo de abertura do dispositivo de proteção e por fim estimar a EI. Dessa forma, espera-se que o resultado da EI seja conservador.

### **3.3.3 Frequência (Hz)**

De acordo com o que foi mencionado em 3.2, a variação da frequência não teve um impacto significativo nos resultados das simulações, sendo negligenciada no método. Assim sendo, para utilização do método não é necessário se fazer a distinção entre 50Hz e 60Hz.

### **3.3.4 Corrente de falha franca (kA)**

A corrente de falha franca é a corrente de curto-circuito no ponto da falha, assumindo impedância zero. O intervalo da corrente de falha franca para rede de MT previsto no guia está compreendido entre 0,2 e 65 kA (rms simétrica). Se houver um estudo atualizado sobre curto-circuito, essas informações poderão ser usadas para o cálculo de EI. Ainda assim, se o estudo de curto-circuito não estiver atualizado, será necessário revisá-lo com base em padrões aplicáveis, como IEEE Std 551 (IEEE

Violet Book), IEC 60909-0 (correntes de curto-circuito em três fases sistemas CA - Parte 0: Cálculo de correntes) e IEEE Std 242 (IEEE Buff Book) ou softwares comerciais (IEEE, MOHLA, 2018, 2019).

### **3.3.5 Distância entre condutores (mm)**

A distância entre condutores (Gaps) nas redes de MT são os afastamentos entre condutores ou potenciais do mesmo circuito ou de circuitos distintos. O intervalo previsto na metodologia para estes afastamentos está compreendido entre 19,05 mm a 254 mm.

A distância típica entre os condutores é fornecida em (IEEE, 2018), com base na classe de cada peça de equipamento que faz parte do estudo (ZHANG, 2020). Pode ser prudente determinar os intervalos em conjunto com a determinação da configuração do eletrodo, pois os intervalos podem mudar significativamente conforme a direção horizontal para vertical.

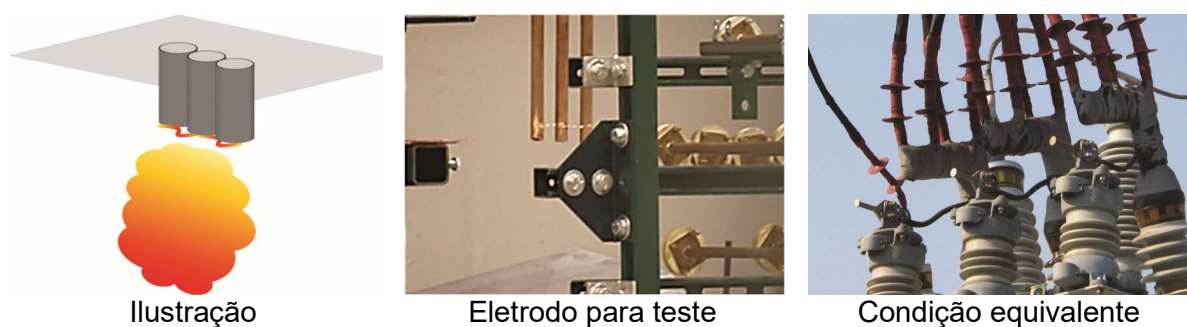
### **3.3.6 Configurações dos eletrodos (HOA, VOA)**

A configuração do eletrodo é um novo recurso do modelo 2018. O modelo de 2002 era baseado em testes de arco elétrico com três eletrodos em uma configuração vertical ao ar livre (VOA). Nesse caso, o arco passaria da fonte em direção às pontas dos eletrodos. Apesar disso, como apresentado em 3.2 a EI é, significativamente, maior quando os eletrodos estão na horizontal. Segundo JORNACION (2020), para acomodar as diferenças que estão ilustradas na Figura 12, o modelo de 2018 considera eletrodos em uma configuração horizontal ao ar livre (HOA), além do modelo existente na versão de 2002 de eletrodos na configuração vertical ao ar livre (VOA) presente na Figura 11.

Para identificar a configuração do condutor em rede de MT, que mais se assemelha a configuração do eletrodo do guia (VOA, HOA), foram apresentados, em 2.1.2, os padrões construtivos de redes de MT. Observa-se que nos padrões existem condutores dispostos tanto na horizontal quanto na vertical. Assim sendo, é imprescindível identificar a configuração dos eletrodos na estrutura em relação a posição de trabalho. Ocorrendo mais de uma configuração dos condutores, seja em

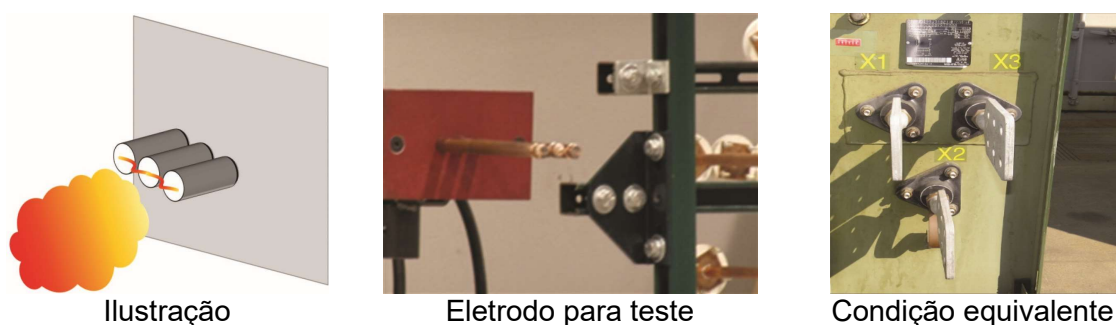
um ponto de trabalho ou em uma análise de múltiplos pontos de trabalho, deve-se adotar a configuração que resulte no maior valor de EI, assim será atendida a condição mais crítica.

Figura 11 – Configuração eletrodos na vertical (VOA)



Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018).

Figura 12 – Configuração eletrodos na horizontal (HOA)



Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018).

### 3.3.7 Distância de trabalho e o limite do arco elétrico (mm)

Segundo MOHLA (2020), a distância de trabalho é definida como a distância da fonte potencial do arco, da face e do peito do trabalhador que está executando a tarefa. Essa distância tem um efeito significativo na EI resultante no ponto de trabalho. A energia aumenta exponencialmente à medida que a distância do trabalhador diminui em relação a fonte de um arco elétrico.

Em (IEEE, 2018) é apresentada como distância de trabalho mínima 304,8 mm. Com base nos resultados dos ensaios em laboratório, esta distância foi considerada como o limite máximo do alcance da nuvem de plasma do arco e das gotas de metal. O alcance da nuvem de plasma e o efeito do contato direto com ela, não foi



amplamente discutido, devendo ser considerado em futuras revisões do modelo de arco elétrico.

No guia foi considerado desnecessário estabelecer um limite superior na distância de trabalho. Mesmo que a faixa dos parâmetros de teste para a distância de trabalho tenha sido entre 457,2 mm e 1193,8 mm para tensões entre 600V e 15 kV (parte 2 do método), a referência para distância máxima pode ser considerada o resultado do cálculo do limite do arco elétrico (AFB- arc-flash boundary), que é a distância da possível fonte de arco elétrico em que a EI calculada resulta em 5,0 J/cm<sup>2</sup> (1,2 cal/cm<sup>2</sup>).

Na edição de 2018, a lista da relação, entre classes de equipamentos e distância de trabalho, aumentou, contudo, no geral, o conceito básico é o mesmo. Ainda assim, estas distâncias são propostas como sugestão. Não há uma determinação da distância de trabalho, cabe ao responsável pelo estudo definir qual será a distância mínima que o trabalhador estará de uma fonte de um possível arco em função da atividade a ser executada. Neste trabalho será adotada a distância de 457,2 mm, considerada razoável por (IEEE, NEITZEL, NFPA, 2019, 2018, 2018) para trabalho semelhante ao de LV na rede de MT.

### **3.3.8 Tempo de extinção do arco (ms)**

A duração da corrente de arco é definida pelo tempo que leva um dispositivo de proteção a eliminar a falha. Deve-se utilizar o tempo total de extinção, ou seja, o tempo total até que o circuito esteja totalmente interrompido e a corrente de arco esteja extinta. Esse período inclui, o tempo de detecção do dispositivo, tempo de abertura do dispositivo, margens de segurança, dispositivos auxiliares, como relés de bloqueio, tempo total de fusão no caso de fusíveis, ou seja, o tempo total até a extinção do arco.

Na coleta dos dados são necessários os dados sobre o dispositivo de proteção contra sobrecorrente, a montante da fonte que atende a instalação em estudo. Isso pode incluir dados de fusível, relé de sobrecorrente, dados do disjuntor e transformador de instrumento (IEEE, MOHLA, 2013, 2019).

### 3.4 APLICAÇÃO DO MODELAMENTO MATEMÁTICO

O modelamento matemático apresentado no guia IEEE 1584 (2018) para o cálculo de EI e a identificação do limite de arco elétrico (AFB) em rede de MT, podendo ser dividido em 7 passos. Sendo eles:

- 1º Determinar a corrente de arco ( $I_{arc}$ );
- 2º Determinar a corrente de arco reduzida ( $I_{arc\_min}$ );
- 3º Calcular a EI com a corrente arco ( $EI_{I_{arc}}$ );
- 4º Calcular a EI com a corrente arco reduzida ( $EI_{I_{arc\_min}}$ );
- 5º Comparar  $EI_{I_{arc}}$  com  $EI_{I_{arc\_min}}$  e adotar o maior valor;
- 6º Calcular a AFB com a corrente arco ( $AFB_{I_{arc}}$ );
- 7º Calcular AFB com a corrente arco reduzida ( $AFB_{I_{arc\_min}}$ ); e
- 8º Comparar  $AFB_{I_{arc}}$  com  $AFB_{I_{arc\_min}}$  e adotar a maior distância.

Para realização desses cálculos será necessária a aplicação de 18 equações que foram agrupadas em 4 tópicos abaixo. Sendo eles: determinação da corrente de arco, determinação da corrente de arco reduzida, determinação da EI e a identificação do limite do arco elétrico AFB.

#### 3.4.1 Determinação da corrente de arco

A primeira etapa é determinar a corrente do arco elétrico. As informações necessárias para calcular o arco são: corrente de curto-circuito trifásica no ponto de interesse, a direção dos eletrodos, para redes de MT que são as configurações ao ar livre (VOA, HOA) e a distância entre condutores ou eletrodos (GAP).

Aplicando a equação 1, calcula-se as correntes intermediárias, utilizando as tensões 600 V, 2700 V e 14300 V.

$$I_{arc_{V_{oc}}} = 10^{(k1+k2 \log I_{bf}+k3 \log G)} \times (k4I_{bf}^6 + k5I_{bf}^5 + k6I_{bf}^4 + k7I_{bf}^3 + k8I_{bf}^2 + k9I_{bf}^1 + k10) \quad (1)$$

Em que:

- $I_{bf}$  Corrente de curto-circuito trifásica simétrica rms (kA);  
 $I_{arc_{600}}$  Corrente de arco para  $V_{oc} = 600$  V (kA);

$I_{arc_{2700}}$	Corrente de arco para $V_{oc} = 2700$ V (kA);
$I_{arc_{14300}}$	Corrente de arco para $V_{oc} = 14300$ V (kA);
$G$	Distância entre os eletrodos (mm);
$k1$ a $k10$	Coefficientes da Tabela 14 conforme configuração; e
$log$	Logaritmo na base 10 ( $\log_{10}$ ).

Tabela 14 – Coeficientes  $k$  para Equação (1)

E.C. / $V_{oc}$	600 V		2 700 V		14 300 V	
	VOA	HOA	VOA	HOA	VOA	HOA
<b>k1</b>	0,043785	0,111147	-0,02395	0,000435	0,005371	0,000904
<b>k2</b>	1,04	1,008	1,006	1,006	1,0102	0,999
<b>k3</b>	-0,18	-0,24	-0,0188	-0,038	-0,029	-0,02
<b>k4</b>	0	0	-1,557E-12	0	-1,557E-12	0
<b>k5</b>	0	0	4,556E-10	0	4,556E-10	0
<b>k6</b>	-4,78E-09	-3,895E-09	-4,186E-08	7,859E-10	-4,186E-08	7,859E-10
<b>k7</b>	1,96E-06	1,64E-06	8,346E-07	-1,914E-07	8,346E-07	-1,914E-07
<b>k8</b>	-0,000229	-0,000197	5,482E-05	-9,128E-06	5,482E-05	-9,128E-06
<b>k9</b>	0,003141	0,002615	-0,003191	-0,0007	-0,003191	-0,0007
<b>k10</b>	1,092	1,1	0,9729	0,9981	0,9729	0,9981

Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018).

A partir das correntes intermediárias, pode-se calcular os termos da interpolação, utilizando as equações (2), (3) e (4) para determinar  $I_{arc\_1}$ ,  $I_{arc\_2}$  e  $I_{arc\_3}$ , respectivamente.

$$I_{arc\_1} = \frac{I_{arc\_2700} - I_{arc\_600}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + I_{arc\_2700} \quad (2)$$

$$I_{arc\_2} = \frac{I_{arc\_14300} - I_{arc\_2700}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + I_{arc\_14300} \quad (3)$$

$$I_{arc\_3} = \frac{I_{arc\_1}(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{I_{arc\_2}(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (4)$$

Em que:

$I_{arc\_1}$	1º termo da interpolação entre 600 V e 2700 V (kA);
$I_{arc\_2}$	2º termo da interpolação, utilizado quando $V_{oc}$ for maior que 2700 V (kA);
$I_{arc\_3}$	3º termo da interpolação, utilizado quando $V_{oc}$ for menor ou igual a 2700 V (kA); e
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto (tensão do sistema) (kV).

O valor final da corrente de arco é definido a partir do nível de tensão do sistema em análise ( $V_{oc}$ ).

$$\text{Se } 0,6 < V_{oc} \leq 2,7 \text{ kV} \rightarrow I_{arc} = I_{arc\_3};$$

$$\text{Se } V_{oc} > 2,7 \text{ kV} \rightarrow I_{arc} = I_{arc\_2}.$$

A corrente de arco  $I_{arc}$  é utilizada para identificar a duração do arco nas curvas de tempo *versus* corrente dos dispositivos de proteção. Esse tempo é empregado para determinar EI calculada com  $I_{arc}$  e o AFR calculada com  $I_{arc}$ .

### 3.4.2 Determinação da corrente de arco reduzida

A próxima etapa é a aplicação de um fator de redução em  $I_{arc}$ , gerando a corrente de arco reduzida  $I_{arc\_min}$ . O objetivo é avaliar se essa redução da corrente de arco e possível alteração no tempo de operação dos dispositivos de proteção, alterará o valor da EI e da AFB.

Para determinar as correntes de arco reduzidas e intermediárias, aplicam-se as Equação (5) e (6) e os coeficientes fornecidos na Tabela 2 para cada corrente calculada de:  $I_{arc\_600}$  da equação (1),  $I_{arc\_2700}$  da equação (1) e  $I_{arc\_14300}$  da equação (1).

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

$$VarC_f = k1V_{oc}^6 + k2V_{oc}^5 + k3V_{oc}^4 + k4V_{oc}^3 + k5V_{oc}^2 + k6V_{oc}^1 + k7 \quad (6)$$

Em que:

$VarC_f$  Fator de correção da variação da corrente de arco;

$I_{arc}$  Correntes intermediárias  $I_{arc\_600}$ ,  $I_{arc\_2700}$  e  $I_{arc\_14300}$  para  $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15000 \text{ V}$  (kA);

$I_{arc\_min}$  Corrente de arco rms reduzida com base no fator de correção de variação (kA);

$V_{oc}$  Tensão de circuito aberto (tensão do sistema) (kV); e  
Coeficientes fornecidos na Tabela 15

$k1$  a  $k7$

Tabela 15.

Tabela 15 – Coeficientes  $k$  para Equação (6)

EC	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7
VOA	9,5606E-07	-5,1543E-05	0,0011161	-0,01242	0,075125	-0,23584	0,33696
HOA	0	-3,1555E-06	0,0001682	-0,0034607	0,034124	-0,1599	0,34629

Fonte: Adaptado de (IEEE, 2018).

Com os valores de  $I_{arc\_min\_600}$ ,  $I_{arc\_min\_2700}$  e  $I_{arc\_min\_14300}$ , calcule os valores de  $I_{arc\_min\_1}$ , aplicando a equação 2,  $I_{arc\_min\_2}$ , aplicando a equação 3 e  $I_{arc\_min\_3}$ , aplicando a equação 4.

O valor final da corrente de  $I_{arc\_min}$  é definido a partir do nível de tensão do sistema em análise ( $V_{oc}$ ).

$$\text{Se } 0,6 < V_{oc} \leq 2,7 \text{ kV} \rightarrow I_{arc\_min} = I_{arc\_min\_3};$$

$$\text{Se } V_{oc} > 2,7 \text{ kV} \rightarrow I_{arc\_min} = I_{arc\_min\_2}.$$

A corrente de arco  $I_{arc\_min}$  é utilizada para identificar a duração do arco nas curvas de tempo *versus* corrente dos dispositivos de proteção. Esse tempo é considerado para determinar a EI calculada com  $I_{arc\_min}$  e o AFR calculada com  $I_{arc\_min}$ .

### 3.4.3 Determinação da EI

Para calcular a EI, primeiro deve-se identificar os valores intermediários de EI, utilizando as Equações (7), (8) e (9) e a Tabela 16.

$$E_{600} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left( \frac{k1+k2 \log G + \frac{k3 I_{arc600}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}^1}}{k11 \log I_{bf} + k12 \log D + k13 \log I_{arc\_600} + \log \frac{1}{CF}} \right)} \quad (7)$$

$$E_{2700} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left( \frac{k1+k2 \log G + \frac{k3 I_{arc2700}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}^1}}{k11 \log I_{bf} + k12 \log D + k13 \log I_{arc\_2700} + \log \frac{1}{CF}} \right)} \quad (8)$$

$$E_{14300} = \frac{12,552}{50} T \times 10^{\left( \frac{k1+k2 \log G + \frac{k3 I_{arc14300}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}^1}}{k11 \log I_{bf} + k12 \log D + k13 \log I_{arc\_14300} + \log \frac{1}{CF}} \right)} \quad (9)$$

Em que:

$E_{600}$	Energia incidente em $V_{oc} = 600$ V ( $J/cm^2$ );
$E_{2700}$	Energia incidente em $V_{oc} = 2700$ V ( $J/cm^2$ );
$E_{14300}$	Energia incidente em $V_{oc} = 14\ 300$ V ( $J/cm^2$ );
$T$	Duração do arco (ms);
$G$	Distância entre os condutores (eletrodos) (mm);
$I_{arc600}$	Corrente de arco rms para 600 V (kA);
$I_{arc2700}$	Corrente de arco rms para 2700 V (kA);
$I_{arc14300}$	Corrente de arco rms para 14 300 V (kA);
$I_{bf}$	Corrente de curto-circuito trifásica simétrica rms (kA);
$D$	Distância entre eletrodos e calorímetros (distância de trabalho) (mm);
$CF$	1 para as configurações HOA e VOA;
$lg$	Log10; e
$k1$ a $k13$	Coefficientes fornecidos na Tabela 16 conforme equação.

Tabela 16 – Coeficientes  $K$  para as equações (7), (8) e (9)

Coeficiente	$E_{600}$		$E_{2700}$		$E_{14300}$	
	VOA	HOA	VOA	HOA	VOA	HOA
<b>k1</b>	0,679294	3,470417	3,880724	3,616266	3,405454	2,04049
<b>k2</b>	0,746	0,465	0,105	0,149	0,12	0,177
<b>k3</b>	1,222636	-0,261863	-1,906033	-0,761561	-0,93245	1,005092
<b>k4</b>	0	0	-1,557E-12	0	-1,557E-12	0
<b>k5</b>	0	0	4,556E-10	0	4,556E-10	0
<b>k6</b>	-4,783E-09	-3,895E-09	-4,186E-08	7,859E-10	-4,186E-08	7,859E-10
<b>k7</b>	0,000001962	0,000001641	8,346E-07	-1,914E-07	8,346E-07	-1,914E-07
<b>k8</b>	-0,000229	-0,000197	5,482E-05	-9,128E-06	5,482E-05	-9,128E-06
<b>k9</b>	0,003141	0,002615	-0,003191	-0,0007	-0,003191	-0,0007
<b>k10</b>	1,092	1,1	0,9729	0,9981	0,9729	0,9981
<b>k11</b>	0	0	0	0	0	-0,05
<b>k12</b>	-1,598	-1,99	-1,515	-1,639	-1,534	-1,633
<b>k13</b>	0,997	1,04	1,115	1,078	0,979	1,151

Fonte: adaptado de (IEEE, 2018).

A partir dos valores de EI intermediárias, calcular os termos da interpolação, utilizando as equações (10), (11) e (12) para determinar  $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$ , respectivamente.

$$E_1 = \frac{E_{2700} - E_{600}}{2,1} \times (V_{oc} - 2,7) + E_{2700} \quad (10)$$

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

$$E_3 = \frac{E_1(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{E_2(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (12)$$

Em que:

$E_1$	1º termo da interpolação entre 600 V e 2700 V (J/cm <sup>2</sup> );
$E_2$	2º termo da interpolação utilizado quando $V_{oc} > 2700$ V (J/cm <sup>2</sup> );
$E_3$	3º termo da interpolação utilizado quando $V_{oc} \geq 2700$ V (J/cm <sup>2</sup> ); e
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto (tensão do sistema) (kV).

O valor da EI é definido com base no nível de tensão do sistema em análise ( $V_{oc}$ ).

Se  $0,6 < V_{oc} \leq 2,7$  kV  $\rightarrow E = E_3$ ;

Se  $V_{oc} > 2,7$  kV  $\rightarrow E = E_2$ .

Recalcule a EI, substituindo  $I_{arc}$  por  $I_{arc\_min}$ . Compare EI calculada com  $I_{arc}$  com a EI calculada com  $I_{arc\_min}$ . Se houver diferença, adote o maior valor como resultado final.

### 3.4.4 Identificação do limite do arco elétrico (AFB)

O limite do arco elétrico (*AFB - Arc-Flash Boundary*), é a distância de uma fonte de arco a qual a EI calculada resulta em 5,0 J/cm<sup>2</sup> ou 1,2 cal/cm<sup>2</sup>. Para calcular esse limite, primeiro se deve calcular os limites intermediários através das Equações (13), (14) e (15) juntamente com os itens da Tabela 17.

$$AFB_{600} = 10 \left( \frac{\left( k1 + k2 \log G + \frac{k3 I_{arc\_600}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}^1} + k11 \log I_{bf} + k13 \log I_{arc\_600} + \log \frac{1}{8CF} - \log \frac{20}{T} \right)}{-K1} \right) \quad (13)$$

$$AFB_{600} = 10^{\left( \frac{\left( k1+k2 \log G + \frac{k3 I_{arc_{600}}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}^1} + k11 \log I_{bf} + k13 \log I_{arc_{600}} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{T} \right)}{-K12} \right)} \quad (14)$$

$$AFB_{14300} = 10^{\left( \frac{\left( k1+k2 \log G + \frac{k3 I_{arc_{14300}}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}^1} + k11 \log I_{bf} + k13 \log I_{arc_{14300}} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{T} \right)}{-K12} \right)} \quad (15)$$

Em que:

$AFB_{600}$	Limite do arco para $V_{oc}$ igual a 600 V (mm);
$AFB_{2700}$	Limite do arco para $V_{oc}$ igual a 2700 V (mm);
$AFB_{14300}$	Limite do arco para $V_{oc}$ igual a 14300 V (mm);
$T$	Duração do arco (ms);
$G$	Distância entre os condutores (eletrodos) (mm);
$I_{arc_{600}}$	Corrente de arco rms para 600 V (kA);
$I_{arc_{2700}}$	Corrente de arco rms para 2700 V (kA);
$I_{arc_{14300}}$	Corrente de arco rms para 14 300 V (kA);
$I_{bf}$	Corrente de curto-circuito trifásica simétrica rms (kA);
$D$	Distância entre eletrodos e calorímetros (distância de trabalho) (mm);
$CF$	1 para a configuração HOA;
$lg$	Log10; e
$k1$ a $k13$	Coefficientes fornecidos na Tabela 17 conforme equação.

Tabela 17 – Coeficientes  $K$  para as equações (13), (14) e (15)

Coeficiente	AFB <sub>600</sub>		AFB <sub>2700</sub>		AFB <sub>14300</sub>	
	VOA	HOA	VOA	HOA	VOA	HOA
<b>k1</b>	0,679294	3,470417	3,880724	3,616266	3,405454	2,04049
<b>k2</b>	0,746	0,465	0,105	0,149	0,12	0,177
<b>k3</b>	1,222636	-0,261863	-1,906033	-0,761561	-0,93245	1,005092
<b>k4</b>	0	0	-1,557E-12	0	-1,557E-12	0
<b>k5</b>	0	0	4,556E-10	0	4,556E-10	0
<b>k6</b>	-4,783E-09	-3,895E-09	-4,186E-08	7,859E-10	-4,186E-08	7,859E-10
<b>k7</b>	0,000001962	0,000001641	8,346E-07	-1,914E-07	8,346E-07	-1,914E-07
<b>k8</b>	-0,000229	-0,000197	5,482E-05	-9,128E-06	5,482E-05	-9,128E-06
<b>k9</b>	0,003141	0,002615	-0,003191	-0,0007	-0,003191	-0,0007
<b>k10</b>	1,092	1,1	0,9729	0,9981	0,9729	0,9981
<b>k11</b>	0	0	0	0	0	-0,05
<b>k12</b>	-1,598	-1,99	-1,515	-1,639	-1,534	-1,633
<b>k13</b>	0,997	1,04	1,115	1,078	0,979	1,151

Fonte: adaptado de (IEEE, 2018).



A partir dos valores de AFB intermediárias, calcular os termos da interpolação, utilizando as equações (16), (17) e (18) para determinar  $AFB_1$ ,  $AFB_2$  e  $AFB_3$ , respectivamente.

$$AFB_1 = \frac{AFB_{2700} - AFB_{600}}{2,1} \times (V_{oc} - 2,7) + AFB_{2700} \quad (16)$$

$$AFB_2 = \frac{AFB_{14300} - AFB_{2700}}{11,6} \times (V_{oc} - 14,3) + AFB_{14300} \quad (17)$$

$$AFB_3 = \frac{AFB_1 \times (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{AFB_2 \times (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (18)$$

Em que:

$AFB_1$	1º termo da interpolação entre 600 V e 2700 V (mm);
$AFB_2$	2º termo da interpolação utilizado quando $V_{oc} > 2700$ V (mm);
$AFB_3$	3º termo da interpolação utilizado quando $V_{oc} \geq 2700$ V (mm); e
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto (tensão do sistema) (kV).

O valor de AFB é definido com base no nível de tensão do sistema em análise ( $V_{oc}$ ).

Se:  $0,6 < V_{oc} \leq 2,7$  kV  $\rightarrow$  AFB =  $AFB_3$ ;

Se:  $V_{oc} > 2,7$  kV  $\rightarrow$  AFB =  $AFB_2$ .

Recalcule a AFB substituindo  $I_{arc}$  por  $I_{arc\_min}$ . Compare AFB calculada com  $I_{arc}$  com AFB calculada com  $I_{arc\_min}$ . Se houver diferença, adote o maior valor como resultado final.

### 3.5 APLICAÇÃO DOS RESULTADOS DA EI ESTIMADA

O método de teste para determinar a capacidade dos materiais capazes de fornecer proteção ao risco dos arcos elétricos é definido pela NBR IEC 61482-1-1 (ABNT, 2017) ou pela American Society for Testing and Materials (ASTM) F1959/F1959M (2014). Como essas normas propõem a determinação da EI que o material do EPI pode suportar, a metodologia do guia tem a mesma aplicação para determinar a EI a qual um trabalhador seria exposto no caso de um arco em uma instalação elétrica especificada. Assim sendo, a EI estimada pelo cálculo do guia é o ATPV mínimo do EPI.

## 4 METODOLOGIA

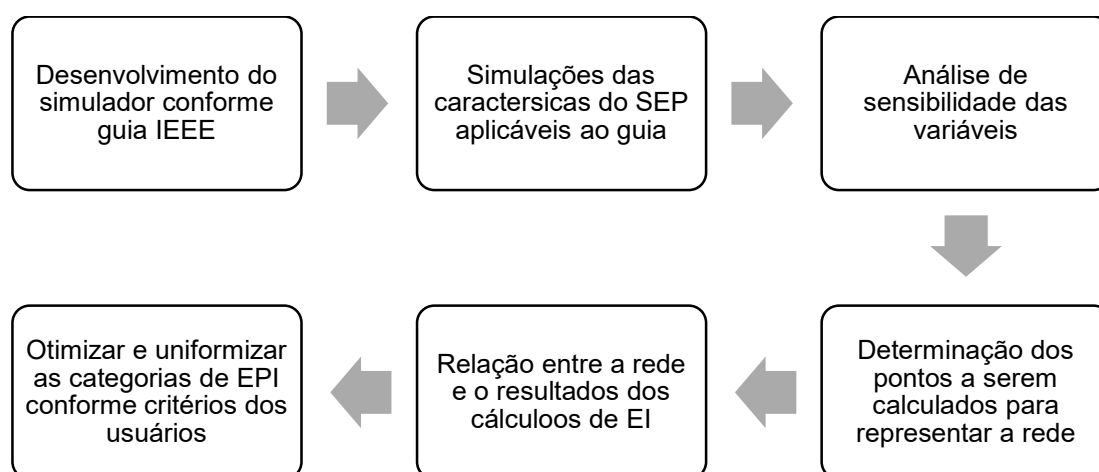
De acordo com o que foi exposto em 2.2.3 o método de seleção de EPI por tabelas resulta em seleção de EPI de forma conservadora e em alguns casos insuficientes. Em 2.2.4, o método de seleção de EPI através da estimativa de EI se aplica para condições específica de um ponto de estudo. A metodologia proposta compreende a adoção de uma sequência de etapas em que se estima a EI ao longo das redes de MT e são classificadas em categorias conforme Tabela 6.

Para se atingir a sequência de etapas do método, inúmeras simulações foram realizadas, em conformidade com as características técnicas das redes de MT brasileiras.

### 4.1 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

O método foi desenvolvido através de análises das aplicações do guia IEEE 1584 (2018) no cenário nacional. As macros etapas do desenvolvimento do método estão ilustradas na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma do desenvolvimento do método



Fonte: Autor.

#### 4.1.1 Desenvolvimento de simulador de cálculo de EI

Para realizar as análises das relações e variações dos dados que influenciam o valor da EI, foi desenvolvido um simulador de cálculo de EI no Microsoft Excel (2016), seguindo o modelamento matemático do guia IEEE 1584 (2018) para tensões acima de 600V e configurações de eletrodos (VOA e HOA).

A primeira configuração do simulador proporcionou realizar cálculo de EI e AFB de até 21.000 cenários simultaneamente. Cada cenário da simulação representa um possível ponto de trabalho, ou seja, um conjunto de características técnicas específico dentro dos parâmetros do modelo. Vinculado ao simulador, foi preparado um gráfico em escala decimal com pontos discretos para apresentação da EI resultante em intervalos de acordo com a categoria de EPI da NFPA 70E (2018).

A primeira simulação teve por objetivo avaliar os resultados da EI, variando tempo e corrente para as redes de MT. Os dados de entrada utilizados nessa simulação constam na Tabela 18.

Tabela 18 – Dados de entrada da simulação 1

Descrição	Valor	Unidade
Classificação dos eletrodos:	HOA	
Distância entre eletrodos:	254	mm
Distância de trabalho:	457,2	mm
Tensão:	13,8	kV
Corrente de falha $I_{bf}$ :	0,10 a 20	kA
Tempo de extinção do arco:	10 a 2.000	ms

Fonte: Autor.

Para essa simulação, foi adotada a variação da corrente em 100 amperes de um cenário para outro, totalizando 200 dados de entrada. Para a variação do tempo de extinção do arco foi adotada a variação de 20 ms, totalizando 100 dados de entrada. A relação entre a corrente *versus* o tempo resultou em 20.000 cenários (200x100). Cada cenário resultou em um valor de EI, esse valor está contido em um intervalo de categorias conforme Tabela 6.

A Figura 14 apresenta o gráfico gerado em escala decimal da simulação 1. Cada ponto amostral no gráfico representa um cenário, ou seja, um conjunto de características técnicas de um possível ponto de trabalho. Conforme dados de entrada

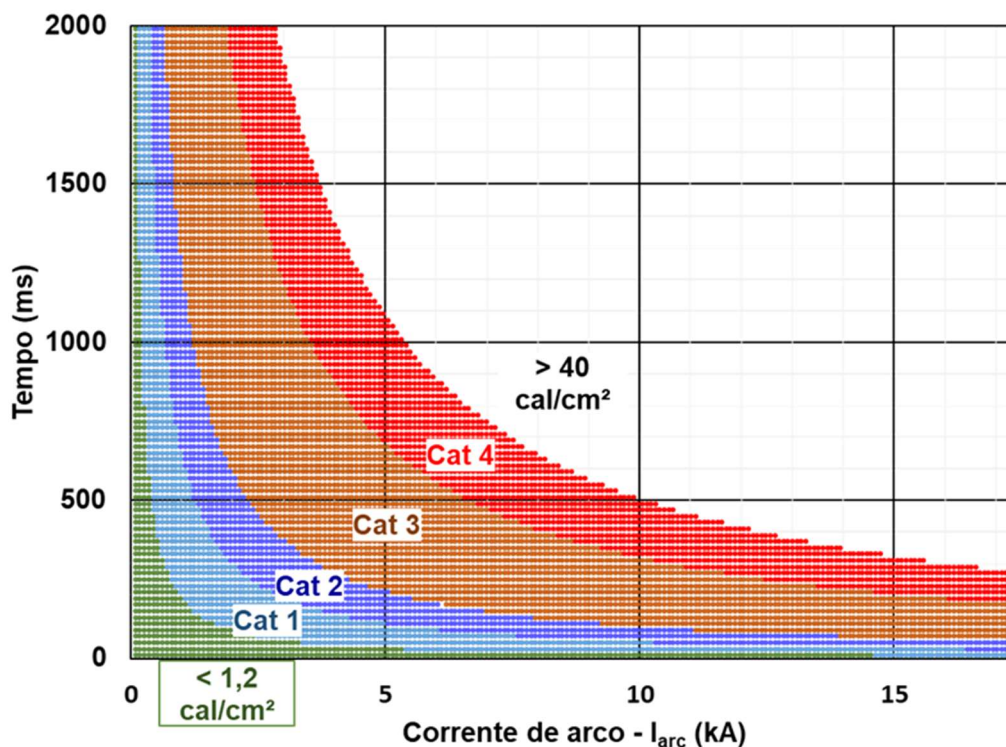
descritos na Tabela 18, nesses 20.000 cenários os parâmetros que variam de um cenário para outro são as correntes de falha e os tempos de extinção do arco. O gráfico apresentado na Figura 14 é interpretado da seguinte forma:

Parâmetros para do cenário exemplo;

- Eletrodos na configuração **horizontal**;
- Distância entre eletrodo de **254 mm**;
- Distância entre a fonte do arco e o ponto de interesse **457,2 mm**;
- Tensão do sistema é de **13,8 kV**;
- Corrente de falha **5 kA**; e
- Tempo de extinção do arco **500 ms**.

Para os valores de corrente e tempo do cenário exemplo acima, a EI resultante está contida no intervalo da categoria 3, ou seja, maior que 8 cal/cm<sup>2</sup> e menor ou igual a 25 cal/cm<sup>2</sup>, representado no gráfico como Cat 3. Em razão dos gráficos da Figura 15 e da Figura 16 terem sido plotados com os mesmos parâmetros, essa análise pode ser realizada em qualquer um deles.

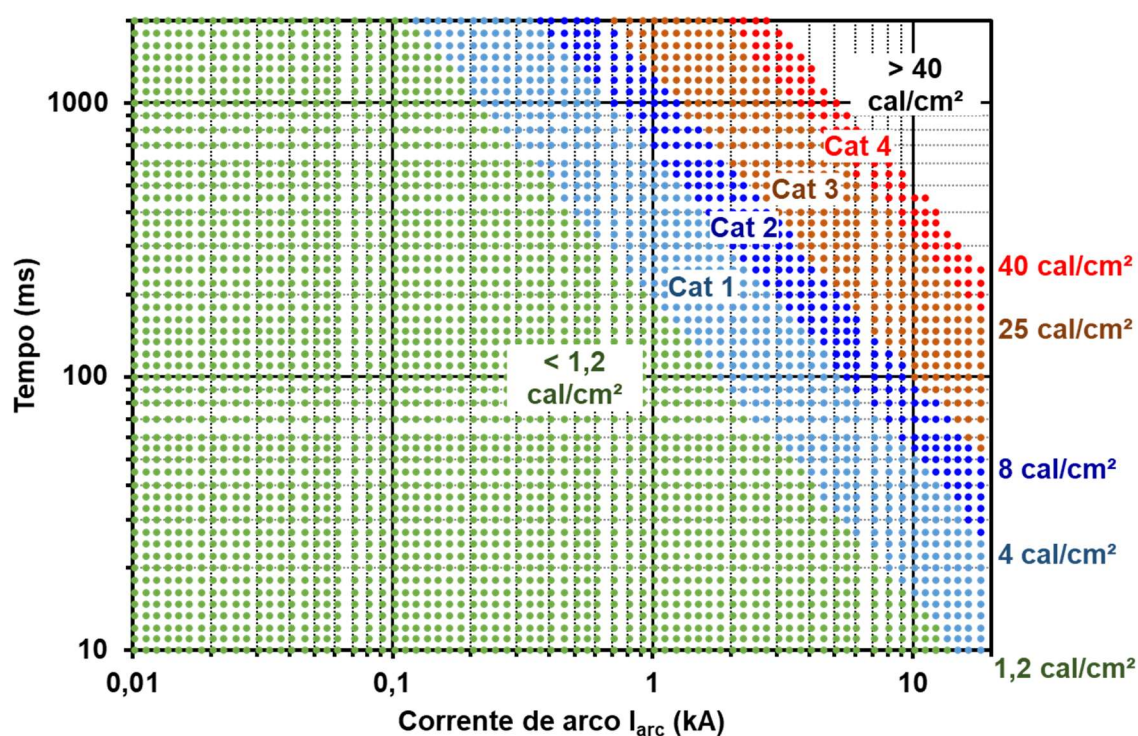
Figura 14 – Categoria de EPI conforme dados de entrada da simulação 1



Fonte: Autor.

Dada a dificuldade em estabelecer uma relação direta dos resultados da EI com as curvas de tempo *versus* corrente dos dispositivos de proteção, foi desenvolvida uma segunda configuração dos dados de entrada da corrente *versus* tempo para se viabilizar a plotagem em escala logarítmica dos pontos discretos de EI em função da sua categoria. Essa configuração dos dados reduziu para 4.312 a quantidade de cenários. Para a simulação 2, não foi alterado os limites dos dados da corrente e tempo da simulação 1, apenas alterou a quantidade de dados de entrada, 73 dados de entrada para a corrente e 52 para o tempo, resultado em 3.796 cenários.

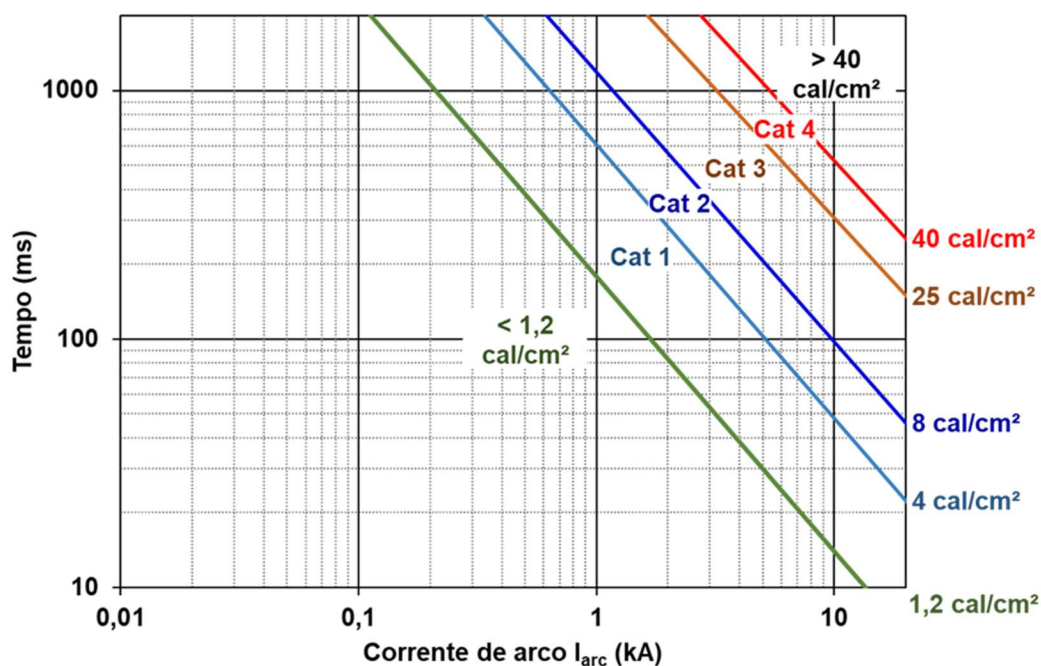
Figura 15 – Categoria de EPI conforme dados de entrada da simulação 2



Fonte: Autor.

Os resultados corroboram com os apresentados em (BROOKS, FARIED, JORNACION, 2014, 2019, 2020), podendo ser aplicados para as redes de MT. Curvas características para categoria de EPI foram elaboradas e apresentadas na Figura 16. Essas curvas irão auxiliar nas análises das curvas de correntes *versus* tempo dos dispositivos de proteção.

Figura 16 – Curva característica das categorias de EPI conforme simulação 2



Fonte: Autor.

#### 4.1.2 Análise de sensibilidade dos parâmetros de modelagem

Para o processo de desenvolvimento de modelos, a análise de correlação de parâmetros é o primeiro passo para se entender as relações entre variáveis dependentes e independentes. Neste tópico serão apresentadas as análises de sensibilidade dos dados de entrada do cenário brasileiro.

##### 4.1.2.1 Variação do nível tensão

Em 42.000 cenários elaborados na simulação 3 e 4, foi variado em cada simulação o nível de tensão em +10% e -10% em relação a tensão nominal 13,8 kV (21.000 cenários para tensão 15,18 kV e 21.000 cenários para tensão 12,42 kV). Comparando as categorias resultantes destes cenários com as categorias na tensão nominal obteve-se um aumento de categoria em 288 resultados, representando um impacto de menos de 0,7 % dos cenários. E ainda, destes 288 cenários, 6 alteraram para categoria 1 com EI aumentando em média 0,105 cal/cm<sup>2</sup>, e 39 cenários alteraram para categoria 3 com EI em média 0,7 Cal/cm<sup>2</sup> maior. Dessa forma, como a metodologia do guia IEEE orienta utilizar como dado de entrada o nível de tensão nominal, e a variação do nível de tensão não impacta significativamente no resultado

para definir a categoria, sugere-se seguir a orientação do guia, que é aplicar a tensão nominal do sistema, porém, não havendo impedimento em utilizar o nível de tensão medido no sistema em estudo.

Foi realizado um segundo conjunto de 3 simulações resultando em 11.388 cenários (simulação 5, 6 e 7), variando a tensão nominal do sistema em 6 kV, 11,9 kV e 13,8 kV. O objetivo foi comparar as curvas características das categorias de EPI em função do nível de tensão. Conforme apresentado na Tabela 19 os resultados do cálculo de EI variam em menos de 5% na relação entre 13,8 kV e 6kV. A Figura 17 ilustra essas variações demonstrando que à medida em que a corrente de arco aumenta a diferença entre os resultados de EI diminuem, permitindo concluir que a cada variação da tensão nominal, uma nova curva deve ser projetada.

Tabela 19 – Relações entre  $I_{arc} \setminus I_{bf}$  e EI para as tensões de 13,8; 11,9 e 6 kV

Parâmetro	Dado de entrada	Resultados
Corrente de curto circuito $I_{bf}$	11 A a 24.293 A	
Corrente de arco calculada $I_{arc}$	10 A a 20000 A	
Tempo de extinção do arco	10 ms a 2000 ms	
Distância entre eletrodos	254 mm	
Distância de Trabalho	457,2 mm	
Tensão da fonte trifásica	6; 11,9; 13,8 kV	
$I_{arc} \setminus I_{bf}$ em 13,8 kV		85,64% a 89,45%
$I_{arc} \setminus I_{bf}$ em 11,9 kV		84,60% a 89,45%
$I_{arc} \setminus I_{bf}$ em 6 kV		84,60% a 87,71%
EI de 13,8 kV \ EI de 11,9 kV		101,05% a 103,59 %
EI de 13,8 kV \ EI de 6 kV		104,44% a 116,59 %

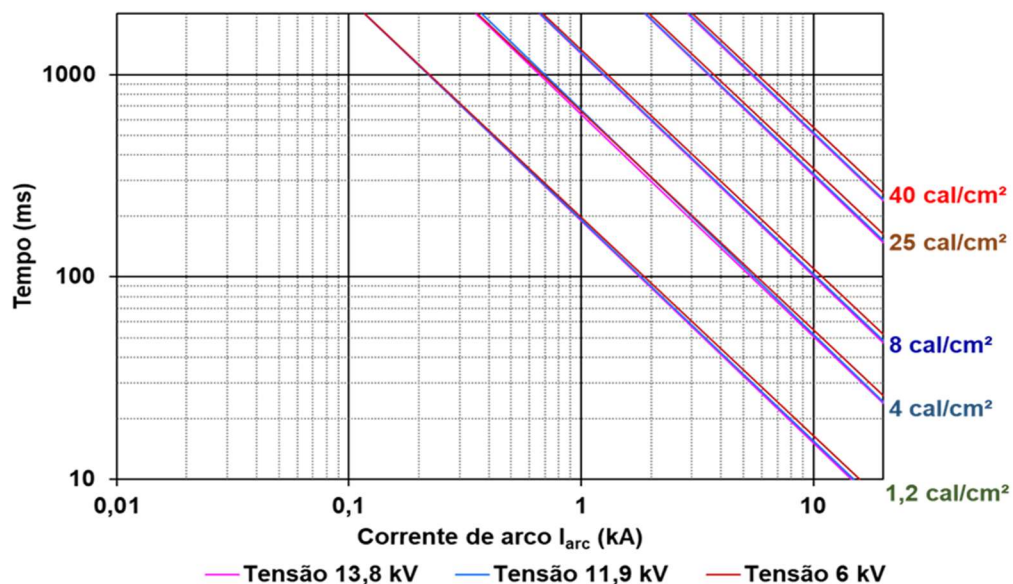
Fonte: Autor.

#### 4.1.2.2 Variação da distância entre eletrodos

Em 60.000 cenários elaborados nas simulações 8, 9 e 10, onde, além das variações de corrente de curto-circuito e tempo de extinção do arco, para cada simulação uma das 3 distâncias entre eletrodos conforme intervalo previsto na metodologia IEEE (19,05 mm; 136,5 mm; e 254 mm), resultaram em 1.742 a mudança de categoria, representando mais de 2,7 % do total de cenários calculados.



Figura 17 – Curva características das categorias de EPI variando tensão



Fonte: Autor.

Como a metodologia do guia IEEE prevê se valer da distância real do cenário estudado, quanto maior a distância, maior o resultado de EI, e como as instalações de rede de distribuição possuem variações de distâncias entre eletrodos maiores que as apresentadas no Guia IEEE, sugere-se utilizar a maior distância prevista guia, ou seja 254 mm, que é inferior ao maior afastamento previsto em 2.1.1.

#### 4.1.2.3 Variação na configuração dos eletrodos

Em 21.000 cenários (simulação 1), variando  $I_{bf}$  de 100 a 20.000 A, e tempo de extinção do arco de 10 a 2.000 ms, o resultado de EI para os eletrodos na horizontal (HOA) é em média 2,25 vezes maior que os resultados se os eletrodos estivessem na vertical (VOA), variando entre 1,29 a 2,54 vezes. Como nas redes de distribuição se tem eletrodos em dois sentidos, sendo que em sua maioria horizontal, sugere-se utilizar como parâmetro eletrodos na horizontal (HOA).



#### 4.1.2.4 Variação da distância de trabalho

O escopo da metodologia é para atividades de LV ao contato, ou seja, o profissional entrar em contato mecanicamente com partes energizadas. Nesse caso, conforme retratado no item 2.2, a recomendação é utilizar a distância de 457,2 mm.

No capítulo 3, foi apresentada a metodologia para identificar a distância em que o resultado da EI é igual ou inferior a  $1,2 \text{ cal/cm}^2$  (AFB), para os casos em que se pretenda alterar a técnica de trabalho de contato para a técnica de trabalho à distância e dispensar o uso de EPI específico para risco térmico.

Ainda que não seja o escopo do trabalho identificar as distâncias limite de arco elétrico (AFB), utilizando os 11.388 cenários realizados nas variações de tensão de 6kV; 11,9 kV e 13,8 kV (simulações 5, 6 e 7), foram extraídos das simulações os resultados das distâncias mínimas para cada categoria de EPI e apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 – Distâncias mínimas por categoria para EI resultante  $<1,2 \text{ cal/cm}^2$

Parâmetro	Dado de entrada	13,8 kV	11,9 kV	6 kV
Corrente de curto circuito $I_{bf}$	11 A a 24.293 A			
Corrente de arco calculada $I_{arc}$	10 A a 20000 A			
Tempo de extinção do arco	10 ms a 2000 ms			
Distância entre eletrodos	254 mm			
Distância de Trabalho	457,2 mm			
Tensão da fonte trifásica	6; 11,9; 13,8 kV			
<b>AFB Categoria <math>&lt;1,2 \text{ cal/cm}^2</math></b>		455 mm	455 mm	455 mm
<b>AFB Categoria 1</b>		954 mm	954 mm	953 mm
<b>AFB Categoria 2</b>		1.460 mm	1.457 mm	1.455 mm
<b>AFB Categoria 3</b>		2.935 mm	2.922 mm	2.902 mm
<b>AFB Categoria 4</b>		3.909 mm	3902 mm	3888 mm

Fonte: Autor.

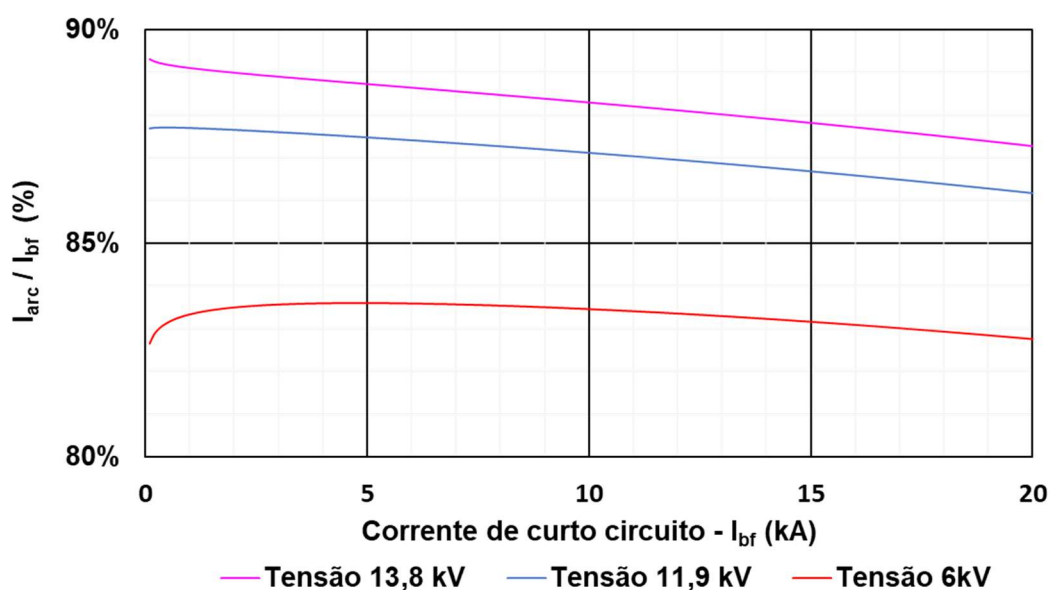
#### 4.1.2.5 Variação da corrente de arco e de arco reduzida

A corrente de curto-circuito e o tempo de extinção do arco são os dois dados que possuem maior variação ao longo das redes de distribuição de MT. A  $I_{bf}$  varia segundo a impedância da rede, e o tempo de extinção do arco depende das curvas

de corrente *versus* tempo dos dispositivos de proteção adotados. Para aplicação da metodologia proposta, deve-se identificar cada dispositivo de proteção, suas curvas de atuação, e através da  $I_{bf}$  e  $V_{oc}$ , calcular a  $I_{arc}$  e  $I_{arc\_min}$  e identificar o tempo de extinção do arco com limite superior em 2.000 ms, que é considerado o tempo máximo de resposta que um ser humano tem para se afastar de um arco.

Conforme equacionamentos apresentados em 3.4.1 e 3.4.2, os dados de entrada que influenciam a  $I_{arc}$  e  $I_{arc\_min}$  são  $I_{bf}$  e  $V_{oc}$ . Para analisar as influências destas variáveis foram calculados 200 cenários (simulação 11, 12 e 13) para cada nível de tensão (6kV, 11,9 kV e 13.8 kV), variando  $I_{bf}$  em 100 amperes em cada cenário (100 à 20.000 A). Os resultados dos cálculos são apresentados na Figura 18. Como a  $I_{arc\_min}$  é calculado através da aplicação de um fator de até 3% sobre  $I_{arc}$ , seus resultados não foram inseridos no gráfico.

Figura 18 – Relação entre corrente de curto-circuito ( $I_{bf}$ ) e corrente de arco ( $I_{arc}$ )



Fonte: Autor.

## 4.2 METODOLOGIA PROPOSTA

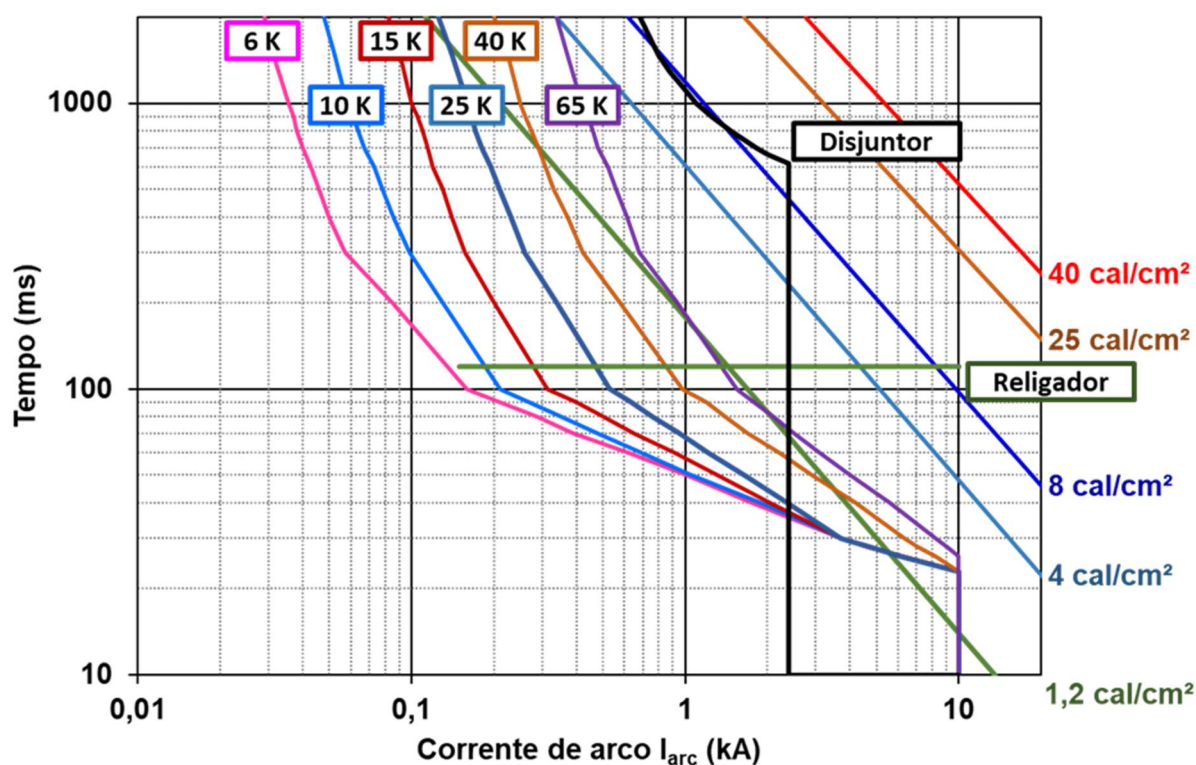
### 4.2.1 Identificação dos pontos para cálculo de EI

Em virtude de o tempo de arco estar relacionado com corrente de falha franca do sistema e das especificações dos dispositivos de proteção, para determinar o

tempo de extinção do arco da rede elétrica é necessário conhecer o intervalo da corrente de falha submetido a cada dispositivo de proteção.

Na Figura 19 são apresentados 3.796 cenários (simulação 2) segregados em categorias de EPI de acordo com a relação entre  $I_{arc}$  e o tempo de extinção do arco. Foram sobrepostas as curvas lentas dos elos preferenciais (6, 10, 15, 25, 40 e 65K), um ajuste de religador e um ajuste de relé. Essa sobreposição permite visualizar de forma macro a relação da atuação desses dispositivos de proteção *versus* as categorias de EPI e determinar quantos pontos característicos no mínimo devem ser calculados a EI para selecionar a categoria de EPI.

Figura 19 – Relações entre corrente de arco ( $I_{arc}$ ), tempo e Energia Incidente

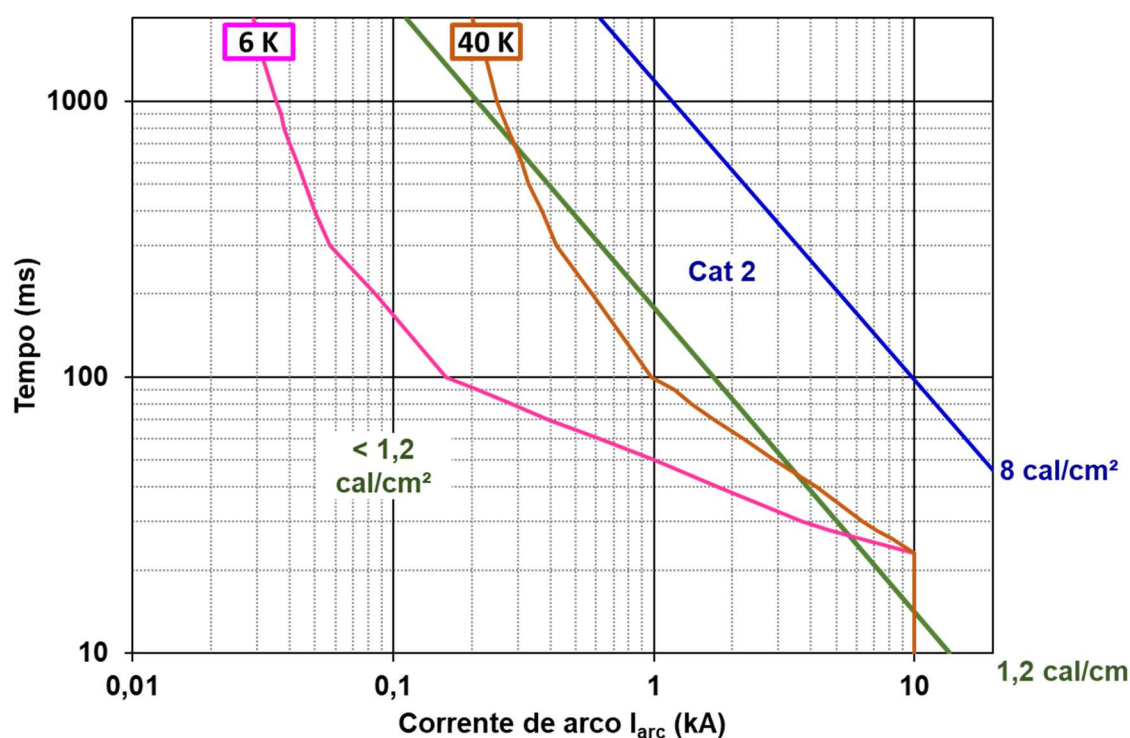


Fonte: Autor.

Como o objetivo do método é classificar as redes em qualquer uma das categorias possíveis (<1,2 cal/cm<sup>2</sup>, 1, 2, 3 e 4) e, ao observar que, independente do dispositivo de proteção, cada curva de tempo *versus* corrente pode ser classificada em mais de uma categoria, o trecho mínimo a ser calculado a EI é o que está compreendido entre dois dispositivos de proteção (zona de proteção).

Ao confrontar as curvas características das categorias dos EPI com as curvas dos elos (Figura 20), pode-se fazer a análise de quantos pontos são necessários calcular a EI para se certificar que se está adotando o maior valor. Ao analisar a curva lenta do elo 6 K, observa-se que, apenas em correntes de arco acima 6,5 kA do trecho que está sob supervisão do elo possui EI resultante maior que 1,2 cal/cm<sup>2</sup>, nesse caso, bastaria calcular a EI no ponto de maior corrente. Porém, quando se observa a curva lenta do elo 40K, constata-se que a EI resultante alterna entre as categorias - menor que 200 amperes resulta em categoria 1, intervalo entre 200 e 2.000 A a EI resultante menor que 1,2 cal/cm<sup>2</sup>, e correntes maiores de 2.000 A novamente categoria 1, portanto, neste caso, apenas um ponto do circuito não basta para estimar a maior EI resultante com precisão. Contudo, se for estimada a EI no ponto de maior e de menor corrente de curto-circuito, e adotar a maior EI resultante, não haverá a hipótese de uma EI resultante maior em algum outro ponto no circuito.

Figura 20 – Relação entre curva lenta dos elos 6 e 40K, e a curva de categoria

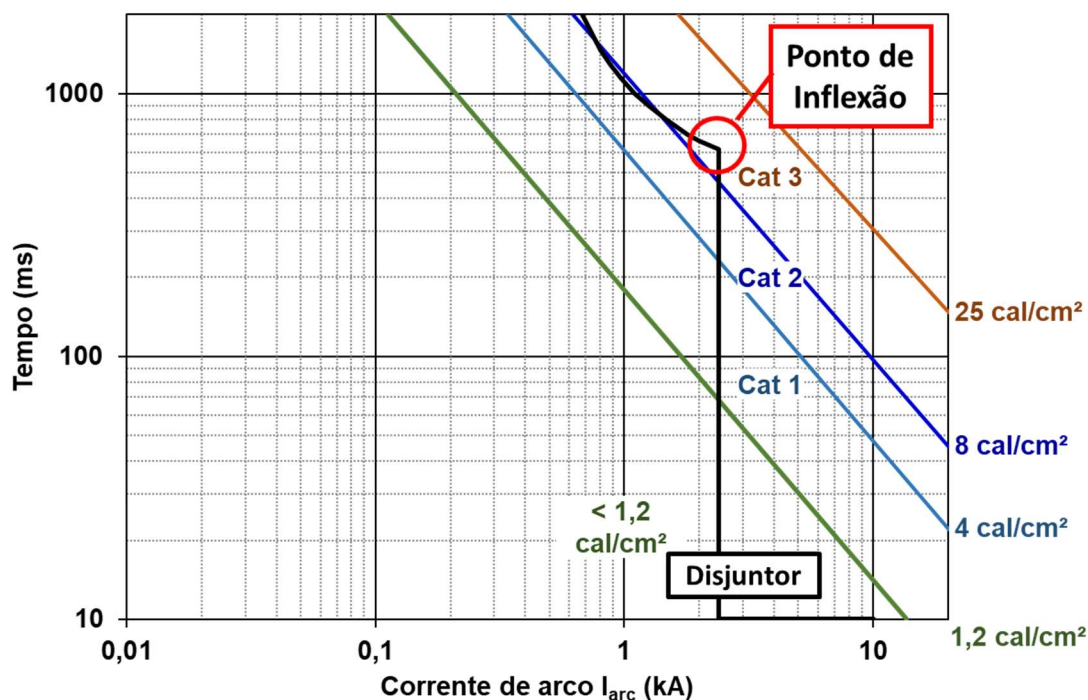


Fonte: Autor.

Para os dispositivos com ajuste de curva como o religador e disjuntor, mais de dois pontos podem ser necessários para calcular a EI. Além da maior e da menor corrente da zona de proteção do dispositivo, deve-se verificar se no intervalo entre a

maior e a menor corrente, a curva do dispositivo de proteção não passa por algum ponto de inflexão. A Figura 21 ilustra essa condição. Pode-se observar que a curva de atuação desse dispositivo resulta em vários resultados de EI, desde menor que 1,2 cal/cm<sup>2</sup> até categoria 3.

Figura 21 – Ponto de inflexão em uma curva de disjuntor



Fonte: Autor.

Nesses casos deve ser calculada a EI também no ponto de inflexão identificado e comparado com os resultados de maior e menor corrente do trecho, adotando como resultado final o maior valor de EI. Por exemplo, se por algum motivo, um trecho de rede possui corrente de curto-circuito entre 1,2 e 3 kA, e a curva do dispositivo de proteção é a do disjuntor ilustrado na Figura 21, a categoria de EPI na maior corrente é <1,2 cal/cm<sup>2</sup> e a na menor corrente é categoria 2, porém na corrente de 2,4 kA a categoria resultante é 3. Nessa situação, toda a zona de proteção deve ser classificada na categoria 3.

#### **4.2.2 Cálculo de EI e classificação em categoria**

Até este ponto foi adotada a metodologia descrita no guia IEEE para analisar a influência dos dados de entrada no resultado do cálculo de EI, porém outros métodos podem ser utilizados para se chegar ao resultado da EI.

#### **4.2.3 Determinação da categoria por trecho**

Depois de identificadas as categorias de acordo com a corrente mínima e máxima e dos pontos de inflexão (se for o caso) de cada trecho, deve-se adotar a maior categoria resultante. Por exemplo: de acordo com a Figura 19, um trecho protegido por um elo de 65K pode ter como maior corrente de  $I_{bf}$  1.000 A, o ponto dessa corrente é classificado sem risco térmico ( $< 5\text{J}/\text{cm}^2$ ), e o ponto com menor corrente de  $I_{bf}$  pode ser de 500 A, esse ponto do trecho é classificado como categoria 1. Nessa situação, todo o trecho é classificado como categoria 1.

#### **4.2.4 Uniformização dos resultados**

A última etapa da metodologia é a uniformização dos resultados. Além das análises dos resultados das categorias por trechos, outras análises podem ser realizadas para uniformizar ainda mais as categorias. As mesmas investigações de categoria por trecho podem ser expandidas para: alimentador, subestações ou conjunto de subestações. Adicionalmente, a reavaliação, do estudo de proteção, pode ser realizada, visando a redução de categoria através da realocação dos dispositivos ou ajuste nas curvas de atuação. Esse último de forma permanente ou temporária.

## 5 ESTUDO DE CASO

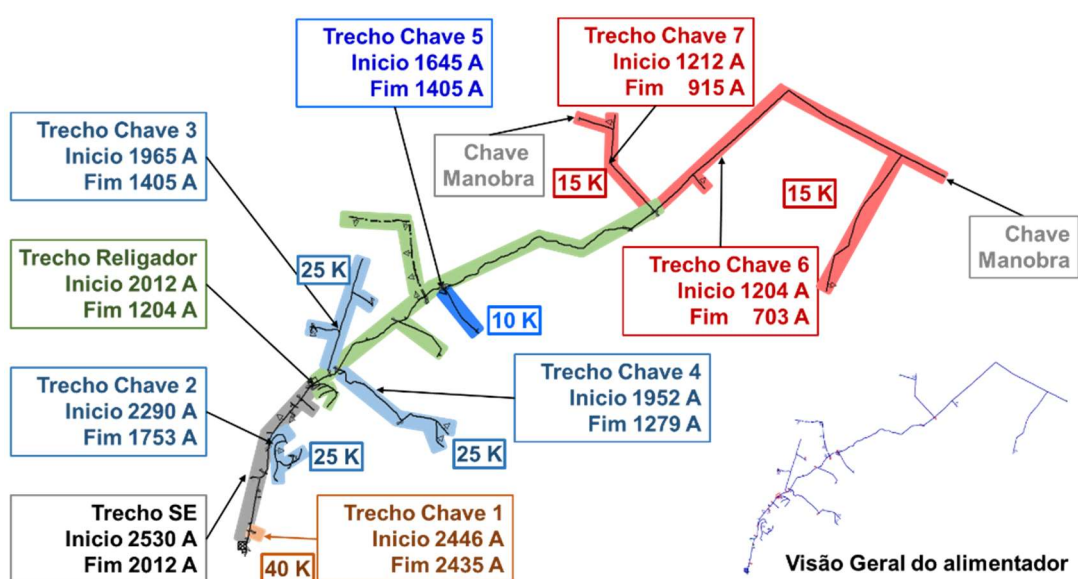
### 5.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO

A aplicação do método será realizada em um alimentador com aproximadamente 20 km de extensão. Esse alimentador permite demonstrar todas as etapas da metodologia desenvolvida, aplicando cada uma de suas especificidades. Isso se dá por suas características de: extensão, particularidades dos componentes de proteção e configuração da rede. Para este estudo de caso será calculada a EI segundo o guia IEEE 1584 (2018).

#### Etapa 1: Identificação dos dados técnicos

O alimentador escolhido possui nove dispositivos de proteção de sobrecorrentes. Um disjuntor na subestação, um religador e sete chaves fusível protegendo os ramais de derivação. Identificar as correntes de curto-circuito  $I_{bf}$  no início e final dos trechos de cada equipamento de proteção. Nos casos em que há várias terminações de ramais de um mesmo equipamento de proteção, será adotado o menor valor. A Figura 22 ilustra a distribuição dos dispositivos de proteção ao longo do alimentador bem como as correntes de curto-circuito.

Figura 22 – Trechos de atuação dos dispositivos de proteção e a  $I_{bf}$



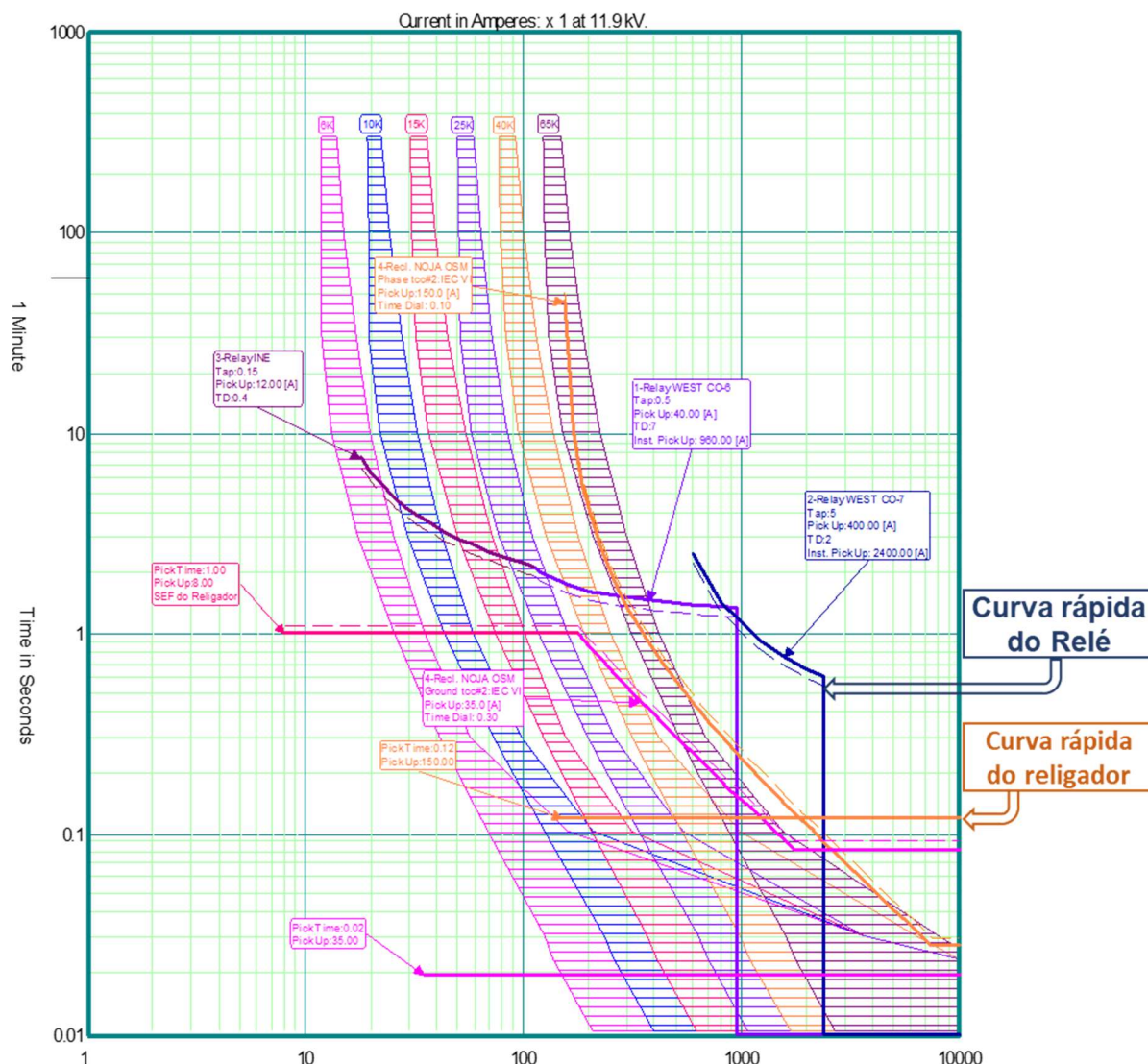
Fonte: Autor.



## Etapa 2: Identificação dos pontos e tempo de extinção do arco

Ao avaliar as curvas de proteção do religador e do disjuntor apresentados na Figura 23, concluiu-se que é necessário identificar a EI para as correntes de início e final do trecho.

Figura 23 – Coordenograma dos relés, religador e elos fusíveis



Fonte: Autor.

Para identificar os tempos de extinção do arco, é necessário calcular a corrente de arco e corrente de arco reduzida prevista no guia IEEE 1584 (2018). Deve-se identificar as curvas lentas de cada elo, e como as atividades em rede energizadas são realizadas, excluindo o religamento automático, identifica-se os tempos da



primeira curva dos equipamentos que normalmente são as mais rápidas. A Tabela 21 apresenta, a partir do local do trecho, a  $I_{bf}$ , as  $I_{arc}$  e  $I_{arc\_min}$  calculadas, e o tempo de atuação da proteção para estas correntes.

Tabela 21 – Equipamentos de proteção, correntes e tempo de extinção do arco

Equipamento de proteção	Local do trecho	$I_{bf}$ (kA)	$I_{arc}$ (kA)	Tempo (ms)	$I_{arc\_min}$ (kA)	Tempo (ms)
Relé	Início	2,53	2,22	635	1,79	700
	Fim	2,01	1,76	710	1,39	710
Religador	Início	2,01	1,76	120	1,39	120
	Fim	1,20	1,05	120	0,79	120
Chave 1 Elo 40 K	Início	2,45	2,15	60	1,73	69
	Fim	2,43	2,13	65	1,71	70
Chave 2 Elo 25 K	Início	2,29	2,01	42	1,60	51
	Fim	1,75	1,53	52	1,19	60
Chave 3 Elo 25 K	Início	1,96	1,72	50	1,35	57
	Fim	1,40	1,23	60	0,94	70
Chave 4 Elo 25 K	Início	1,95	1,71	50	1,34	57
	Fim	1,27	1,11	63	0,84	74
Chave 5 Elo 10 K	Início	1,64	1,44	45	1,11	49
	Fim	1,40	1,23	55	0,94	53
Chave 6 Elo 15 K	Início	1,20	1,05	55	0,79	64
	Fim	0,70	0,61	70	0,44	80
Chave 7 Elo 15 K	Início	1,21	1,06	55	0,80	64
	Fim	0,91	0,80	65	0,58	75

Fonte: Autor.

### Etapa 3: Cálculo de EI e classificação dos trechos em categorias

a) Dados fixos:

- Tensão = **11,9 KV**;
- Posição dos eletrodos = **Horizontal**;
- Distância entre eletrodos = **254 mm**; e
- Distância de Trabalho = **457,2mm (18 pol.)**.

b) Dados variáveis conforme posição no trecho:

- Variação da corrente de arco = Tabela 21; e
- Variação do tempo de extinção do arco = Tabela 21.

Aplicando-se as equações e orientações do guia IEEE 1584 (2018) se obtém os valores de EI estimada. Com esses valores se pode classificar os trechos em categorias conforme Figura 19. Os valores da EI, bem como a classificação dos trechos em categorias, são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – EI estimada e classificação de categorias dos trechos

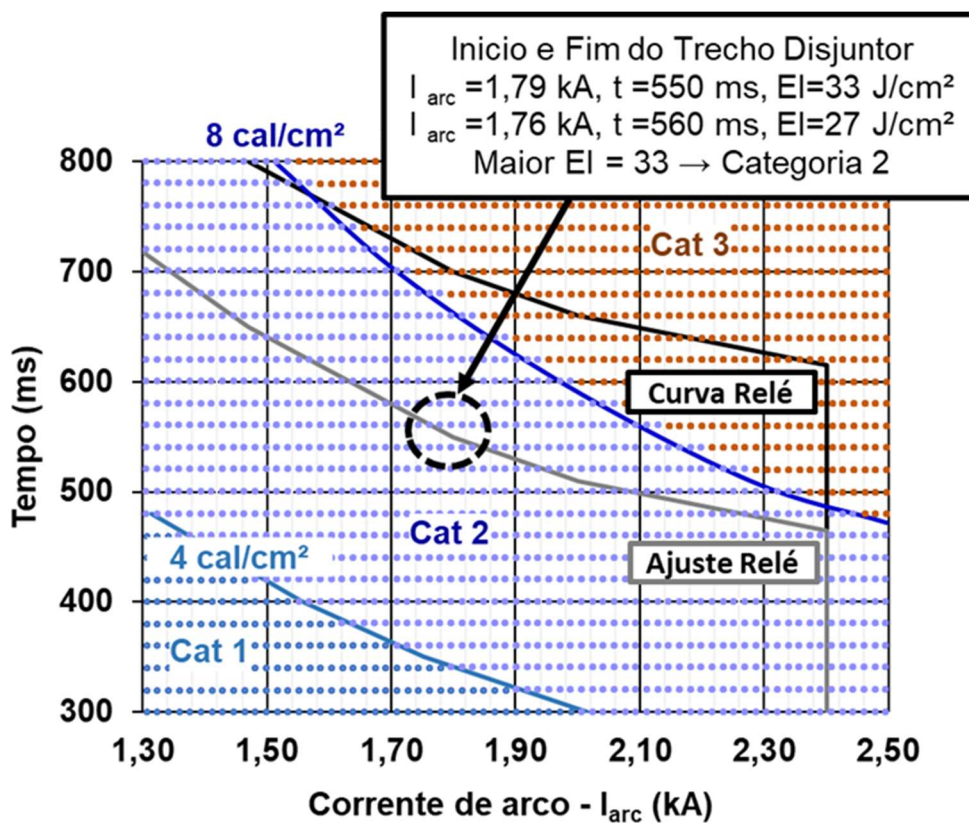
Equipamento	Ponto no trecho	EI ( J/cm <sup>2</sup> )	Categoria	
			Ponto	Trecho
Disjuntor	Início	41,70	3	3
	Fim	34,40	3	
Religador	Início	5,80	1	1
	Fim	3,30	< 5 J/cm <sup>2</sup>	
Chave 1	Início	4,00	< 5 J/cm <sup>2</sup>	< 5 J/cm <sup>2</sup>
Elo 40 K	Fim	4,00	< 5 J/cm <sup>2</sup>	
Chave 2	Início	2,70	< 5 J/cm <sup>2</sup>	< 5 J/cm <sup>2</sup>
Elo 25 K	Fim	2,40	< 5 J/cm <sup>2</sup>	
Chave 3	Início	2,60	< 5 J/cm <sup>2</sup>	< 5 J/cm <sup>2</sup>
Elo 25 K	Fim	2,20	< 5 J/cm <sup>2</sup>	
Chave 4	Início	2,60	< 5 J/cm <sup>2</sup>	< 5 J/cm <sup>2</sup>
Elo 25 K	Fim	2,10	< 5 J/cm <sup>2</sup>	
Chave 5	Início	1,80	< 5 J/cm <sup>2</sup>	< 5 J/cm <sup>2</sup>
Elo 10 K	Fim	1,80	< 5 J/cm <sup>2</sup>	
Chave 6	Início	1,70	< 5 J/cm <sup>2</sup>	< 5 J/cm <sup>2</sup>
Elo 15 K	Fim	1,20	< 5 J/cm <sup>2</sup>	
Chave 7	Início	2,00	< 5 J/cm <sup>2</sup>	< 5 J/cm <sup>2</sup>
Elo 15 K	Fim	1,00	< 5 J/cm <sup>2</sup>	

Fonte: Autor.

#### Etapa 4: Análise para alterar categorias

A primeira análise a ser realizada consiste na possibilidade de revisar o estudo de proteção para diminuir a categoria do trecho protegido pelo disjuntor. A proposta avaliada é deixar a curva do equipamento 150 ms mais rápida. Ao recalcular a EI com esse novo tempo de extinção do arco, constatou-se que o valor da EI calculada proporcionou reclassificar o trecho para categoria 2.

Figura 24 – Ajuste na curva do relé de para reduzir a categoria



Fonte: Autor.

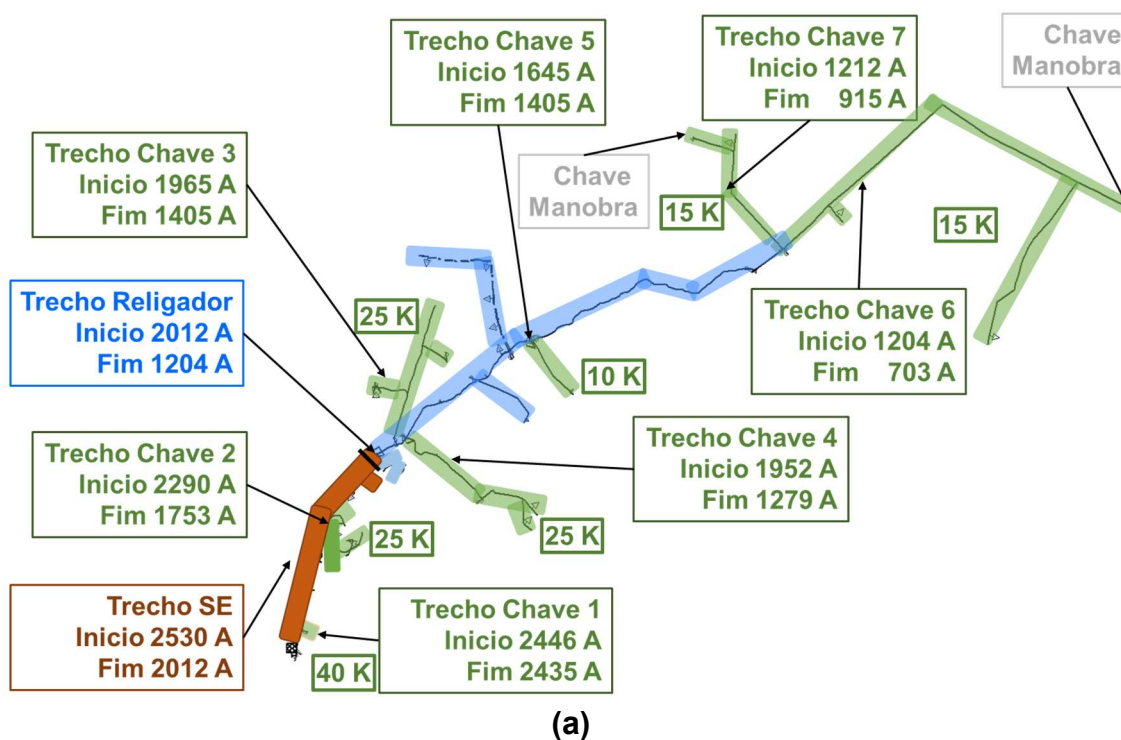
Outra análise realizada é aumentar a classificação do trecho protegido pelo religador de categoria 1 para 2. Segundo fabricantes de EPI, a categoria 2 de EPI é a mais difundida no setor elétrico, então, se os trabalhadores estão adequados a categoria 2, é razoável classificar as redes em categoria 2. Os trechos protegidos por elos fusíveis que tiveram a EI estimada abaixo de  $5 \text{ J/cm}^2$ , cabe a discussão se não poderia ser flexibilizado o uso de balaclava, uma vez que esse equipamento gera muito desconforto e descontentamento por parte dos trabalhadores, principalmente, quando a temperatura ambiente passa dos  $30^\circ \text{ Celsius}$ . A Tabela 23 apresenta os valores finais da EI e as categorias de cada equipamento de proteção. A Figura 25 (a) e (b) ilustra no alimentador como eram as categorias antes e depois de suas reavaliações.

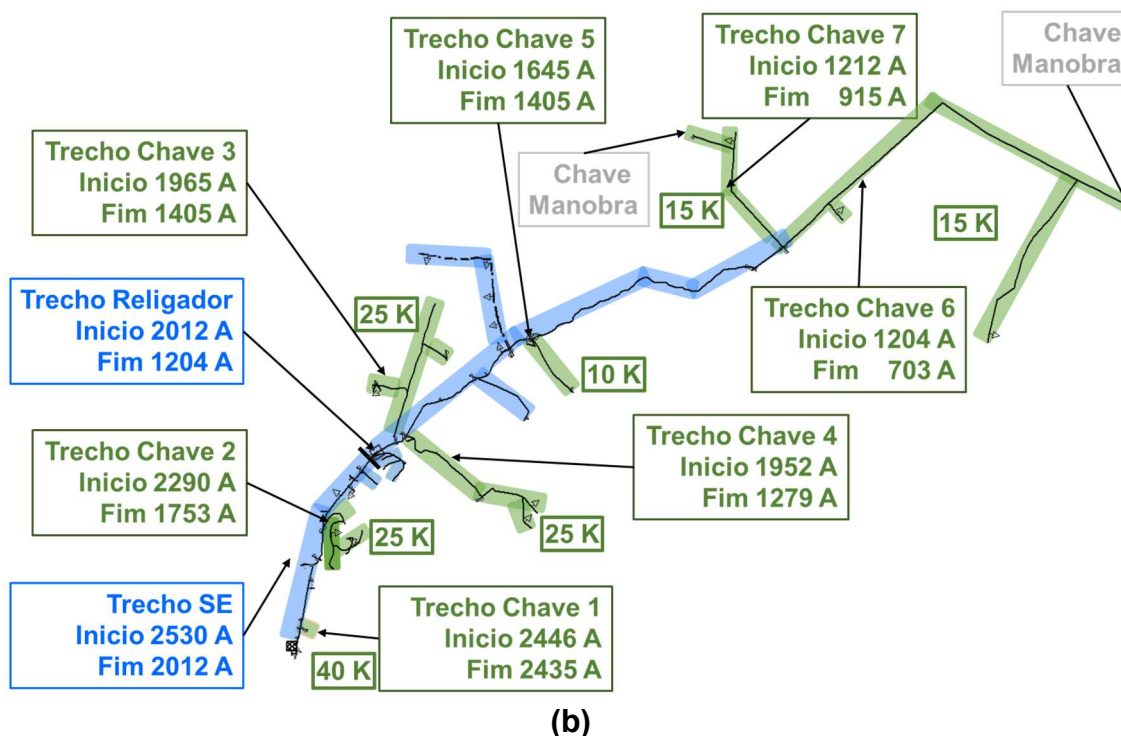
Tabela 23 – EI estimada e classificação de categorias dos trechos revisada

Equipamento	Ponto no trecho	EI ( J/cm <sup>2</sup> )	Categoria	
			Ponto	Trecho
Disjuntor	Início	32,70	2	2
	Fim	26,90	2	
Religador	Início	5,80	1	2
	Fim	3,30	< 5 J/cm <sup>2</sup>	
Chave 1	Início	4,00	< 5 J/cm <sup>2</sup>	< 5 J/cm <sup>2</sup>
Elo 40 K	Fim	4,00	< 5 J/cm <sup>2</sup>	
Chave 2	Início	2,70	< 5 J/cm <sup>2</sup>	< 5 J/cm <sup>2</sup>
Elo 25 K	Fim	2,40	< 5 J/cm <sup>2</sup>	
Chave 3	Início	2,60	< 5 J/cm <sup>2</sup>	< 5 J/cm <sup>2</sup>
Elo 25 K	Fim	2,20	< 5 J/cm <sup>2</sup>	
Chave 4	Início	2,60	< 5 J/cm <sup>2</sup>	< 5 J/cm <sup>2</sup>
Elo 25 K	Fim	2,10	< 5 J/cm <sup>2</sup>	
Chave 5	Início	1,80	< 5 J/cm <sup>2</sup>	< 5 J/cm <sup>2</sup>
Elo 10 K	Fim	1,80	< 5 J/cm <sup>2</sup>	
Chave 6	Início	1,70	< 5 J/cm <sup>2</sup>	< 5 J/cm <sup>2</sup>
Elo 15 K	Fim	1,20	< 5 J/cm <sup>2</sup>	
Chave 7	Início	2,00	< 5 J/cm <sup>2</sup>	< 5 J/cm <sup>2</sup>
Elo 15 K	Fim	1,00	< 5 J/cm <sup>2</sup>	

Fonte: Autor.

Figura 25 – Resultado da aplicação da metodologia





Fonte: Autor.

## 5.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 19 informa as curvas características de tempo *versus* corrente de arco, o que pode resultar em categorias distintas dentro da mesma zona de atuação da proteção, justificando analisar individualmente cada zona de proteção das redes de MT. Conforme análise da curva de atuação do relé na etapa 4 do case, é possível diminuir a categoria para o patamar pretendido apenas alterando o tempo de atuação da proteção em dispositivos com curvas ajustáveis. Essa alteração pode ser realizada, temporariamente, para a execução de uma atividade específica ou através de uma reavaliação do estudo de proteção. Depois de conhecidas as categorias dos trechos, pode-se reclassificá-los, aumentando as categorias para uniformizar a classificação e simplificar a operacionalização.

Dispositivos de proteção com curvas ajustáveis, como religadores, disjuntores, relés, têm curvas de atuação que podem transitar entre todas as categorias, portanto, deve-se estar atento para identificar os pontos de inflexão, e calcular EI quantos pontos forem necessários para identificar eventuais mudanças de categorias nos valores intermediários entre o início e o fim do trecho. Para identificar a categoria de um trecho de rede sob a proteção de elo fusível, no mínimo calcular a EI em dois pontos, no início e no fim do trecho, e adotar o maior valor de EI como resultado para

o trecho. Analisando as curvas de categoria da Figura 19, é possível observar que há alguns “comportamentos” padronizados na relação de atuação dos elos e as categorias:

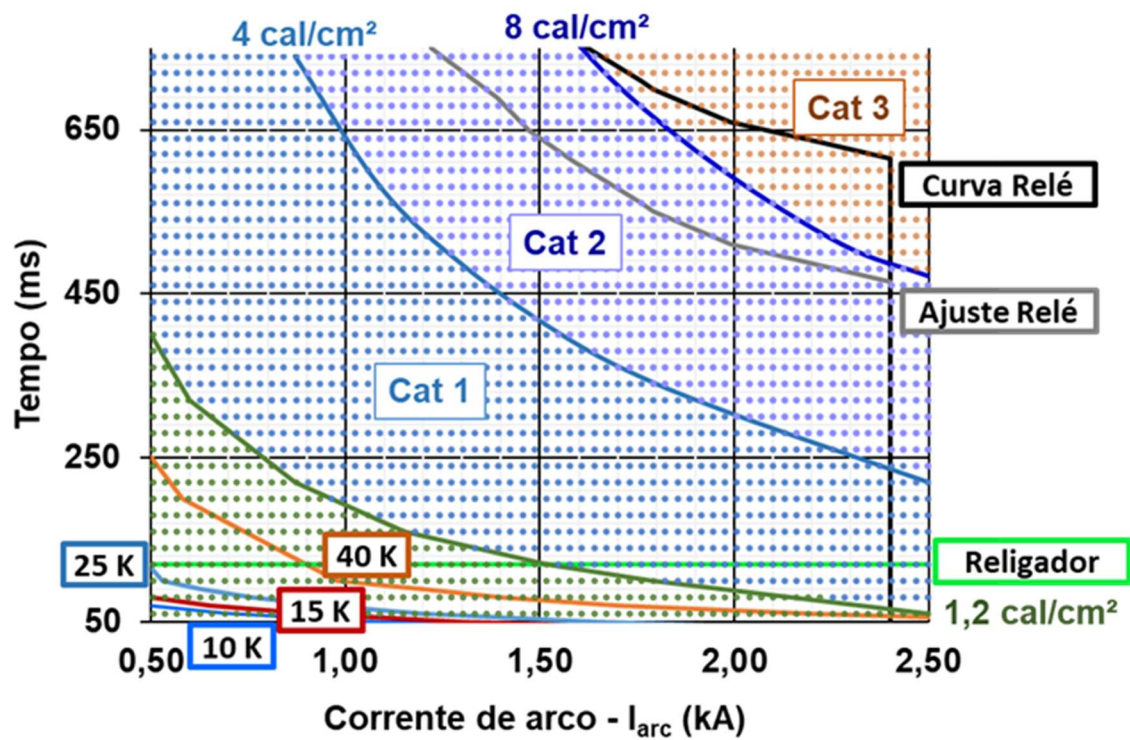
- a) Trechos com elos 6, 10, 15, 25, 40 e 65 K até o tempo de até 2 segundos possuem resultado de  $EI < 33,5 \text{ J/cm}^2$ , ou seja, categoria 2;
- b) Trechos com elos 40 e 65 K conforme  $I_{arc}$  calculada pode ter resultado de EI menor ou maior que  $5 \text{ J/cm}^2$ , independente se no início ou no fim do trecho;  
e
- c) Trechos com elos 6, 10, 15 e 25 K com  $I_{bf} < 6,5 \text{ kA}$  e tempo de até 2 segundos possuem resultado de  $EI < 5 \text{ J/cm}^2$ .

A OSHA (2020) não exige que o empregador calcule a EI para cada atividade de LV, sugerindo que o empregador pode fazer estimativas amplas que abranjam várias áreas do sistema, desde que representem a exposição máxima dos funcionários para essas áreas. Ainda assim, o exemplo dado pela OSHA de que o empregador pode estimar a EI no início de um alimentador radial e usar essa estimativa para todos os trabalhos executados nesse sistema radial, mostrou-se inadequado, podendo conduzir o empregador a realizar um sub ou superdimensionamento.

Para se certificar que a quantidade de pontos calculados foi suficiente para garantir a correta classificação em categoria, foi realizada uma nova simulação de mais de 2.700 cálculos de EI dentro dos limites de corrente de arco elétrico e tempo de extinção de arco do alimentador. Os resultados foram plotados em escala decimal que consta na Figura 26. Sobreposta a plotagem de corrente de arco *versus* tempo foram inseridas as curvas dos dispositivos de proteção. Pode-se observar que a curva inicial do disjuntor (na cor preta), nos intervalos de corrente de arco e corrente de arco reduzida, estava na região de categoria 3, com o ajuste da proteção (na cor azul) ficou totalmente na região da categoria 2. Também se pode observar que, na curva do religador, para a corrente no início do trecho (mais alta) a região é de categoria 1 e para a corrente mais baixa a região é  $EI < 5 \text{ J/cm}^2$ .



Figura 26 – Certificação da classificação das categorias



Fonte: Autor.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho buscou apresentar uma metodologia para classificação de redes aéreas de distribuição de energia elétrica de média tensão em categorias para seleção de Equipamento de Proteção Individual (EPI) nas atividades ao contato com a rede energizada (LV). Identificou os aspectos técnicos das redes de distribuição que influenciam nas atividades de LV e na Energia Incidente (EI) proveniente de um eventual arco. As características técnicas compreendem as estruturas construtivas, como afastamentos e configurações dos eletrodos, assim como características elétricas tais como: nível de tensão, correntes de curto-circuito e dispositivos de proteção. Foram discutidas as particularidades das atividades de LV nas redes de MT e como identificar os requisitos para calcular a EI.

Devido à ausência de um regramento nacional a contento para tratar do risco do arco elétrico, foram questionadas e apresentadas as justificativas do porquê de os métodos internacionais ( de tabela e de cálculo de EI, contidos na NFPA 70E (2018), OSHA (2020), NESC (2013), IEEE 1584 (2018) e programas computacionais como ARCPRO, não atendem ao cenário brasileiro na sua plenitude, seja por superdimensionamento, subdimensionamento, requisitos insuficientes ou se há a necessidade de realizar estudos a cada intervenção nas redes de distribuição. Os métodos em sua maioria não são aplicáveis para a resolução do problema proposto, por não possuírem soluções que atendam as grandes distâncias das redes de MT.

A metodologia do IEEE 1584 (2018), destacada neste trabalho, apresenta o que há de mais recente em estudos para estimar a EI em um ponto específico. Para proporcionar ao usuário uma forma melhor para calcular a EI, na demonstração do desenvolvimento do método de classificação das redes em categorias, foram introduzidos os critérios e modelamentos matemáticos, previstos no guia IEEE 1584 (2018), direcionados para as características das redes de MT. A adoção desse modelamento viabilizou o desenvolvimento de um simulador que, com o grande volume de cenários elaborados, serviu de referência para estabelecer os parâmetros e consolidar fundamentação do método.

Ficou evidente nas simulações que a unidade mínima de estudo é um trecho de rede sob a supervisão de um dispositivo de proteção com no mínimo dois cálculos de EI em cada um. É a partir desses resultados da EI, em cada trecho, que se pode



realizar os agrupamentos para simplificar seleção dos EPI. É possível aplicar o método também para objetivos mais abrangentes, como identificar em que trechos de um conjunto de alimentadores e subestações a categoria 2 não atende, e restringir as atividades somente nesses trechos. Foram mostradas e viabilizadas formas para diminuir o valor de EI e possibilitar atividades com um determinado conjunto de EPIs, objetivando a uniformização de uso. No desenvolvimento do método foi demonstrado que, para um conjunto de fatores e variáveis, algumas características de curva de atuação da proteção podem ser utilizadas para avaliações preliminares, agrupando grandes quantidades de trechos, alimentadores ou até conjunto de alimentadores.

O estudo de caso demonstrou que foram atendidos amplamente os objetivos da metodologia. Foi possível estimar a EI ao longo de um alimentador com dois cálculos de EI por zona de dispositivo de proteção, não sendo necessário calcular a EI em cada ponto de possível intervenção, o que possibilita a correta seleção de EPI em toda a extensão da rede. Através de estudo de proteção no trecho protegido pelo relé foi possível reduzir a categoria 3 para categoria 2, submetendo o electricista somente a utilização de EPI adequado, e se necessário, por ação estratégica, pode-se aumentar a categoria de EPI de 1 para 2, normalizando os resultados.

Outro resultado de extrema relevância que este trabalho proporcionou para os estudos de estimativa de EI, foi identificar que a sugestão prevista na OSHA em calcular a EI no ponto de origem de um sistema, e reconhecê-lo como resultado para todo o sistema pode induzir o responsável pelo estudo a uma falha. Os resultados das simulações evidenciaram que a sugestão pode superdimensionar todo um alimentador em função do seu primeiro trecho. No estudo de caso, verificou-se que se aplicada a sugestão da OSHA todo o alimentador seria classificado como categoria 3, superdimensionando o EPI desnecessariamente. Também é temerário pelo subdimensionamento, em que, por exemplo, um sistema protegido por um elo de 65 K, pode ter na sua origem uma  $EI < 1,2 \text{ cal/cm}^2$ , dispensando selecionar EPI, porém, dependendo da corrente de curto-circuito ao longo desse sistema protegido pelo elo de 65 K o cálculo de EI pode resultar em um valor maior que  $4 \text{ cal/cm}^2$ , resultando na necessidade de EPI com categoria 2. Assim sendo, o método desenvolvido ao longo deste estudo é válido, mostrando-se eficiente e apropriado para aplicação no cenário nacional. A pesquisa também comprovou que é possível classificar as redes de distribuição por categorias, garantindo a correta seleção de EPI, proporcionando

qualidade e segurança para usuário e em atividades LV, mantendo a eficiência na manutenção das redes de distribuição de energia por parte das Distribuidoras.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

A metodologia do guia IEEE 1584 (2018) se limita a tensões de até 15 kV, distância máxima entre eletrodos máxima de 254mm, curto-circuito trifásicos e 200 amperes de corrente mínima de curto-circuito. Esses parâmetros restringem de forma significativa a aplicação do guia. Estudos para expansão desses parâmetros seriam de grande relevância para os cálculos de EI no cenário nacional.

A EI está diretamente relacionada aos ajustes dos dispositivos de proteção. Dessa forma, estabelecer parâmetros e inserir critérios de estudo de proteção para a EI resultante, seja por ajustes permanentes ou temporários ocasionará benefícios importantes na seleção de EPI.

Ampliar os estudos, relacionados a influência de correntes de curto-circuito trifásicas na EI, tornam-se necessários. Um modelamento dedicado a redes monofásicas poderá eliminar restrições em trechos de rede sem comprometer a segurança do trabalhador.

As 3 linhas de pesquisas para futuros estudos podem ser resumidas em: expansão dos parâmetros, estudos de proteção, utilização em redes monofásicas. Sabe-se que há outras possibilidades, as anteriormente citadas são consideradas relevantes para o momento atual.

## 6.2 TRABALHOS PUBLICADOS

Ao longo deste trabalho de dissertação foram aprovados 2 artigos científicos:

- IEEE Power & Energy Society T&D – Latin America conference, MDV, Uruguay, 2020. Título do trabalho: **Impact of Electrodes Configuration on Incident Energy Analysis Using IEEE Std 1584.**
- XXIII Congresso Brasileiro de Automática – CBA, 2020. Título do trabalho: **Avaliação de Energia Incidente Utilizando o Software ATPDraw e a IEEE Std 1584-2018.**

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica. Revisão 10. 2018.** Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo\\_8-Revis%C3%A3o\\_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9](http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9). Acesso em 18 abr. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5460 Sistemas elétricos de potência.** Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 6939 Coordenação do isolamento – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 7282 Dispositivos fusíveis de alta tensão – Dispositivos tipo expulsão – Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2011a.

\_\_\_\_\_. **NBR 14039 Instalações elétricas de média tensão de 1,0kV a 36,2kV.** Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 15688 Redes de distribuição aérea de energia elétrica com condutores nus.** Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 15992 Redes de distribuição aérea de energia elétrica com cabos cobertos fixados em espaçadores para tensões até 36,2 kV.** Rio de Janeiro, 2011b.

\_\_\_\_\_. **NBR IEC 61482-1-1 Trabalhos em tensão — Vestimenta de proteção contra riscos térmicos de um arco elétrico Parte 1-1: Métodos de ensaio – Método 1: Determinação da resistência ao arco elétrico (ATPV ou EBT50) de materiais resistentes à chama para vestimenta.** Rio de Janeiro, 2017.

ASTM F1959/F1959M, **Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing,**2014.

BROOKS, C.L. **Integrating Arc-Flash Analysis: A Look at Protective Device Coordination,** Industry Applications Magazine, IEEE, vo1.20,no.3, pp.14,23, May-June 2014.

COMASSETTO, L. **Algoritmos Heurísticos de Otimização de Proteção e Manobra em Redes de Distribuição de Energia.** Tese de Doutorado – Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

FARIED, P.E.S.; HAKELBERG, W. **Arc Flash – IEEE 1584-2018, NFPA 70E 2018, & OSHA Final Rule Highlights and Arc Flash Mitigation Technologies.** IEEE-IAS / PCA Cement Industry Conference, MO, EUA, 2019.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. **IEEE C2, National Electrical Safety Code.** New York, 2012.

\_\_\_\_\_. **IEEE std 1584, Guide to Performing Arc-Flash Hazard Calculations.** New York, 2018.

\_\_\_\_\_. **IEEE std 1584.1, Guide for the Specification of Scope and Deliverable Requirements for an Arc-Flash Hazard Calculation Study in Accordance with IEEE Std 1584.** New York, 2013.

JORNACION N. **A Review of the Latest IEEE 1584 and How This Affects You.** IEEE Power and Energy Magazine. Volume: 18, Edição: 2, pp117-120, mar.-abr. de 2020.

Kinectrics Inc. **KINECTRICS ARCPRO 3.0 Accepted Ranges for Inputs** (2017). Disponível em: <https://arcpro.kinectrics.com/index.php?rp=/announcements/4/ARCPRO-30-Accepted-Ranges-for-Inputs---IMPORTANT---READ-THIS.html>. Acessado em 17/07/2020.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Rio de Janeiro: RJ: LTC, 2013. 605p.

MAJD, A.; LOU, R.; DEVADASS, M. A.; PHILLIPS, J. **Comprehensive overview and comparison of ANSI vs. IEC short circuit calculations: Using IEC short circuit results in IEEE 1584 Arc flash calculations**. IEEE Transactions on Industry Applications, Volume: 55, Edição: 5, pp5487 – 5493, Set.-Out. 2019.

MARROQUIN, A.; REHMAN, P.E. A.; MADANI, A. **High Voltage Arc Flash Assessment and Applications**. IEEE Transactions on Industry Applications. Volume: 56, Edição: 3, pp 2205 – 2215, mai.-jun. 2020)

MOHLA, D.; LEE W.; PHILLIPS, J.; MARROQUIN, A. **Introduction to IEEE Standard. 1584 IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations- 2018 Edition**. 2019 IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference (PCIC), BC, Canada, 2019.

BRASIL. Ministério da Economia. **Manual de Orientação para Especificação das Vestimentas de Proteção Contra os Efeitos Térmicos do Arco Elétrico e do Fogo Repentino [201-?]** Disponível em: [https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos\\_SST/SST\\_Publicacao\\_e\\_Manual/CGNOR---MANUAL-DE-ORIENTAO-PARA-ESPECIFICAO-DAS-VESTIMENTAS-DE-PROTEO-DE-ARCO-ELTRICO-E-FOGO-REPENTINO.pdf](https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_Publicacao_e_Manual/CGNOR---MANUAL-DE-ORIENTAO-PARA-ESPECIFICAO-DAS-VESTIMENTAS-DE-PROTEO-DE-ARCO-ELTRICO-E-FOGO-REPENTINO.pdf), acessado em 14/07/2020

\_\_\_\_\_. **NR 6 – Equipamento de Proteção Individual – EPI**. Brasília, 2018.

\_\_\_\_\_. **NR 10 – Segurança em Instalações e Serviços Em Eletricidade**. Brasília, 2019.

\_\_\_\_\_. **Texto Disponibilizado para Consulta Pública, NR 10 – Segurança em Instalações Elétricas E Serviços Em Eletricidade** Disponível em: [https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos\\_SST/SST\\_NR/consulta-publica/NR-10-para-consulta-ENIT.pdf](https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_NR/consulta-publica/NR-10-para-consulta-ENIT.pdf), acessado em 14/07/2020

\_\_\_\_\_. **NR-12 – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos**. Brasília, 2019.

NEITZEL, D. K. **Electrical Safety Update—OSHA 29 CFR 1910.269 and NFPA 70E-2015 Revisions**, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 52, N° 4, pp2753 – 2758 July-Aug 2016

NFPA – NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 70E Electrical Safety in the Workplace**, Quincy, MA, 2018.

OSHA – OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION, **1910.269 – Electric Power Generation, Transmission, and Distribution**. Disponível em: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.269>, acessado em 14/07/2020

ÖZEN, K. *et al.* **Arc-Flash Risk Level Calculations based on Computer Simulations and Measures to Avoid Hazards** in 2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bulgaria. 2018.

SALEHI, V. **Integrating Arc-flash PPE Categories in Protection Device Coordination Based on IEEE Std. 1584 and NFPA 70E** IAS 52ª Conferência técnica de sistemas de energia industrial e comercial (I & CPS), 2016.

SHORT, T.A. **Arc-Flash Analysis Approaches for Medium-Voltage Distribution**; IEEE Transactions on Industry Applications Volume: 47, Edição: 4, pp 1902-1909, July-Aug. 2011.

SHORT, T.A. *et al.* **Distribution Arc Flash: Analysis Methods and Arc Characteristics Electric**. EPRI, Palo Alto, 2009, pp256

ZHANG, Z.; Wang, P.; Rau, S.; Lee, W. **Effect of Electrode Geometry on Arc Flash Protection Boundary**. IEEE Transactions on Industry Applications. Volume: 56, Edição: 1, pp 57-64, Jan.-Fev. 2020)