



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**VALDERY RODRIGUES MONTE JÚNIOR**

**ESTUDO DA IMPORTÂNCIA DOS CÁLCULOS DE ENERGIA INCIDENTE E  
CORRENTES DE ARCO NA PROTEÇÃO DE TRABALHADORES DO SEP**

FORTALEZA

2019

VALDERY RODRIGUES MONTE JÚNIOR

ESTUDO DA IMPORTÂNCIA DOS CÁLCULOS DE ENERGIA INCIDENTE E  
CORRENTES DE ARCO NA PROTEÇÃO DE TRABALHADORES DO SEP

Monografia apresentada ao curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Msc. Carlos Gustavo Castelo Branco

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M769e Monte Júnior, Valdery Rodrigues.

Estudo da importância dos cálculos de energia incidente e correntes de arco na proteção de trabalhadores do SEP / Valdery Rodrigues Monte Júnior. – 2019.

111 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Me. Carlos Gustavo Castelo Branco.

1. Arco Elétrico. 2. Energia Incidente. 3. Segurança do Trabalho. 4. IEEE 1584. 5. ATPV.  
I. Título.

CDD 621.3

---

VALDERY RODRIGUES MONTE JÚNIOR

ESTUDO DA IMPORTÂNCIA DO CÁLCULOS DE ENERGIA INCIDENTE E  
CORRENTES DE ARCO NA PROTEÇÃO DE TRABALHADORES DO SEP

Monografia apresentada ao curso de  
Graduação em Engenharia Elétrica do  
Departamento de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal do Ceará, como  
requisito parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: \_\_/\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Msc. Carlos Gustavo Castelo Branco (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Kleber de Araújo Lima  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. Tobias Valentim de Macedo Júnior  
JCA Engenharia e Arquitetura

*À memória dos meus avós, Maria Creuza e  
João Albuquerque.*

*Aos meus pais, Valdery e Judite.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, à minha avó, Maria Creuza, que com seu humor e alegria inabalável sempre me mostrou que a vida deve ser encarada com um sorriso no rosto e muito suor.

À minha mãe por sempre acreditar que a educação seria a ferramenta que transformaria nossas vidas para melhor, por sempre se dedicar tanto ao papel de mãe e exercê-lo com tanta maestria e sempre acreditar em mim.

Ao meu pai por sempre dedicar muito suor ao sustento da família, por me encher de orgulho com sua dignidade e ensinar, nem sempre com palavras, o valor do trabalho duro.

À minha tia, que amo como uma mãe, Jucileide por sempre buscar me proporcionar o melhor e vibrar comigo em todas as minhas conquistas.

À minha tia, que também amo como uma mãe, Regina por participar da minha criação e todos os dias me ensinar que o verdadeiro valor da vida está nas coisas simples.

Ao meu irmão, que é um grande aliado na caminhada da vida e por ser fonte de exemplo e inspiração em tantos aspectos.

Aos demais integrantes da minha família por sempre compartilharam comigo seus valores e seu afeto.

À Mayane, por seu apoio incondicional, por sempre depositar tanta confiança em mim e pela companhia que sempre enche meus dias de cor e sorrisos.

À Tecsys Jr e ao Movimento Empresa Júnior por terem sido escolas tiveram grande peso na minha formação como profissional e como cidadão.

À JCA Engenharia e Arquitetura pela oportunidade de trabalhar com uma equipe de altíssima competência e por todos de lá que me ensinaram bastante e me ensinam até hoje. Não tenho palavras para agradecer o quanto sou grato por quanto aprendi com vocês.

Ao professor Carlos Gustavo por ter me ensinado tanto sobre a profissão e sempre ser tão solícito em sanar dúvidas e exercer a tarefa de professor com tanta dedicação.

A todos os amigos e amigas que me acompanham, de perto ou de longe, depositando em mim confiança, afeto e respeito e me ajudaram profissionalmente ou pessoalmente.

Eu não chegaria até aqui sem vocês. Muito obrigado!

*“Só existe um ponto culminante na vida - ter tomado as providências necessárias para sentir tudo o que é humano”*

*(Wilhelm von Humboldt)*

## RESUMO

O arco elétrico é um evento físico que ocorre quando a corrente elétrica usa o ar, que em condições normais é isolante, como caminho de curto circuito em um circuito elétrico. Este fenômeno pode acontecer em instalações elétricas de diversas naturezas e pode ocasionar acidentes com vítimas fatais. Isso porque, associado ao arco elétrico, há a liberação de uma elevada quantidade de energia que pode causar queimaduras incuráveis e explosões que produzem elevadas temperaturas chegando a alcançar 20.000 °C. No cenário brasileiro, visando a mitigação desse risco, a Norma Regulamentadora nº 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade (NR 10) exige dos empregadores o dimensionamento adequado dos equipamentos de proteção individual (EPIs) para guardar a segurança dos trabalhadores contra choques e queimaduras sendo fiscalizada pelo Ministério do Trabalho. O presente trabalho apresenta conceitos sobre a natureza do arco elétrico, aborda as grandezas físicas envolvidas na ocorrência desse evento, fornece uma perspectiva sobre o avanço do conhecimento em segurança e prevenção de acidentes com arcos elétricos e traz também os modelos matemáticos mais relevantes para a predição dos riscos que uma pessoa estaria exposta em um acidente com arco elétrico. Na abordagem dos modelos matemáticos realizada neste trabalho, é dado um foco principal à metodologia presente na norma IEEE 1584 atualizada em 2018, com um passo a passo das etapas para a aplicação do modelo e um estudo de caso onde podem ser comparados os resultados obtidos com a aplicação do modelo de 2018 em relação ao modelo da versão de 2002. O trabalho destaca ainda a importância do uso da ferramenta mais moderna para alcançar maior confiabilidade e precisão nos resultados para o correto dimensionamento de EPIs e a adequação às exigências normativas.

**Palavras-chave:** Arco Elétrico, Energia Incidente, Segurança do Trabalho, IEEE 1584, ATPV, NR 10, NFPA 70E.

## ABSTRACT

Arch flash is a natural event that occurs when an electrical current uses the air, which is an insulator in normal conditions, as a path in an electrical circuit. This phenomenon can happen in several kinds of electrical installations and may lead to accidents with risks of death. This happens due to the release of great levels of energy that can cause incurable burns and the high temperatures, that can reach 20.000°C, during an arch flash explosion. In the Brazilian context, there is the Norma Regulamentadora nº 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade (NR 10), which is the main Brazilian standard for safety in electrical installations, that demands from the employers the proper sizing of the personal protective equipment (PPE) for protecting the employees against electrical and arch flash hazards. The fulfillment of these demands is inspected by the Brazilian Labor Ministry. This research aims to present concepts about the arc flash's nature, address the physical quantities related to the occurrence of this event, bring a perspective about the development of the knowledge of safety and preventions of accidents involving arch flash and discuss the main mathematical models used to predict the hazards that a person can be exposed to in an arch flash accident. In the mathematical models discussion presented in this research, a special attention is given to the IEEE 1584 method updated in 2018, with a presentation of the step by step implementation of the model and applying the method in a case study comparing the results obtained using the updated method to the results obtained from the application of the 2002 version. This research also approaches the relevance of using the latest update of the mathematical model in order to reach more precise and reliable results for sizing the correct PPE and attending to all normative demands.

**Key Words:** Arch Flash, Incident Energy, Workplace Safety, IEEE 1584, ATPV, NR 10, NFPA 70E.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Natureza direcional do arco elétrico .....	8
Figura 2 – Natureza pulsante da forma da corrente de arco.....	10
Figura 3 – Abordagem do arco elétrico como fonte de calor .....	11
Figura 4 – Comparação entre falta franca e falta por arco.....	12
Figura 5 – Relação tempo-temperatura com tolerância da pele .....	14
Figura 6 – Distribuição de queimaduras em vítimas de acidentes com arco .....	15
Figura 7 – Diagrama fasorial de tensão e corrente de arco .....	25
Figura 8 – Arranjo para experimento de arco em ambiente aberto.....	29
Figura 9 – Arranjo para experimento de arco em ambiente fechado .....	29
Figura 10 – Sensor pontual e sensor de fibra ótica para detecção de arcos .....	54
Figura 11 – Fibra ótica sendo usada como sensor de luminosidade para a detecção de arcos.....	55
Figura 12 – Sensor do tipo lapela para detecção de arcos.....	56
Figura 13 – Categorias de EPIs separadas por faixas de energia incidente.....	58
Figura 14 – Identificação do grau de ATPV em vestimenta antichama .....	59
Figura 15 – Hierarquia de medidas de controle de riscos.....	60
Figura 16 – Sistema operando com os dois geradores principais .....	65
Figura 17– Sistema operando com um gerador principal .....	65
Figura 18 – Sistema operando com o gerador de emergência .....	66
Figura 19 – Coordenograma 1 .....	95
Figura 20 – Coordenograma 2.....	96
Figura 21 – Coordenograma 3.....	97

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Evolução dos marcos em estudos de arcos elétricos .....	16
Quadro 2 - Estrutura da norma NFPA 70E .....	18
Quadro 3 - Passos para aplicação do modelo matemático da IEEE 1584 .....	32
Quadro 4 - Equipamentos de proteção de sobrecorrente dos geradores .....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potências de arco necessárias para ocasionar queimaduras curáveis e incuráveis para diferentes distâncias.....	27
Tabela 2 – Distâncias típicas entre condutores por classe de equipamentos.....	34
Tabela 3 – Arranjos de eletrodos de teste e correlação com equipamentos .....	35
Tabela 4 – Distâncias de trabalho típicas para diferentes equipamentos .....	37
Tabela 5 – Tabela 01 da IEEE 1584 (2018).....	40
Tabela 6 – Coeficientes para a Equação (17).....	42
Tabela 7 – Guia para determinar altura e largura equivalentes de invólucro.....	45
Tabela 8 – Coeficientes para as equações (21) e (22) .....	46
Tabela 9 – Coeficientes k1 a k13 para as equações (23), (26), (30) e (33) .....	49
Tabela 10 – Coeficientes k1 a k13 para as equações (24) e (31).....	49
Tabela 11 – Coeficientes k1 a k13 para as equações (25) e (32).....	49
Tabela 12 – Parâmetros resultantes da aplicação do modelo matemático IEEE 1584 (2018) .....	67
Tabela 13 - Resultados do estudo de caso realizado por Queiroz (2011) .....	68
Tabela 14 – Variação percentual dos parâmetros calculados com o modelo IEEE 1584 2018 em comparação com os valores obtidos com o modelo IEEE 1584 2002 .....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
ATPV	Arch Thermal Performance Value
CCM	Centro de Controle de Motores
CDC	Centro de Distribuição de Cargas
CSA	Canadian Standard Association
EBT	Breakopen Threshold Energy
EPE	Empresa de Pesquisa em Energética
EPI	Equipamento de Proteção Individual
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineering
ISSA	International Social Security Association
MTE	Ministério do Trabalho e do Emprego
NFPA	National Fire Protection Association
NR	Norma Regulamentadora
OSHA	Occupational Safety and Health Administration's
PTW	Power Tools for Windows
TC	Transformador de Corrente

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO PRINCIPAL .....	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.3. JUSTIFICATIVA .....	3
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	4
<b>2. O ARCO ELÉTRICO .....</b>	<b>6</b>
2.1. EVOLUÇÃO DE UM ARCO ELÉTRICO.....	7
2.2. MODELAGEM MATEMÁTICA DO ARCO ELÉTRICO .....	8
2.3. ENERGIA INCIDENTE .....	10
2.4. CONSEQUÊNCIAS DA EXPOSIÇÃO AO ARCO PARA O SER HUMANO .....	13
<b>3. ABORDAGENS NORMATIVAS SOBRE ARCO ELÉTRICO .....</b>	<b>16</b>
3.1. NORMAS ESTRANGEIRAS.....	17
3.1.1. <i>IEEE Std 1584</i> .....	17
3.1.2. <i>NFPA – 70E</i> .....	17
3.1.3. <i>Normas da ASTM</i> .....	19
3.1.4. <i>Normas Canadenses</i> .....	19
3.1.5. <i>Normas Européias</i> .....	20
3.2. ABORDAGEM NORMATIVA BRASILEIRA .....	20
3.2.1. <i>Norma Regulamentadora n° 10</i> .....	20
3.2.2. <i>Norma Regulamentadora n° 6</i> .....	22
<b>4. MODELAGENS MATEMÁTICAS DA ENERGIA INCIDENTE .....</b>	<b>24</b>
4.1. MÉTODO DE RALPH LEE .....	25
4.2. MÉTODO DE DOUGHTY E NEAL .....	28
4.3. MÉTODO IEEE 1584.....	31
4.3.1. <i>Coleta de Dados do Sistema</i> .....	33
4.3.2. <i>Determinação do Modo de Operação do Sistema</i> .....	33
4.3.3. <i>Determinação da Corrente de Curto Circuito</i> .....	34
4.3.4. <i>Espaçamento Entre Condutores e Dimensões de Invólucro</i> .....	34
4.3.5. <i>Determinar as Configurações dos Eletrodos dos Equipamentos</i> .....	35
4.3.6. <i>Determinação da Distância de Trabalho</i> .....	37
4.3.7. <i>Cálculo da Corrente de Arco</i> .....	37

4.3.8. <i>Determinar a Duração do Arco</i> .....	42
4.3.9. <i>Cálculo de Energia Incidente</i> .....	43
4.3.10. <i>Cálculo da Distância de Segurança</i> .....	50
4.4. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	52
<b>5. MEDIDAS DE PROTEÇÃO CONTRA ARCOS ELÉTRICOS .....</b>	<b>53</b>
5.1. ESTUDO DE SELETIVIDADE E A PROTEÇÃO CONTRA ARCOS ELÉTRICOS .....	53
5.2. RELÉS DE ARCO.....	54
5.3. VESTIMENTAS PARA A PROTEÇÃO CONTRA ARCOS .....	56
5.3.1. <i>Dimensionamento das vestimentas</i> .....	58
5.4. CONCLUSÃO .....	59
<b>6. ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>61</b>
6.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO .....	61
6.1.1. <i>Proteções dos sistemas de geração</i> .....	62
6.2. MODOS DE OPERAÇÃO E ANÁLISE DE CURTO CIRCUITO.....	64
6.3. RESULTADOS E COMPARAÇÕES .....	66
<b>7. CONCLUSÃO .....</b>	<b>71</b>
7.1. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	72
<b>8. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>73</b>
<b>APÊNDICE A – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA ESTUDADO.....</b>	<b>76</b>
<b>APÊNDICE B – ALGORITMOS USADOS PARA OS CÁLCULOS.....</b>	<b>77</b>
B.1 ALGORITMO PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO IEE 1584 NO PAINEL A .....	77
B.2 ALGORITMO PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO IEE 1584 NO PAINEL B .....	80
B.3 ALGORITMO PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO IEE 1584 NO CCM A.....	83
B.4 ALGORITMO PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO IEE 1584 NO CCM B.....	86
<b>9. APÊNDICE C – CÁLCULOS DE CURTO CIRCUITO.....</b>	<b>89</b>
C.1 CONDIÇÃO 1 – DOIS GERADORES PRINCIPAIS EM PARALELO .....	89
C.2 CONDIÇÃO 2 – UM GERADOR PRINCIPAL EM FUNCIONAMENTO.....	92
C.3 CONDIÇÃO 3 – GERADOR DE EMERGÊNCIA EM FUNCIONAMENTO .....	94
<b>APÊNDICE D – COORDENOGRAMAS .....</b>	<b>95</b>
D.1 COORDENOGRAMA 1 - COORDENAÇÃO ENTRE O GERADOR A E A MAIOR CARGA PRESENTE NO CCM B .....	95

D.2 COORDENOGRAMA 2 - COORDENAÇÃO ENTRE O GERADOR A E A MAIOR CARGA PRESENTE NO CCM A .....	96
D.3 COORDENOGRAMA 3 - COORDENAÇÃO ENTRE O GERADOR C (GERADOR DE EMERGÊNCIA) E A MAIOR CARGA PRESENTE NO CCM B .....	97

## 1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um importante insumo para diversas atividades econômicas, tanto no fornecimento de serviços, quanto em processos industriais. Trazendo para o cenário nacional Brasileiro, segundo a Empresa de Pesquisa em Energética (EPE), dos 472.242,09 GWh consumidos no Brasil no ano de 2018, 258.364 GWh foram consumidos pelas atividades industrial e comercial, o que corresponde a aproximadamente 55% do consumo nacional, sendo o setor industrial o principal ator no consumo de energia elétrica no país. Com a alta utilização da energia elétrica para o desempenho das atividades desses setores e a relevância da carga consumida, vêm também os riscos associados ao uso da eletricidade. Por esse motivo, as normas que abordam projetos elétricos buscam adotar boas práticas para mitigar esses riscos e minimizar a ocorrência e a gravidade dos acidentes. A Norma Regulamentadora nº 10 - SEGURANÇA EM INSTALAÇÕES E SERVIÇOS EM ELETRICIDADE (NR 10), que é uma norma criada pelo ministério do trabalho que tem a preocupação exclusiva de trazer diretrizes de projeto e operação que visam a segurança dos trabalhadores que interajam direta ou indiretamente com a eletricidade, em seu item 10.3.9 a), cita como riscos atrelados ao uso de energia elétrica a serem prevenidos: choque elétrico, queimaduras e riscos adicionais. (NR 10, 2016)

No estudo realizado por Castro e Lima Júnior (2015) intitulado “Perfil epidemiológico de pacientes vítimas de choque elétrico em um hospital de referência em Fortaleza”, foram avaliadas as internações por queimaduras no Centro de Tratamento de Queimados do Instituto Doutor José Frota (IJF) no período de janeiro a dezembro de 2014 e foi apontado que, das internações registradas, 70% foram ocasionadas por acidentes de trabalho. Quando os dados são separados por tipo de trauma, é constatado que 22% dos acidentes foram ocasionados por arco elétrico. (CASTRO; LIMA JÚNIOR, 2015)

Apesar de o arco elétrico ser citado na NR 10 como risco em instalações e serviços com eletricidade apenas no Anexo II – Treinamento, o arco elétrico se destaca dentre os

riscos oferecidos pela eletricidade por ser um dos mais danosos aos trabalhadores. Isso se dá pelo fato de o fenômeno do arco elétrico liberar uma elevada energia e atingir altas temperaturas, levando a vítima do acidente com arco elétrico a estar exposta a riscos de ser perfurada pela projeção de metais, inalar gases tóxicos, luz extremamente intensa, onda de pressão devido à expansão do ar e, principalmente, a queimaduras que podem ser letais. Este fenômeno é tão intenso e produz temperaturas extremamente elevadas, podendo atingir 20.000 °C (QUEIROZ; SENGER, 2012).

Com o fim de calcular de forma precisa a energia liberada pelo arco elétrico, alguns modelos matemáticos foram desenvolvidos nas últimas décadas. O primeiro modelo para publicado foi no ano de 1982 e trouxe luz ao problema de segurança que era a exposição a arcos elétricos. Com o avanço das tecnologias empregadas nos laboratórios, outros modelos foram desenvolvidos e hoje o modelo mais atual é encontrado na norma IEEE 1584 - *IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations* atualizada em 2018.

### **1.1. Objetivo Principal**

A finalidade deste trabalho é trazer uma abordagem teórica sobre o fenômeno do arco elétrico e a energia incidente, discutir como algumas normas abordam metodologias para calcular a energia incidente durante o arco elétrico e, por fim, trazer um estudo de caso onde será calculado o nível de energia incidente, correntes de arco e distâncias de segurança para os principais barramentos de uma instalação fazendo o uso da metodologia da norma IEEE 1584 de 2018 e fazer um comparativo com os resultados obtidos quando aplicada a metodologia da IEEE 1584 de 2002 no estudo de caso desenvolvido em QUEIROZ, 2011.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- 1) Entender o fenômeno físico do arco elétrico;
- 2) Entender os perigos e riscos associados ao arco elétrico;
- 3) Entender o conceito de energia incidente;

- 4) Compreender as variáveis que influenciam no resultado da energia incidente;
- 5) Conhecer as abordagens normativas sobre proteções contra arco elétrico;
- 6) Entender os modelos matemáticos para estimar a energia incidente;
- 7) Aplicar a metodologia IEEE 1584 para determinação da energia incidente, distância de segurança e correntes de arco em um estudo de caso.
- 8) Comparar os resultados do estudo de caso com os resultados do estudo de caso presente em QUEIROZ, 2011 onde foi aplicado o método IEEE 1584 na versão de 2002.

### **1.3. Justificativa**

Apesar de não existir ainda no Brasil uma norma exclusiva para abordar os riscos e as medidas para a proteção contra arcos elétricos, a NR 10 impõe a obrigatoriedade do fornecimento da vestimenta adequada para a proteção dos trabalhadores, além de ressaltar como obrigatório que o memorial descritivo de projetos elétricos contenha, entre outros itens de segurança, “especificações das características relativas à proteção contra choques elétricos, queimaduras e outros riscos adicionais”. Nenhum desses dois pontos podem ser corretamente atendidos sem um estudo da energia incidente nos diversos pontos da instalação. O estudo de arco elétrico e as demais exigências feitas pela NR 10 são fiscalizadas pelo Ministério do Trabalho que exige das empresas o estudo do nível de energia incidente de cada quadro elétrico, a etiquetagem do grau de ATPV da vestimenta necessária para a manipulação do quadro e a determinação das distâncias de trabalho. Assim, o entendimento da metodologia mais atual e sua implementação é importante para a adequação às exigências dos órgãos fiscalizadores e a assertividade na tomada de decisão sobre quais medidas de proteção usar. Mesmo com as exigências e fiscalizações, há pouca abordagem sobre a temática nos livros brasileiros sobre instalações elétricas, dificultando o acesso às informações sobre como aplicar os cálculos e como tomar medidas que possam mitigar os riscos trazidos por arcos elétricos

Além das questões normativas, acidentes de trabalho trazem um custo humano inestimável e um custo financeiro elevado. Segundo consta no Observatório Digital de Saúde e Segurança do Trabalho estima que o gasto da previdência com benefícios acidentários no Brasil cresce R\$ 1,00 a cada 2 milissegundos.

Visto isso, a compreensão dos potenciais riscos do arco elétrico e o correto estudo dos níveis de energia incidente de uma instalação elétrica, constituem-se como ferramentas valiosas para o profissional de engenharia elétrica poder implementar projetos de qualidade e que garantam segurança aos usuários e que atendam às exigências de segurança impostas pela NR 10.

#### **1.4. Estrutura do trabalho**

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos. O capítulo 1 é introdutório sobre o tema a ser abordado, apresenta a justificativa do trabalho e seus objetivos e a metodologia para a estruturação do trabalho.

O capítulo 2 propõe-se a abordar o arco elétrico como fenômeno físico com uma descrição de como acontece o evento de um arco elétrico, quais as variáveis envolvidas e as consequências da exposição de humanos a uma explosão causada por um arco. Este capítulo aborda ainda o conceito de energia incidente e quais variáveis influenciam no valor final desta grandeza.

O capítulo 3 contém as abordagens normativas sobre proteções de trabalhadores contra acidentes com arcos elétricos. Neste capítulo é encontrado um breve histórico sobre a evolução das abordagens em normativas, alguns pontos relevantes sobre as principais normas internacionais e como o arco elétrico é abordado nas normas brasileiras de segurança.

O capítulo 4 é dedicado à compreensão das metodologias de cálculo de Ralph Lee, Doughty e Neal e da norma IEEE 1584 para a estimativa da energia incidente, distâncias de aproximação e correntes de arco com os passos e considerações e limitações de cada modelo.

No capítulo 5 é abordado um estudo de caso já realizado em Queiroz (2011) onde foi aplicado o método IEEE 1584 na versão de 2002, mas aplicando o método da versão mais recente lançada em 2018 para a determinação das correntes de arco, energia incidente e distâncias de segurança para os barramentos principais da instalação elétrica e comparando os resultados obtidos.

O capítulo 6 é a conclusão do trabalho que conta com alguns pontos relevantes do estudo realizado, aspectos que ressaltam a importância do estudo de arco elétrico para instalações elétricas e menciona possíveis trabalhos futuros que podem colaborar com o conhecimento construído neste trabalho para ampliar a exploração dos estudos sobre segurança contra arcos elétricos.

## 2. O ARCO ELÉTRICO

O arco elétrico, também conhecido como arco voltaico, é uma descarga que surge quando há o rompimento da isolação, ou do dielétrico, entre um ponto energizado e a terra, ou entre dois pontos energizados de potenciais distintos. O evento do arco elétrico pode ser também definido como o fenômeno que acontece quando dois terminais que estão conduzindo uma corrente, que pode ser de carga, sobrecarga ou defeito, estão fisicamente separados e usam como canal para a condução de corrente um meio fortemente ionizado, produzindo brilho intenso e aumentando rapidamente a temperatura do meio em que se desenvolve. (MARDEGAN; PARISE, 2018)

Nas aplicações do sistema elétrico, o meio que conduz o arco é o ar. Em condições normais de funcionamento, o ar atua como dielétrico impedindo que a corrente circule entre dois pontos submetidos a uma diferença de potencial separados espacialmente, pois o ar não ionizado possui uma elevada impedância e inviabiliza a condução de corrente. A ocorrência de um arco elétrico está normalmente associada a falhas de isolação, curtos circuitos entre fases ou entre fase e terra, sendo que, recorrentemente, essas faltas são iniciadas com um curto circuito entre fase e terra e evoluem para um curto circuito envolvendo as três fases. (QUEIROZ; SENGER 2012)

Dentre as causas para as faltas por arco, podem ser destacadas as seguintes: (MARDEGAN; PARISE, 2018)

- Mau contato;
- Sobrecarga;
- Umidade;
- Contaminação (pó, sal, impurezas, etc.);
- Deterioração da isolação;
- Sobretensões de regime transitório;
- Perfuração da isolação;
- Erros humanos (contatos acidentais);
- Abertura de disjuntores sem meio de extinção (vácuo, gás SF6, óleo);

- Procedimentos inadequados;
- Defeitos de fabricação.

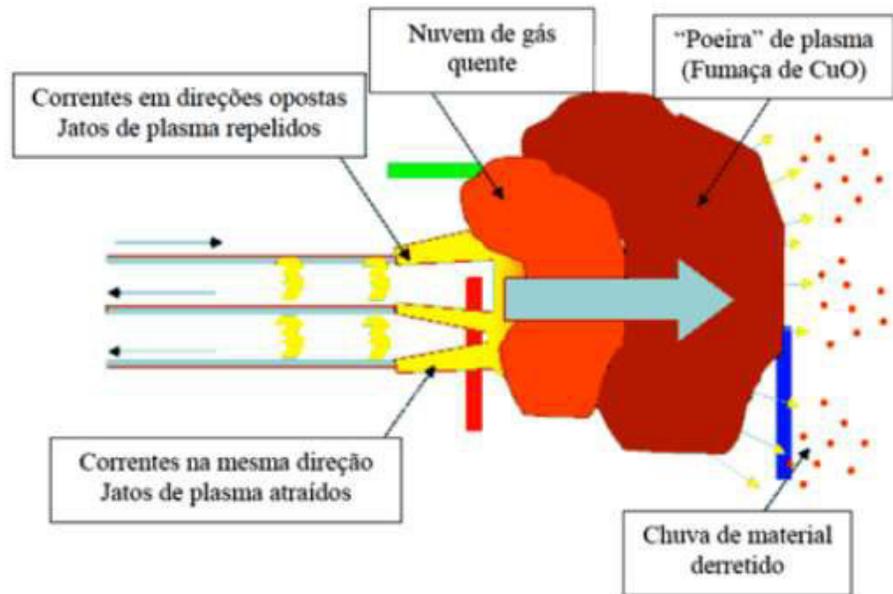
## 2.1. Evolução de um Arco Elétrico

Durante o início de um arco elétrico, que pode ser causado pelos fatores já citados anteriormente, a corrente encontra no ar altamente ionizado um caminho para um curto circuito, liberando grandes quantidades de calor (RESENDE, 2016). Uma vez que o ar esteja ionizado, mesmo que o motivo da ionização tenha desaparecido e as condições nominais sejam reestabelecidas, a baixa impedância do ar ionizado é suficiente para que o arco não se interrompa (KINDERMANN, 1997). Uma vez iniciado, o arco elétrico não é um fenômeno estático, pois move-se para longe da fonte da falta em alta velocidade (aproximadamente 100 m/s) (QUEIROZ, 2011). Como consequência das condições extremas ocasionadas pelo arco, durante o fenômeno, pode ocorrer o quarto estado da matéria, o plasma. Segundo Queiroz e Senger (2012)

“A extinção do arco e a possibilidade de reignição, mudanças no trajeto do arco por conta de correntes transitórias de retorno e a reconexão do arco pelos barramentos e partes de plasma, além de outros efeitos, dificultam o modelamento matemático desse fenômeno.”

O plasma gerado torna o evento ainda mais caótico, principalmente tratando-se de um arco trifásico, mudando rapidamente de forma irregular a geometria do arco. Sucessivas forças de atração e repulsão geradas pelas correntes criam jatos de plasma que se somam a vapor de metais produzidos pelas altas temperaturas criando uma espécie de nuvem em expansão. Esta nuvem é projetada para longe da fonte, gerando uma poeira com moléculas de plasma que, ao esfriar, podem se recombinar formando outros materiais. Os metais presentes nos elementos do circuito onde foi iniciado o arco também podem ser projetados para longe da fonte na forma de metais fundidos. A figura a seguir ilustra o comportamento da nuvem de plasma: (RESENDE, 2016).

Figura 1 – Natureza direcional do arco elétrico



Fonte: Queiroz e Senger (2012).

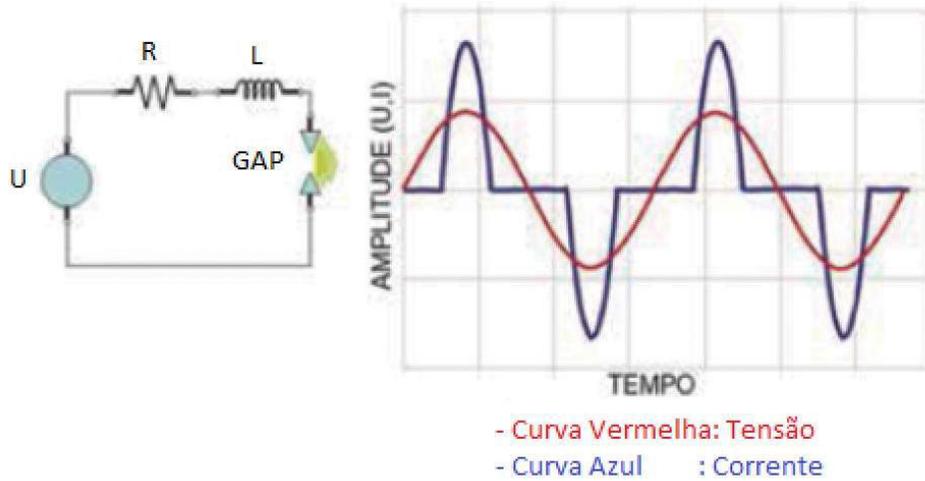
## 2.2. Modelagem Matemática do Arco Elétrico

Para o entendimento do arco voltaico como um elemento de circuito, pode-se fazer considerações e comparações com o comportamento de outros elementos de circuito conhecidos para alcançar um modelo satisfatório. Como já mencionado, a corrente de arco passa de um ponto a outro através do ar fortemente ionizado e com a presença de vapor de metais. Assim, esse canal comporta-se como um condutor sólido do ponto de vista de elemento de circuito. Uma grande diferença entre o curto circuito por arco e um curto circuito franco é que a queda de tensão em um arco fica entre 30 e 40V/cm, já a queda de tensão em um curto circuito franco situa-se entre 0,02 e 0,03V/cm. Como o meio de condução do arco possui características de um condutor sólido de mesmo tamanho, a indutância pode ser desprezada. Portanto, o arco elétrico produz um fator de potência unitário, comportando-se de forma puramente resistiva. (LEE, 1982)

Em sistemas elétricos de baixa tensão, a queda de tensão de 30 a 40V/cm é um valor representativo se comparado com a tensão disponível do sistema. Assim, uma boa parte da queda de tensão é consumida no arco, forçando uma corrente de falta gerada entre a diferença de tensão do sistema e a tensão do arco a passar pelas impedâncias desse circuito, incluindo a impedância do arco. Por essa razão, o arco pode se “estabilizar” em circuitos de baixa tensão e atingir mais equipamentos e outros circuitos. Observando a mesma condição da queda de tensão do arco para circuitos de média tensão, verifica-se que o valor de queda de tensão de um arco não é muito representativo quando comparado com a tensão disponível do sistema, que é da ordem de dezenas de milhares de volts. Com isso, a queda de tensão não apresenta uma redução significativa da corrente de curto circuito quando comparada à corrente de um curto circuito franco. Isso faz com que o comprimento do arco em média tensão possa ser muito maior, podendo se estabelecer um arco entre o ponto de falta e o solo ou entre o ponto de falta e outro ponto energizado com um potencial distinto, com pouca redução na corrente de falta. (LEE, 1982)

Apesar da consideração feita anteriormente sobre a natureza resistiva de um arco elétrico, a modelagem matemática não é tão simples quanto parece. Como podemos notar na Figura 2, a cada semiciclo da tensão, o arco tem uma ignição e um apagamento. O efeito disso é que a onda da corrente de falta não é mais senoidal e, portanto, não é possível fazer uso da matemática fasorial para descrevê-la. (MARDEGAN; PARISE, 2018)

Figura 2 – Natureza pulsante da forma da corrente de arco



Fonte: Adaptado de Mardegan e Parise (2018).

### 2.3. Energia incidente

Energia incidente é definida como a quantidade de energia térmica impressa em uma superfície, há uma dada distância da fonte. (NFPA 70E, 2015) A energia incidente é o principal risco associado ao arco elétrico, sendo a causa dos ferimentos mais graves para uma pessoa exposta a um arco elétrico. Desse modo, conhecer as variáveis envolvidas no valor da energia incidente é indispensável para compreender as medidas que podem ser tomadas para a proteção adequada dos trabalhadores. (RESENDE, 2016)

Considerando a propriedade de fonte de calor de um arco elétrico, podemos encontrar a quantidade de energia térmica recebida por um objeto através da seguinte equação: (LEE, 1982)

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

Onde:

$Q_s$  calor emitido pela fonte por unidade de área

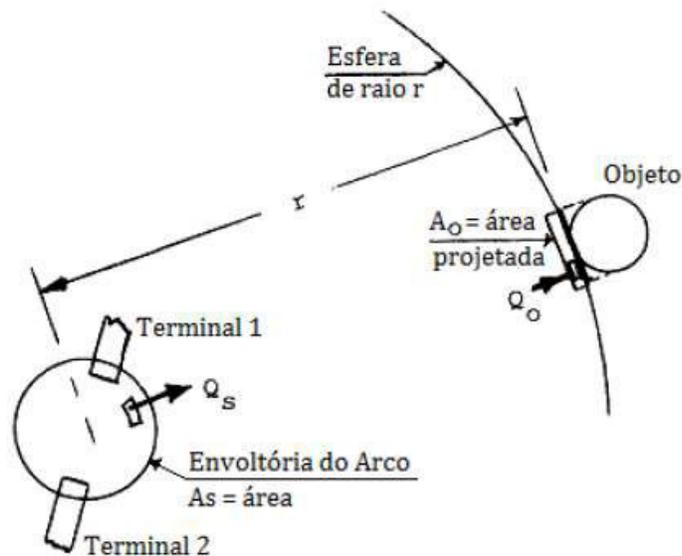
$A_s$  área total da superfície da fonte

$r$  distância do centro da fonte ao objeto

$A_0$  área do objeto projetada em um plano normal à direção da fonte ao objeto

A figura a seguir ilustra de forma simplificada as variáveis mencionadas e os elementos a que se referem:

Figura 3 – Abordagem do arco elétrico como fonte de calor



Fonte: Resende (2016).

Fazendo um comparativo entre a energia dissipada do ponto de um curto circuito franco e um arco elétrico, é constatado que a energia térmica dissipada no arco elétrico é muito maior que a dissipada no curto franco, mesmo a corrente de curto circuito máxima sendo a corrente de um curto circuito franco. De acordo com Dunki-Jacobs, a energia dissipada no ponto de falta depende da impedância e do tempo de eliminação da falta conforme a seguinte equação: (MARDEGAN; PARISE, 2018).

$$E = Z \times I_{CC}^2 \times t \quad (2)$$

Onde:

$E$  energia dissipada no ponto da falta.

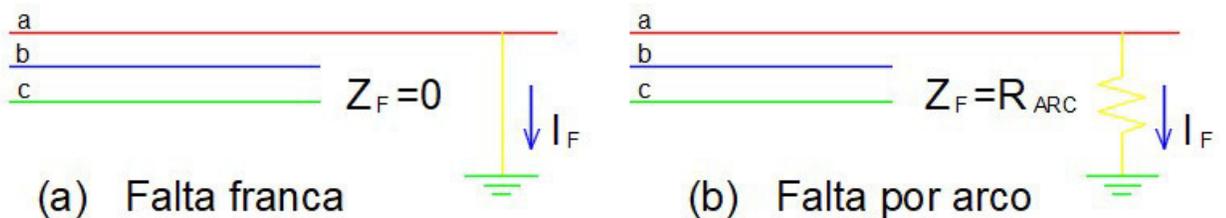
$Z$  impedância da falta.

$I_{CC}$  corrente de falta.

$t$  tempo de eliminação da falta.

Usando a definição feita por Mamede (2017), curto circuito franco é quando o condutor de fase faz contato direto com uma massa aterrada ou com outro condutor, pode-se concluir com a equação (2) que, apesar da corrente de falta ser mais elevada em um curto circuito franco e a energia depender do quadrado da corrente, a impedância do curto circuito é desprezível em um curto franco, fazendo com que a energia seja muito baixa. Quando analisada uma falta por arco elétrico, a impedância não é mais desprezível. Apesar de a corrente de falta ser menor, o produto entre a impedância de curto circuito, o quadrado da corrente de falta e o tempo é muito maior, levando a dissipação de uma energia muito mais elevada no ponto de falta. (MARDEGAN; PARISE, 2018).

Figura 4 – Comparação entre falta franca e falta por arco



Fonte: Adaptado de Mardegan e Parise (2018).

## 2.4. Consequências da exposição ao arco para o ser humano

Em 1982, Ralph Lee, que é considerado o pai da energia incidente, publica o artigo *The other electrical hazard: electric blast burns*. Até então, o choque elétrico recebia todo o protagonismo como risco à segurança dos trabalhadores do setor elétrico. (MARDEGAN; PARISE, 2018). A principal preocupação com o arco elétrico é a elevada temperatura produzida no evento. A temperatura no ponto de ocorrência do arco pode atingir 20.000 °C, quatro vezes a temperatura da superfície do sol. Além da temperatura, vapor tóxico de metais, projeção de metais fundidos, luz extremamente intensa e onda de pressão também trazer riscos significativos para os trabalhadores e, eventualmente, causarem óbito, apesar de a energia incidente ser a principal causa de óbitos em acidentes por arco elétrico. (QUEIROZ, 2011)

A rápida mudança de estado físico dos metais presentes no ponto de falta por arco causa uma alta expansão desses materiais. O cobre, por exemplo, tem uma expansão em torno de 67.000 vezes do seu volume. Essas expansões elevadas e repentinas, geram uma onda de pressão que pode exceder milhares de kgf/ m<sup>2</sup>, podendo ocasionar o rompimento dos tímpanos e o colapso dos pulmões. (QUEIROZ, 2011)

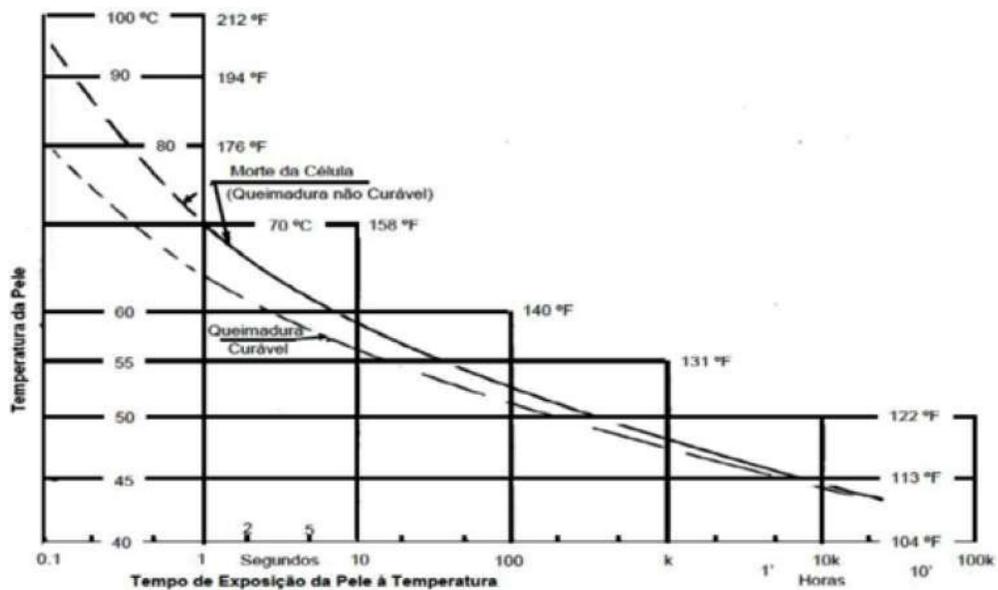
O metal sólido expelido para longe da fonte do arco alcança velocidades que excedem 1.200 km/h. Velocidade suficiente para que esses “projéteis” atravessem o corpo humano (QUEIROZ, 2011). A luz intensa emitida pelo arco causa danos à retina e, associada à elevada temperatura, pode levar ao secamento do globo ocular e causar cegueira (MARDEGAN; PARISE, 2018).

Os humanos são animais que precisam de uma faixa de temperatura curta e próxima de sua temperatura sanguínea normal para sobreviver, em torno de 36,5 °C. Temperaturas muito abaixo disso precisam ser remediadas com isolamento térmica através de roupas, enquanto temperaturas um pouco acima disso são compensadas pelo processo natural de transpiração. Uma temperatura de 44°C por um período de exposição maior que 6h, afeta os mecanismos de equilíbrio de temperatura do corpo humano e começa a danificar as células da pele. A taxa de destruição celular duplica a cada 1°C adicionado entre 44°C e 51°C e acima de 51°C, a destruição celular cresce a

uma taxa muito elevada. Na temperatura de 70°C, um segundo é suficiente para causar a destruição total das células afetadas, enquanto que acima da temperatura de 96°C, uma exposição de 0,1s causa queimaduras incuráveis. (LEE, 1982)

A figura a seguir mostra a relação entre o tempo de exposição à variadas temperaturas e o traçado de uma curva de queimaduras incuráveis (morte celular) e uma curva de queimaduras curáveis:

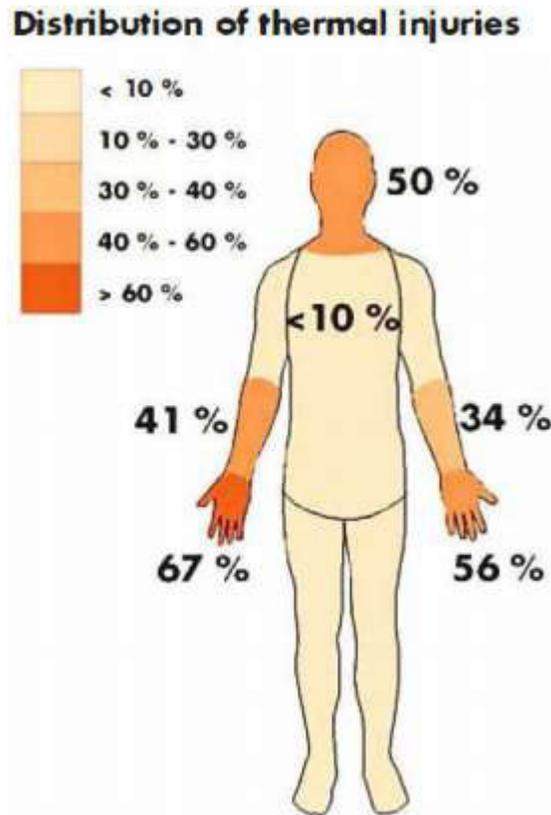
Figura 5 – Relação tempo-temperatura com tolerância da pele



Fonte: Queiroz e Senger (2012).

Um levantamento estatístico realizado pela ISSA (International Social Security Association), uma associação de organizações de seguro para trabalhadores, realizado com 61 casos de acidentes de trabalho causados por arco elétrico na Alemanha ocorridos em 1998, levantou a distribuição das queimaduras pelo corpo das vítimas produzindo a imagem a seguir: (HOAGLAND, 2012)

Figura 6 – Distribuição de queimaduras em vítimas de acidentes com arco



Fonte: Hoagland (2012).

Uma observação importante retirada da imagem anterior é que, enquanto os trabalhadores comumente acreditam que o uso da calça e da camisa térmica é suficiente para a proteção contra a energia incidente, o tronco e as pernas possuíram menos de 10% de ocorrência no levantamento feito. (MARDEGAN; PARISE, 2018). A alta frequência de lesões na face e nas mãos evidencia que a maioria dos trabalhadores não estavam utilizando luvas e proteções faciais adequadas. Contudo, queimaduras nas mãos ou na face não são normalmente suficientes para ocasionar a morte da vítima. Vítimas com 50% do corpo queimado têm mais chance de chegarem ao óbito, o que correspondeu a aproximadamente 10% dos casos registrados nesses estudos. (HOAGLAND, 2012)

### 3. ABORDAGENS NORMATIVAS SOBRE ARCO ELÉTRICO

Com o amadurecimento do processo de industrialização e os progressos nos direitos dos trabalhadores, apareceu a necessidade de normatizar o ambiente de trabalho para fornecer garantias de segurança para que o trabalhador possa exercer suas atividades diárias, principalmente em um ambiente industrial que é, por vezes, insalubre.

Após os resultados dos estudos de Ralph Lee, iniciou-se uma série de estudos para compreender como quantificar os riscos do arco elétrico e como garantir a proteção mais adequada para os trabalhadores sujeitos ao arco elétrico. Esses estudos foram liderados por Estados Unidos, Canadá e União Européia, que acabaram largando na frente das demais nações e tornaram-se as melhores referências em critérios de segurança para a execução de atividades que possam expor o trabalhador ao risco de ser vítima de um arco elétrico. No Brasil, a legislação prevê condições que visam a garantia da segurança do trabalhador, mas com ênfase no choque elétrico. Não há no Brasil requisitos e exigências mínimas de segurança que abordem de forma clara e específica o arco elétrico. (QUEIROZ; SENGER, 2012)

A tabela abaixo retrata cronologicamente alguns marcos importantes nos avanços dos estudos sobre faltas por arcos elétricos e das exigências normativas para buscar maior segurança para os trabalhadores:

Quadro 1 - Evolução dos marcos em estudos de arcos elétricos

<b>ANO</b>	<b>EVENTO</b>
<b>1982</b>	Ralph Lee publica “The other electrical hazard: electrical arc blast burns” modelando o arco e a energia incidente.
<b>1991</b>	OSHA (Occupational Safety and Health Administration) inclui práticas seguras em eletricidade e reconhece o arco elétrico como risco.
<b>1995</b>	A NFPA (National Fire Protection Association) lança a quinta edição da NFPA-70E – Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces (Normas e requisitos de segurança elétrica para os locais de trabalho – tradução livre) incluindo limites de aproximação e arco.
<b>2000</b>	Na sexta edição da norma NFPA-70E são incluídos os conceitos de zona limite para proteção de arco e os EPIs (Roupas e luvas).
<b>2002</b>	Publicação da norma IEEE Std 1584 – IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. Considerado o grande marco pois tornou possível prever vestimentas mais adequadas através de uma estimativa mais aproximada da energia incidente.

<b>ANO</b>	<b>EVENTO</b>
<b>2004</b>	Na sétima edição da norma NFPA-70E, o método de cálculo do IEEE Std 1584 é incluído para a determinação dos EPIs
<b>2004</b>	Publicação e atualização da Norma Regulamentadora nº 10, NR10.

Fonte: Adaptado de Mardegan e Parise (2018).

### **3.1. Normas Estrangeiras**

#### **3.1.1. IEEE Std 1584**

A norma mais relevante sobre arcos elétricos é a IEEE Std 1584 – IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. Isso por fornecer a ferramenta matemática que apresenta resultados mais próximos dos valores reais de energia incidente e distância de segurança para executar trabalhos em zonas de risco de arco elétrico. O modelo matemático apresentado na IEEE 1584 foi desenvolvido através de ajuste de curva (curve fit) de análise estatística de inúmeros testes laboratoriais. Assim, as equações da IEEE 1584 produzem resultados mais realistas, inclusive, do que o método de Ralph Lee. Os resultados pelo método de Ralph Lee são muito conservadores e, por vezes, implicam na necessidade de uso de uma vestimenta com proteção excessiva, o que reduz a mobilidade e dificulta a execução das atividades laborais. (QUEIROZ; SENGER, 2012). É importante ressaltar que a IEEE 1584 não se propõe a dimensionar ou recomendar EPIs adequados para os resultados encontrados com a aplicação de seus modelos matemáticos, sua proposta é ser apenas um guia para o cálculo das variáveis necessárias para que apoiar na escolha das proteções adequadas. (IEEE 1584, 2018).

#### **3.1.2. NFPA – 70E**

Com a primeira edição publicada em 1979, a NFPA-70E – Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces, norma produzida pela NFPA (National Fire Protection Association), é a norma americana que regula os requisitos de segurança contra os perigos de natureza elétrica que os trabalhadores estão expostos, dentre eles o arco elétrico. Como citado no quadro (1), apenas a partir de sua quinta edição, em 1995, a NFPA – 70E abordou medidas de proteção contra arcos elétricos, essa inclusão

foi feita mediante solicitação da OSHA. A NFPA – 70E desde 2004, apoia-se no método da IEEE 1584 e define as classes das vestimentas e as distâncias com risco de arco, além de medidas para prevenção contra choques elétricos. A figura a seguir ilustra a estrutura da norma: (MARDEGAN; PARISE, 2018)

Quadro 2 - Estrutura da norma NFPA 70E

<b>Capítulo</b>	<b>Conteúdo</b>
Introdução	Material introdutório e explanatório
Capítulo 1 – Segurança Relativa a Práticas de Trabalho	Aplica-se geralmente à segurança em eletricidade nos locais de trabalho
Capítulo 2 – Segurança Relativa a Requisitos de Manutenção	Aborda a segurança relativa a requisitos de manutenção
Capítulo 3 – Segurança Relativa a Equipamentos Especiais	Modifica os requisitos gerais do Capítulo 1
Anexos Informativos	Material informativo e não mandatório

Fonte: Adaptado de Mardegan e Parise (2018).

Os aspectos que se referem às definições de distâncias mínimas para a aproximação de terminais energizados para proteção contra arcos, definição de itens de vestimenta necessários para cada atividade, definição do grau de proteção das vestimentas para os correspondentes níveis de energia incidente e as normas da ASTM (American Society for Testing and Material) que regulam teste e fabricação de cada peça de vestimenta para proteção contra arco elétrico são encontrados no Capítulo 1 seção 130. O Anexo D é informativo e traz a metodologia de cálculo para a energia incidente e distâncias de segurança. O Anexo M aborda o uso de camadas de roupas para proteção contra arco. (NFPA 70E, 2015)

Os cálculos de distâncias mínimas presentes na NFPA 70E, consideram a distância entre a fonte do arco e face e caixa torácica do trabalhador para a execução de cada atividade. É determinado também que o cálculo da energia incidente e o

dimensionamento da vestimenta adequada é de responsabilidade do empregador. A seleção do EPI é feita por classificações de risco encontradas em tabela 130.7(C)(16) da NFPA 70E. (QUEIROZ; SENGER, 2012).

### 3.1.3. Normas da ASTM

É importante citar também algumas das normas da ASTM que regulam os requisitos para os testes de vestimentas e acessórios relacionados à proteção contra arco elétrico. A ASTM F1506 é a norma que define os requisitos de ensaio, ASTM F1959 traz a metodologia a ser aplicada nos ensaios. Há ainda uma específica para testes de equipamentos para a proteção facial e de olhos, a ASTM F2178. (RESENDE, 2016)

Para os testes e categorizações dos tecidos, aparecem definições importantes. Arch Thermal Performance Value (ATPV) da vestimenta, é o valor de desempenho térmico de um arco elétrico. O ATPV é definido como o valor de energia incidente que resulta na probabilidade de 50% que o calor transferido pela amostra cause uma queimadura de segundo grau. Essa probabilidade é definida com base na comparação com a Curva de Stoll, que é uma curva resultante de um modelo empírico que estima a lesão por queimadura de segundo grau. (RESENDE, 2016)

### 3.1.4. Normas Canadenses

No Canadá, a norma mais relevante que aborda segurança em eletricidade é fortemente influenciada pela NFPA – 70E. A CSA Z462 – Workplace Electrical Safety, que regula os requisitos de segurança para os trabalhadores que podem estar expostos a riscos trazidos pela eletricidade. Na CSA Z462, pode-se encontrar anexos que tratam especificamente sobre a mitigação de riscos associados aos arcos elétricos. No Anexo P, há recomendações para a avaliação de risco de arco elétrico conforme método previsto pela norma e há também os requisitos de seleção de EPIs necessários para as atividades a serem realizadas pelo trabalhador. Esse anexo é similar ao anexo O da NFPA 70E. (QUEIROZ; SENGER, 2012)

### 3.1.5. Normas Europeias

A União Europeia publicou em 1989 a Diretiva 89/391/EEC – *Measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work* (Medidas para encorajar melhorias na segurança e saúde dos trabalhadores no ambiente de trabalho – tradução livre). É considerada uma norma rígida no que tange as obrigações dos empregadores, delegando-os a obrigação das avaliações de riscos e a adoção de medidas para mitigá-los sem especificar detalhadamente os riscos a serem mitigados. Outra eminente norma europeia e que aborda a segurança em eletricidade para trabalhadores é a EM 5110-1 - *Operation of Electrical Installations* (Operação de Instalações Elétricas). Uma diferença dessa norma com as normas americanas e canadense é que essa norma tem mais ênfase em soluções de projeto e de engenharia que possam mitigar os riscos para que haja menos necessidade de EPIs para a execução das atividades laborais. (QUEIROZ; SENGER, 2012)

## 3.2. Abordagem normativa Brasileira

### 3.2.1. Norma Regulamentadora nº 10

Estabelecidas pela Portaria nº 3.214 de 08 de junho de 1978, as Normas Regulamentadoras – NR – do Capítulo V, Título II, da Consolidação das Leis do Trabalho, relativas à Segurança e Medicina do trabalho são as principais normas que regulam os requisitos de segurança do trabalho no Brasil em diversos aspectos e em caráter obrigatório e com fiscalização pelo Ministério do Trabalho. Dentre as NRs criadas pela portaria, a NR 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade é a norma que estabelece os requisitos de segurança para trabalhadores que operam de forma direta ou indireta a eletricidade. (RESENDE, 2016)

Em seu primeiro item, a NR 10 define seus objetivos e campos de aplicação. Em seu subitem 10.1.1, a NR 10 (2016, p.1) diz o seguinte:

“Esta Norma Regulamentadora - NR estabelece os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que,

direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade”.

No subitem seguinte, 10.1.2, a NR 10 (2016, p. 1) define seus campos de aplicação do seguinte modo:

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

A NR 10 passou por uma importante atualização em 2004. A necessidade dessa atualização surgiu, principalmente, a partir de 1998, quando foi dado início aos processos de privatização do setor elétrico brasileiro, que privatizou aproximadamente 80% do setor de distribuição e 20% da geração. As mudanças de empresas trouxeram alterações nos procedimentos de trabalho e nas tecnologias que vinham sendo empregadas. (RESENDE, 2016)

Mudanças administrativas, terceirizações, mudanças de tecnologias e de procedimentos culminaram em um aumento de desempregos e aumento do número de acidentes envolvendo eletricidade. Em meio a essa situação, o Ministério do Trabalho promoveu a atualização da norma. O texto final foi aprovado em novembro de 2003 e publicado em 7 de dezembro de 2004 através da Portaria MTE nº 589. Foi concedido um tempo para a adequação a nova norma e o novo texto entrou em vigência apenas em dezembro de 2006. (RESENDE, 2016)

Apesar de ser a principal referência normativa brasileira em segurança para o trabalho direto ou indireto com a eletricidade, a NR 10 não aborda diretamente a mitigação de riscos trazidos por arcos elétricos. O arco elétrico aparece diretamente no conteúdo programático do treinamento básico em NR 10 definido na própria norma como Riscos em instalações e serviços com eletricidade (a) arcos elétricos; queimaduras e quedas. Entretanto, não entrando no escopo métodos de cálculo para estimar as grandezas envolvidas em um eventual arco elétrico e nem o dimensionamento de EPIs.

O arco elétrico aparece ainda de forma implícita nos seguintes itens: (QUEIROZ; SENGER, 2012)

- 10.3.9.a: Nesta alínea é definido como um dos requisitos obrigatórios para o memorial descritivo de projetos de instalações elétricas “especificação das características relativas à proteção contra choques elétricos, queimaduras e outros riscos adicionais” (NR 10, 2016). A proteção contra arcos elétricos entra em queimaduras e em riscos adicionais, já que não foi citado diretamente.
- 10.2.9.2: Neste item, a norma diz que “As vestimentas de trabalho devem ser adequadas às atividades, devendo contemplar a condutibilidade, inflamabilidade e influências eletromagnéticas” (NR 10, 2016). Para que se dimensione vestimentas adequadas para execução de atividades laborais em instalações elétricas, é necessário o estudo de energia incidente para prevenção de queimaduras por arcos elétricos.
- 10.12.1: Este item diz o seguinte “As ações de emergência que envolvam as instalações ou serviços com eletricidade devem constar do plano de emergência da empresa” (NR 10, 2016). Para um plano de emergência adequado, é preciso considerar todos riscos que o trabalhador está vulnerável ao atuar direta ou indiretamente com eletricidade, portanto é necessário prever a possibilidade de um acidente por arco elétrico. (QUEIROZ; SENGER, 2012)

### 3.2.2. Norma Regulamentadora nº 6

Mais uma norma estabelecida através da Portaria nº 3.214 de 08 de junho de 1978 e que possui relevância no assunto de proteções contra arcos elétricos é a Norma Regulamentadora nº 6, intitulada “Equipamento de Proteção Individual – EPI”. Apesar de relevante, a NR 6 não trata de forma específica as proteções contra arcos elétricos. O objetivo da norma definido em seu primeiro item é o seguinte: (NR 6, 2018, p.1)

“Para os fins de aplicação desta Norma Regulamentadora - NR, considera-se Equipamento de Proteção Individual - EPI, todo dispositivo ou produto, de uso individual utilizado pelo trabalhador, destinado à proteção de riscos suscetíveis de ameaçar a segurança e a saúde no trabalho”

Além disso, estabelece no item 6.3 como obrigação da empresa o fornecimento a seus funcionários, de forma gratuita, EPIs adequados aos riscos inerentes a execução das atividades que desempenham. (CHOUCAIR, 2011)

#### 4. MODELAGENS MATEMÁTICAS DA ENERGIA INCIDENTE

Por definição, a energia elétrica liberada em uma falta por arco elétrico é encontrada pela integral do produto entre a tensão instantânea e a corrente instantânea do arco elétrico no decorrer do tempo de falta. Uma vez que o arco possui características puramente resistivas, a integral desse produto resulta na potência ativa. (RESENDE, 2016)

$$E_a = \int_0^t v_a(t) \cdot i_a(t) \cdot dt \quad (3)$$

Onde:

$E_a$  energia produzida no arco elétrico;

$v_a(t)$  tensão de arco;

$i_a(t)$  corrente de arco.

Como já mencionado no Capítulo 2, o arco elétrico não pode ser descrito pela matemática fatorial, isso torna a tarefa de determinação da integral acima algo não tão simples e direto. Assim, modelos matemáticos foram desenvolvidos para tentar prever de forma precisa a corrente de curto circuito por arco e a energia incidente que uma pessoa possa estar submetida no ambiente em que se desenvolve o arco elétrico. Conseqüentemente, os modelos matemáticos consolidados são fruto de modelos estatísticos criados a partir de repetidos ensaios em diferentes amostras para que seja possível chegar a um equacionamento usando ferramentas matemáticas de ajuste de curvas (*curve fit*). (MARDEGAN; PARISE, 2018)

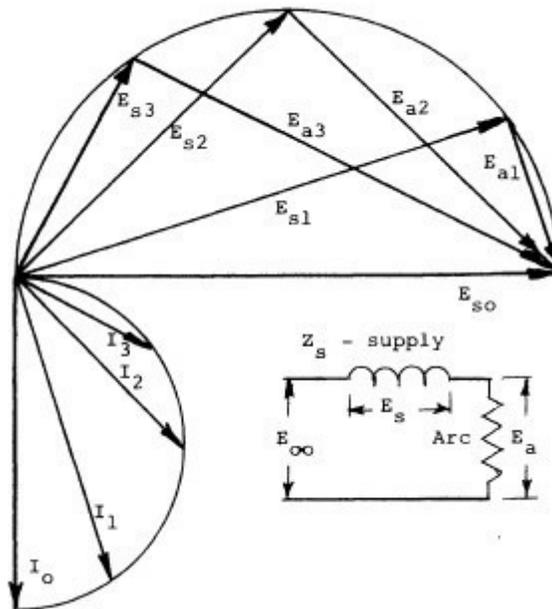
Neste capítulo, serão abordados os métodos sugeridos no anexo informativo D da NFPA 70E, são eles Ralph Lee, Doughty-Neal e IEEE 1584, as limitações e de cada modelo. Uma atenção especial será dada ao modelo proposto na IEEE 1584 (2018), pois este será utilizado no capítulo seguinte na definição de valores de corrente de arco, distâncias de segurança e energia incidente em um estudo de caso para a comparação com os valores obtidos por Queiroz (2011) na aplicação do modelo IEEE 1584 (2002).

#### 4.1. Método de Ralph Lee

Considerado o pai do arco elétrico por ter sido pioneiro nos estudos de arco elétrico e a abordagem do arco elétrico como um perigo associado à eletricidade, em 1982, em seu artigo *The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns* (O Outro Perigo Associado à Eletricidade: Queimaduras por Explosão em Arco Elétrico – tradução livre), Ralph Lee trouxe evidência para as consequências da exposição a arco elétrico e propôs sua metodologia para a determinação de distâncias seguras de operação para evitar a possibilidade de queimaduras incuráveis. (LEE, 1982)

Em seu método, Lee modelou o arco elétrico como uma resistência estática e resumiu o circuito da falta por arco em uma fonte de tensão  $E_{\infty}$ , a impedância do sistema  $Z_s$  e a resistência do arco  $R_a$ . (Resende, 2016) A figura a seguir mostra o modelo adotado por Lee:

Figura 7 – Diagrama fasorial de tensão e corrente de arco



Fonte: Lee (1982).

Na figura (7), tem-se a o diagrama fasorial para quatro distâncias diferentes de arco elétrico: uma com distância nula (falta franca), uma com a distância mais curta (subscrito 1), uma com a distância moderada (subscrito 2) e uma com maior distância

(subscrito 3). Com o arco modelado como uma resistência e a impedância da fonte modelada como uma reatância, percebe-se que a o fasor tensão de arco e o fasor tensão da impedância da fonte estarão sempre em quadratura e suas somas resultarão em  $E_{S0}$  que também será igual a  $E_{\infty}$ . As correntes de falta serão  $I_0, I_1, I_2,$  e  $I_3$ , sempre em ângulo reto com o  $E_S$  correspondente são relacionadas com  $E_S$  por  $I = E_S/Z_S$ , uma vez que  $Z_S$  é considerado constante. (LEE, 1982)

Nessas condições, Lee observou que, conforme estabelece a teoria de circuitos elétricos, a máxima transferência de potência para o circuito da figura (7) dá-se quando  $Z_S = R_a$ . Assim, a máxima potência dissipada em um arco elétrico pode ser calculada como a metade da potência de curto circuito no ponto em que o arco se desenvolve. A equação a seguir mostra a energia incidente segundo a metodologia desenvolvida por Lee: (RESENDE, 2016)

$$E = \frac{793 \times I_{bf} \times V \times t_A}{D^2} \quad (4)$$

- $E$  energia incidente em cal/cm<sup>2</sup>;
- $I_{bf}$  corrente de curto circuito, em kA;
- $V$  tensão de linha, em V;
- $t_A$  tempo de duração do arco, em segundos;
- $D$  distância de trabalho do ponto de arco elétrico, em polegadas;

Outra grande contribuição de Lee foi o cálculo da distância segura de operação. Para isso, Lee usou a Curva de Stoll, já mencionada no Capítulo anterior, para determinar um limiar de energia incidente capaz de causar uma queimadura curável e assim determinar, com a equação anterior, uma equação que fornece os limites de distância para a aproximação de locais passíveis da ocorrência de um arco elétrico. A equação da distância encontra-se a seguir: (LEE, 1982)

$$D_C = \sqrt{2,65 \times MVA_{bf} \times t_A} \quad (5)$$

$$= \sqrt{53 \times MVA \times t_A} \quad (6)$$

$$D_f = \sqrt{1,96 \times MVA_{bf} \times t_A} \quad (7)$$

$$= \sqrt{39 \times MVA \times t_A} \quad (8)$$

Onde:

- $D_C$  distância para uma queimadura curável, em pés;  
 $D_f$  distância para uma queimadura incurável, em pés;  
 $MVA_{bf}$  potência de falta no ponto de ocorrência da falta, em MVA;  
 $MVA$  potência do transformador em MVA, para transformadores de potência menor que 0,75MVA, multiplicar por um fator de 1,25;  
 $t_A$  tempo de duração do arco, em segundos.

Fixando o tempo de exposição ao arco elétrico em 0,1 segundos, 6 ciclos de 60Hz, Lee construiu a tabela a seguir que, para um conjunto de distâncias, fornece os limites de energia do arco elétrico que pode provocar queimaduras curáveis e incuráveis. Para essa tabela, foi desconsiderado o movimento do arco para adotar o pior cenário possível.

Tabela 1 – Potências de arco necessárias para ocasionar queimaduras curáveis e incuráveis para diferentes distâncias

Distância		Energia do Arco (MW)	
Polegadas	Centímetros	Curável	Incurável
20	50	5,2	7
24	61	7,5	10
30	76,2	11,8	16
36	81,4	17	23
60	152,4	47	64
120	304,8	189	256

Fonte: Adaptada de Lee (1982).

Em resumo, os resultados dos estudos de Lee aqui apresentados se aplicam para ambientes fechados e os parâmetros necessários são os listados abaixo: (CUSSOLIN; LAUFER, 2017)

- Tensão do sistema, que deve ser superior a 600V;
- Corrente máxima de curto circuito trifásica;
- Tempo total para a atuação da proteção no ponto de ocorrência do arco para a condição de corrente máxima de curto circuito;
- Distância entre o trabalhador e o ponto onde pode haver um arco elétrico.

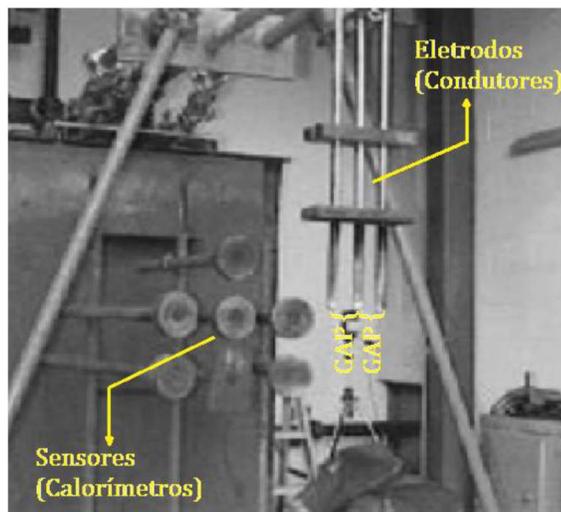
#### **4.2. Método de Doughty e Neal**

Em 2000, Richard L. Doughty e Thomas E. Neal publicaram um artigo intitulado “Predicting Incident Energy to Better Manage the Electric Arc Hazard on 600 V Power Distribution Systems” (Calculando Energia Incidente para Melhor Gerenciar o Risco de Arco Elétrico em Sistemas de Distribuição de 600V – tradução livre) com metodologia própria para o cálculo de energia incidente para sistemas de tensão de até 600V para ambientes abertos e fechados. O grande avanço trazido pelos resultados de Doughty e Neal foi que, diferente do método de Lee, este método não é resultante apenas de estudos teóricos, mas é resultado de muitos testes realizados em laboratório, levando a uma estimativa mais aproximada dos valores de energia incidente. (DOUGHTY; NEAL; FLOYD, 2000)

Os testes foram conduzidos com eletrodos de cobre de 3/4 de polegadas de diâmetro uniformemente espaçados de 1,25 polegadas e a energia incidente foi medida através de calorímetros de cobre. Os dados de corrente de falta, tensão, elevação de temperatura dos calorímetros e duração do arco foram coletados e armazenados para dois arranjos, o primeiro com os eletrodos dispostos em ambiente aberto e o segundo com os eletrodos localizados em uma caixa metálica de dimensões 20x20x20 polegadas. Para cada arranjo, uma matriz de sete calorímetros foi posicionada a uma distância específica, sendo um conjunto de três calorímetros em uma linha horizontal na mesma

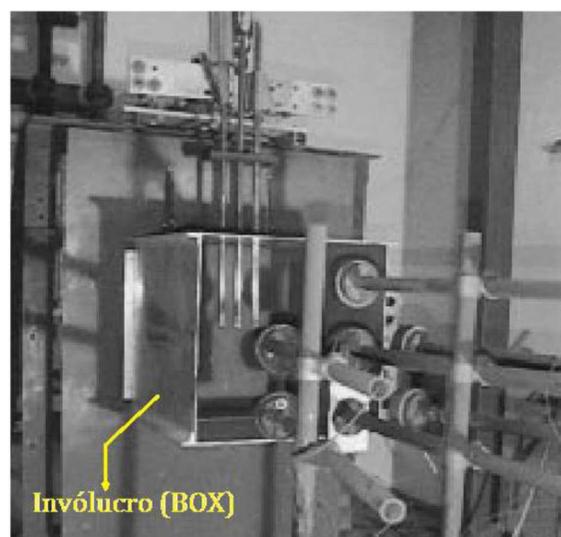
altura das extremidades dos eletrodos, um segundo conjunto de três calorímetros localizados 6 polegadas abaixo da linha das extremidades dos eletrodos e um calorímetro posicionado 6 polegadas acima da extremidade dos eletrodos. As imagens a seguir retratam os arranjos feitos por Doughty e Neal para seus experimentos: (DOUGHTY; NEAL; FLOYD, 2000).

Figura 8 – Arranjo para experimento de arco em ambiente aberto



Fonte: Resende (2016).

Figura 9 – Arranjo para experimento de arco em ambiente fechado



Fonte: Resende (2016).

Por ser resultado de experimentos laboratoriais e não de formulações teóricas que necessitam de algumas considerações, como o método de Ralph Lee, o método de Doughty e Neal representaram um significativo avanço nos estudos e na compreensão de arcos elétricos por serem menos conservadores e retratarem de forma mais realista a energia incidente em uma falta por arco. Contudo, os resultados de Doughty e Neal corroboraram a previsão de Ralph Lee de que nem toda a energia entregue pela fonte na ocorrência de um arco elétrico é transferida como energia incidente. Uma parcela relevante dessa energia, que pode variar de 3 a 20%, é consumida na fusão e vaporização dos metais dos condutores. (RESENDE, 2016)

É essencial que as restrições e parâmetros sejam estritamente seguidos para a aplicação desse método, pois as equações desenvolvidas por Doughty e Neal nem sempre retratam o pior cenário possível. Os parâmetros necessários para o uso do método de Doughty e Neal são: (NFPA 70E, 2015)

- Corrente de curto trifásico circuito máxima e corrente de curto circuito mínima para que um arco elétrico possa se sustentar;
- Tempo de extinção do arco;
- Distância entre o trabalhador e o ponto onde pode haver um arco elétrico;
- Tensão do sistema igual ou inferior a 600V.

A norma NFPA 70E (2015) sugere como distâncias típicas entre o trabalhador e os terminais energizados de alguns elementos comuns em instalações elétricas as seguintes:

- Quadros de distribuição e Centros de Controle de Motores (CCM) de tensão inferior ou igual a 600V – 455 mm (18 polegadas);
- Disjuntores de tensão igual ou inferior a 600V – 610 mm (24 polegadas);
- Média tensão (acima de 600 V) – 910 mm (36 polegadas).

As equações resultantes do trabalho de Doughty e Neal são as seguintes:

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

Onde:

$E_{MA}$	energia incidente máxima em ambiente aberto, em cal/cm <sup>2</sup> ;
$D_A$	distância entre o trabalhador e os terminais energizados, em polegadas;
$F$	corrente de curto circuito em kA (para um a variação entre 16kA e 50kA);
$t_A$	tempo de duração do arco, em segundos.

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

$E_{MB}$	energia incidente máxima em ambiente fechado, em cal/cm <sup>2</sup> ;
$D_B$	distância entre o trabalhador e os terminais energizados, em polegadas;
$F$	corrente de curto circuito em kA (para um a variação entre 16kA e 50kA);
$t_A$	tempo de duração do arco, em segundos.

Uma constatação relevante das equações (9) e (10) é a relação linear entre a energia incidente e o tempo de duração do arco. Dessa relação decorrem a maioria das soluções para a redução dos níveis de energia incidente para a produção de ambientes mais seguros para os trabalhadores. (RESENDE, 2016)

### 4.3. Método IEEE 1584

O IEEE, *Institute of Electrical and Electronic Engineers*, é uma sociedade técnico-profissional internacional que visa a promoção de avanços na área de engenharia elétrica, eletrônica e de computação (IEEE, 2018). Em 2002, o IEEE lançou a primeira versão da norma IEEE 1584 – *IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations* (Guia IEEE para Realizar Cálculos de Risco de Arcos Elétricos – tradução livre) que propôs um método de cálculos de energia incidente e distâncias de segurança que vinha para cobrir as principais limitações dos métodos vigentes de Ralph Lee e Doughty e Neal.

O método IEEE 1584 é resultante de modelos derivados empiricamente com uso de análise estatística e ajuste de curvas aplicadas a dados coletados de testes e aos conhecimentos da física do Arco Elétrico. Em 2018, uma nova versão foi lançada trazendo novos modelos de cálculo e considerando diferentes arranjos de eletrodos para atingir resultados cada vez mais acurados. (IEEE 1584, 2018)

Os modelos desenvolvidos pelo IEEE são válidos dentro das seguintes condições: (IEEE 1584, 2018)

- Tensão do sistema deve ser entre 208V e 15000V;
- O sistema deve ser trifásico;
- Frequência entre 50Hz e 60Hz;
- Corrente de curto circuito trifásico entre 500A e 106kA para sistemas com tensão entre 208V e 600V e entre 200A e 65kA para sistemas com tensão de 601V a 15kV;
- Espaçamento entre os condutores deve ser entre 6,35 mm e 76,2 mm para sistemas com tensão entre 208V e 600V e entre 19,05mm e 254mm para sistemas com tensão de 601V a 15kV.

A aplicação do método IEEE1584 envolve nove passos listados no quadro (3):

Quadro 3 - Passos para aplicação do modelo matemático da IEEE 1584

<b>Etapa</b>	<b>Atividade</b>
1	Coleta de dados da instalação e do sistema.
2	Determinação do modo de operação do sistema.
3	Determinação das correntes de curto circuito.
4	Determinar o espaçamento entre condutores e dimensões de invólucro típicos para a classe de tensão.
5	Determinar as configurações dos eletrodos dos Equipamentos.
6	Determinar as distâncias de trabalho.
7	Calcular a corrente de arco.

<b>Etapa</b>	<b>Atividade</b>
8	Determinar a duração do arco.
9	Calcular a energia incidente.
10	Determinar as distâncias de segurança de todos os equipamentos.

Fonte: Adaptado de IEEE 1584 (2018).

#### 4.3.1. Coleta de Dados do Sistema

A primeira etapa requer um levantamento das características do sistema a ser estudado e dos componentes nele empregados. Para isso, os diagramas unifilares da instalação devem estar completos e atualizados. Com o diagrama, devem ser levantados todos os dados necessários para o cálculo das correntes de curto circuito levando em consideração todas as fontes possíveis de alimentação do curto circuito (concessionária, geradores e motores acima de 37kW). (QUEIROZ; SENGER, 2012)

#### 4.3.2. Determinação do Modo de Operação do Sistema

Um sistema elétrico pode apresentar mais de uma configuração e até mesmo modificar seu modo de operação diante de mudanças de suas cargas. Um sistema complexo pode apresentar dois ou mais das seguintes formas de operação: (IEEE 1584, 2018)

- a) Um ou mais alimentadores da concessionária em serviço;
- b) Disjuntor de barramento do secundário da subestação da concessionária aberto ou fechado;
- c) Subestações com um ou dois alimentadores primários
- d) Subestações com dois transformadores com disjuntores de interligação de barramentos no secundário aberto ou fechado;
- e) CCM's com um ou dois alimentadores sendo um ou ambos energizados;
- f) Geradores funcionando em paralelo com a alimentação da concessionária ou em modo de espera;
- g) Sistema da concessionária configurado para atuação em corrente mínima ou máxima de falta;

h) Geradores atuando com carga máxima ou mínima;

#### 4.3.3. Determinação da Corrente de Curto Circuito

O estudo de arco elétrico em uma instalação deve ser baseado em um estudo atualizado de curto circuito, caso não haja um estudo, ou não esteja atualizado, o estudo de curto circuito integrará como parte do estudo de arco elétrico (IEEE 1584, 2018). Os valores de corrente de curto circuito devem ser determinados principalmente nos pontos da instalação onde os trabalhadores desenvolvem suas atividades e em áreas sujeitas à necessidade de manutenção ou chaveamento enquanto energizadas. (QEIROZ; SENGER, 2012)

#### 4.3.4. Espaçamento Entre Condutores e Dimensões de Invólucro.

Os valores de distância entre os eletrodos ou as dimensões dos invólucros em que os eletrodos estão contidos podem ser medidos em campo e utilizados no cálculo, mas a IEEE 1584 também apresenta uma tabela com valores típicos de distanciamento entre barramentos e condutores e dimensões do invólucro para que possam ser usados como referência para os cálculos, especialmente quando o cálculo de energia incidente está sendo realizado antes da implantação da instalação. As distâncias encontradas na tabela a seguir foram as distâncias utilizadas nos ensaios feitos pelo IEEE para a obtenção dos modelos matemáticos do método proposto pela norma. (IEEE 1584, 2018)

Tabela 2 – Distâncias típicas entre condutores por classe de equipamentos

Classe do Equipamento	Distância típica entre condutores, ou <i>gap</i> (mm)	Dimensões de Invólucro (H x W x D)	
		Milímetros	Polegadas
Disjuntor 15kV	152	1143 x 762 x 762	45 x 30 x 30
CCM 15kV	152	914,4 x 914,4 x 914,4	36 x 36 x 36
Disjuntor 5kV	104	914,4 x 914,4 x 914,4	36 x 36 x 36
Disjuntor 5kV	104	1143 x 762 x 762	45 x 30 x 30
CCM 5 kV	104	660,4 x 660,4 x 660,4	26 x 26 x 26
Disjuntor de Baixa Tensão	32	508 x 508 x 580	20 x 20 x 20
CCMs e Quadros de Baixa Tensão rasos	25	355,6 x 304,8 x ≤ 203,2	14 x 12 x ≤ 8

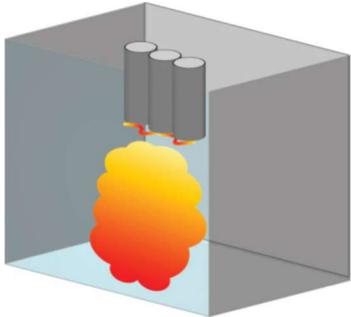
Classe do Equipamento	Distância típica entre condutores, ou <i>gap</i> (mm)	Dimensões de Invólucro (H x W x D)	
		Milímetros	Polegadas
CCMs e Quadros de Baixa Tensão profundos	25	355,6 x 304,8 x > 203,2	14 x 12 x > 8
Caixa de passagem de cabos	13	355,6 x 304,8 x ≤ 203,2	14 x 12 x ≤ 8
		ou 355,6 x 304,8 x > 203,2	ou 14 x 12 x > 8

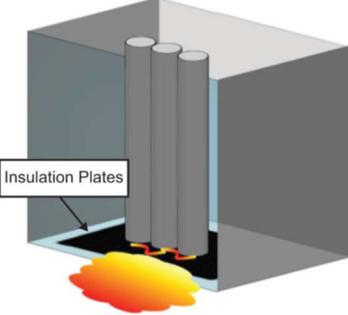
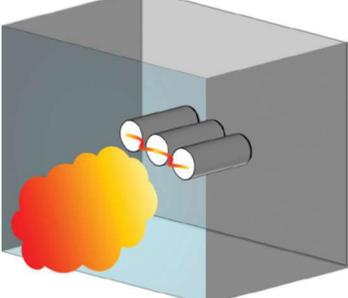
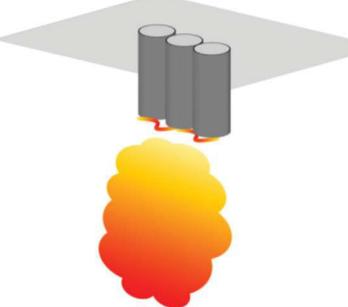
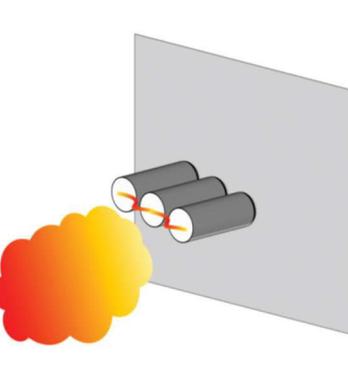
Fonte: Adaptado de IEEE 1584 (2018).

#### 4.3.5. Determinar as Configurações dos Eletrodos dos Equipamentos

Uma das novidades da versão de 2018 da IEEE 1584 é usar o arranjo dos eletrodos como fator para o cálculo da energia incidente. A disposição dos terminais pode determinar a movimentação da nuvem de plasma expelida durante o arco elétrico e interferir nos valores de energia incidente e gerar resultados diferentes para eletrodos submetidos aos mesmos parâmetros, mas com arranjos diferentes. Para abordar os casos, foram feitos testes com eletrodos em cinco configurações. A tabela a seguir demonstra as configurações reconhecidas na IEEE 1584 e entre parênteses a forma como a norma identifica cada um dos arranjos baseados em siglas que descrevem os arranjos:

Tabela 3 – Arranjos de eletrodos de teste e correlação com equipamentos

	Configuração dos Eletrodos em Teste	Configuração dos Eletrodos em Equipamentos
Condutores verticais; Eletrodos em caixa metálica; Enclausurado; (VCB)		

	Configuração dos Eletrodos em Teste	Configuração dos Eletrodos em Equipamentos
<p>Condutores verticais; Eletrodos terminados em barreira isolante em caixa metálica; Enclausurado; (VCBB)</p>		
<p>Condutores horizontais; Eletrodos em caixa metálica; Eletrodos em ar livre (HCB);</p>		
<p>Condutores verticais; Eletrodos ao ar livre (VOA);</p>		
<p>Condutores horizontais; Eletrodos ao ar livre (HOA);</p>		

Fonte: Adaptado de IEEE 1584 (2018).

#### 4.3.6. Determinação da Distância de Trabalho

Cálculos de energia incidente, comumente, consideram como distância de trabalho a distância entre a cabeça ou o tronco da pessoa que está sujeita ao acidente com arco elétrico. A tabela abaixo é baseada na tabela 10 da IEEE 1584 que faz considerações sobre valores típicos de distância de trabalho para diferentes equipamentos e de diferentes classes de tensão. (IEEE 1584, 2018)

Tabela 4 – Distâncias de trabalho típicas para diferentes equipamentos

Classe do Equipamento	Distância de trabalho	
	Milímetros	Polegadas
Disjuntor 15kV	914,40	36
CCM 15kV	914,40	36
Disjuntor 5kV	914,40	36
CCM 5 kV	914,40	36
Disjuntor de Baixa Tensão	609,60	24
CCMs e Quadros de Baixa Tensão rasos	457,20	18
CCMs e Quadros de Baixa Tensão profundos	457,20	18
Caixa de passagem de cabos	457,20	18

Fonte: Adaptado de IEEE 1584 (2018).

#### 4.3.7. Cálculo da Corrente de Arco

A IEEE 1584 2018 usa dois modelos para a determinação da corrente de arco elétrico que abrangem diferentes faixas de tensão do sistema a ser estudado. Tem-se, portanto:

- Modelo para  $600V < V \leq 15\ 000V$ ;
- Modelo para  $208V < V \leq 600V$ .

O modelo consiste em dois passos para encontrar os valores de corrente de arco, energia incidente e limite de aproximação, primeiro são encontrados valores intermediários que devem então ser interpolados para que se encontre os valores finais. (IEEE 1584, 2018)

#### 4.3.7.1. Corrente de arco para tensão entre 600 e 15.000V

Segundo o modelo presente na IEEE 1584 (2018), os valores intermediários de corrente são obtidos pela seguinte equação:

$$I_{arc_{Voc}} = 10^{(k1+k2\log I_{bf}+k3\log G)}(k4I_{bf}^6 + k5I_{bf}^5 + k6I_{bf}^4 + k7I_{bf}^3 + k8I_{bf}^2 + k9I_{bf} + k10) \quad (11)$$

Onde:

$I_{bf}$	corrente de curto circuito trifásico simétrico, em kA;
$I_{arc_{600}}$	corrente de arco para tensão do sistema V=600V, em kA;
$I_{arc_{2700}}$	corrente de arco para tensão do sistema V=2.700V, em kA;
$I_{arc_{14300}}$	corrente de arco para tensão do sistema V=14.300V, em kA;
$k1 a k10$	são coeficientes encontrados na tabela 1 da IEEE 1584, 2018;
$G$	distância entre os condutores (gap), em mm;
$\log$	logaritmo na base 10.

A fórmula acima deve ser aplicada para obter-se três valores intermediários de corrente de arco para tensão nominal do sistema igual a 600v, 2.700V e 14.300V. Os valores dos coeficientes k1 a k10 são obtidos na tabela (1) da IEEE 1584 (2018) e são dependentes da configuração dos eletrodos onde deseja-se encontrar a corrente de arco. Os valores para os coeficientes k da equação (11) estão presentes na tabela 5.

A determinação do valor final da corrente de arco será com a aplicação das seguintes equações

$$I_{arc_{1}} = \frac{I_{arc_{2700}} - I_{arc_{600}}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + I_{arc_{2700}} \quad (12)$$

$$I_{arc_{2}} = \frac{I_{arc_{14300}} - I_{arc_{2700}}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + I_{arc_{14300}} \quad (13)$$

$$I_{arc_{3}} = \frac{I_{arc_{1}}(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{I_{arc_{2}}(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (14)$$

Onde:

$I_{arc\_1}$  primeiro termo da interpolação de  $I_{arc}$  para tensão do sistema entre 600V e 2700V, em kA;

$I_{arc\_2}$  segundo termo da interpolação de  $I_{arc}$  para tensão do sistema maior que 2700V, em kA;

$I_{arc\_3}$  terceiro termo da interpolação de  $I_{arc}$  para tensão do sistema menor que 2700V, em kA;

$V_{oc}$  tensão do sistema, em kV.

Tabela 5 – Tabela 01 da IEEE 1584 (2018)

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

Fonte: IEEE 1584 (2018).

- Se  $600V < V \leq 2.700V$ , a corrente de arco será  $I_{arc} = I_{arc\_3}$ ;
- Se  $V > 2.700V$ , o valor da corrente de arco será  $I_{arc} = I_{arc\_2}$ .

#### 4.3.7.2 Corrente de arco para tensões menores que 600V

O valor final para a corrente de arco em sistemas com tensão menor que 600V pode ser determinada com a seguinte equação: (IEEE 1584, 2018)

$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{0,6}{V_{oc}}\right]^2 \times \left[\frac{1}{I_{arc\_600}^2} - \left(\frac{0,6^2 - V_{oc}^2}{0,6^2 \times I_{bf}}\right)\right]}} \quad (15)$$

Onde:

$V_{oc}$	tensão do sistema, em kV.
$I_{bf}$	corrente simétrica de curto circuito trifásico, em kA;
$I_{arc}$	corrente de arco para a tensão nominal do sistema, em kA;
$I_{arc\_600}$	corrente de arco para tensão do sistema $V=600V$ , em kA;

O valor de  $I_{arc\_600}$  é o mesmo obtido usando a equação (11) apenas para a tensão do sistema igual a 600V.

#### 4.3.7.2 Corrente de Arco Reduzida

A norma orienta ainda um segundo cálculo considerando possíveis valores mínimos para a corrente de falta por arco. Esse valor mínimo de corrente de arco precisa ser verificado pois pode produzir diferença no tempo de atuação da proteção e, conseqüentemente, diferença no valor final da energia incidente. Ao final dos cálculos do valor final da corrente de arco  $I_{arc}$ , e da corrente de arco mínima  $I_{arc\ min}$ , deve ser considerada a corrente que produzir os valores mais altos de energia incidente. A corrente de arco mínima pode ser obtida com a seguinte equação:

$$I_{arc\ min} = I_{arc} \times (1 - 0,5 \times VarC_f) \quad (16)$$

$$VarC_f = k1V_{oc}^6 + k2V_{oc}^5 + k3V_{oc}^4 + k4V_{oc}^3 + k5V_{oc}^2 + k6V_{oc} + k7 \quad (17)$$

Onde:

$VarC_f$	fator de correção de variação de corrente de arco;
$I_{arc}$	corrente de arco para a tensão nominal do sistema, em kA;
$I_{arc\ min}$	corrente de arco mínima baseada no fator de correção de variação de corrente de arco, em kA;
$V_{oc}$	tensão do sistema, em kV;
$k1\ a\ k7$	coeficientes presentes na tabela 2 da IEEE 1584:2018.

A tabela a seguir traz os coeficientes k1 a k7 presentes na tabela 2 da IEEE 1584:2018:

Tabela 6 – Coeficientes para a Equação (17)

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

Fonte: IEEE 1584 (2018).

O fator  $(1 - 0,5 \times VarC_f)$  deve ser aplicado apenas para o valor final da corrente de arco  $I_{arc}$  para valores de tensão do sistema entre 208V e 600V e para  $I_{arc\_600}$ ,  $I_{arc\_2700}$  e  $I_{arc\_14300}$  para casos de sistemas com tensão nominal acima de 600V e menor que 15.000V. (IEEE 1584, 2018)

#### 4.3.8. Determinar a Duração do Arco

O tempo de duração do arco é definido pela IEEE 1584 como o tempo necessário para que a fonte de energia pare de fornecer energia e corrente para o ponto de falta. O tempo de duração de uma falta por arco elétrico é normalmente dependente do tempo de atuação da proteção que vai de fato eliminar a fonte do circuito em falta e da sensibilidade dos equipamentos de medição e de manobra, como relés e transformadores de corrente. Há casos em que a atuação da proteção não determinará o fim do arco, mas o

descarregamento da energia armazenada, como por exemplo em faltas por arco próximo aos terminais de um gerador. (IEEE 1584, 2018)

Na maioria das aplicações, a proteção de sobrecorrente atuará para eliminar a falta por arco. Em situações onde mais de uma proteção possa atuar, como proteções diferenciais e relés de arco, por exemplo, é necessário um estudo para a determinação de qual proteção atuará primeiro. É preciso também considerar todos os atrasos para a determinação do tempo total. Atraso para abertura de disjuntor, comutação de contatos, tempo de processamento e envio de comandos devem ser incluídos para a determinação do tempo total de eliminação da falta. No estudo do tempo de atuação das proteções para os valores das correntes de arco, é preciso calcular também o tempo de atuação para os valores de corrente de arco mínima, pois a variação dessas correntes pode produzir resultados bem distintos de valor final de energia incidente. Se o tempo total obtido for maior que dois segundos, a norma sugere considerar o tempo máximo que uma pessoa pode precisar para fugir da fonte do arco. (IEEE 1584, 2018)

#### 4.3.9. Cálculo de Energia Incidente

Assim como para calcular o valor final de corrente de arco, o cálculo do valor de energia incidente é feito em dois passos. Primeiro encontra-se valores intermediários de energia incidente para diferentes valores de tensão do sistema e esses valores são então interpolados para que se encontre o valor final de energia incidente. O modelo também propõe equações diferentes dependendo da faixa de tensão nominal do sistema a ser estudado.

##### 4.3.9.1. Fator de Correção para o tamanho do Invólucro

Antes de entrar no cálculo da energia incidente, é preciso tratar sobre outro parâmetro importante. Os valores obtidos nos testes realizados pelo IEEE para a elaboração dos modelos matemáticos foram obtidos baseados em invólucros com dimensões de 508mm x 508mm x 508mm. Para que os resultados sejam mais acurados, é necessário o cálculo de um fator de correção ( $CF$ ). Esse foi um dos ganhos em relação à versão anterior da norma, que não considerava o arranjo dos condutores e as dimensões de seus invólucros. (IEEE 1584, 2018)

Primeiramente, o invólucro pode ser classificado como raso ou típico. A depender das seguintes condições:

- A tensão do sistema deve ser menor que 600V;
- Ambos, altura e largura, devem ser menores que 508mm;
- A profundidade do invólucro deve ser menor que 203,2mm.

Caso alguma dessas condições não seja atendida, o invólucro será considerado como típico. (IEEE 1584, 2018)

Tendo a definição do tipo de invólucro, deve-se calcular a altura ( $H_1$ ) e largura ( $W_1$ ) equivalentes com as orientações da tabela (7) e as fórmulas (18) e (19):

$$W_1 = \left( 660,4 + (W - 660,4) \times \left( \frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right) \times 25,4^{-1} \quad (18)$$

$$H_1 = \left( 660,4 + (H - 660,4) \times \left( \frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right) \times 25,4^{-1} \quad (19)$$

Onde:

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

A tabela a seguir aborda diretrizes para a determinação de altura e largura equivalentes para diferentes tamanhos de invólucros e arranjos de eletrodos:

Tabela 7– Guia para determinar altura e largura equivalentes de invólucro

Arranjo dos Eletrodos	Intervalos	<508 (mm)	≥508 e ≤660.4 (mm)	>660.4 e ≤1244.6 (mm)	>1244.6 (mm)
<b>VCB</b>	$W_1$	= 20 (se típico) = 0,03937xW (se raso <sup>a</sup> )	= 0,03937xW	Obtido com a eq. (18) e W	Obtido com a eq. (18) com W=1244,6
	$H_1$	= 20 (se típico) = 0,03937xH (se raso <sup>a</sup> )	= 0,03937xH	= 0,03937xH	=49
<b>VCBB</b>	$W_1$	= 20 (se típico) = 0,03937xW (se raso <sup>a</sup> )	= 0,03937xW	Obtido com a eq. (18) e W	Obtido com a eq. (18) com W=1244,6
	$H_1$	= 20 (se típico) = 0,03937xH (se raso <sup>a</sup> )	= 0,03937xH	Obtido com a eq. (19) e H	Obtido com a eq. (19) com H=1244,6
<b>HCB</b>	$W_1$	= 20 (se típico) = 0,03937xW (se raso <sup>a</sup> )	= 0,03937xW	Obtido com a eq. (18) e W	Obtido com a eq. (18) com W=1244,6
	$H_1$	= 20 (se típico) = 0,03937xH (se raso <sup>a</sup> )	= 0,03937xH	Obtido com a eq. (19) e H	Obtido com a eq. (19) com H=1244,6

<sup>a</sup>Raso apenas quando a tensão do sistema foi menor que 600V e a profundidade menor que 203,2 mm.

Fonte: IEEE 1584 (2018).

O próximo parâmetro a ser determinado é o tamanho de invólucro equivalente, identificado na IEEE 1584 como EES, e é encontrado com a equação a seguir:

$$EES = \frac{H_1 + W_1}{2} \quad (20)$$

$H_1$  altura equivalente do invólucro;  
 $W_1$  largura equivalente do invólucro;  
 $EES$  tamanho de invólucro equivalente.

Com o valor de EES, é possível calcular o fator de correção ( $CF$ ) com as equação (21) para invólucros “Típicos” e a equação (22) para invólucros “Rasos”.

$$CF = b1 \times EES^2 + b2 \times EES + b3 \quad (21)$$

$$CF = \frac{1}{b1 \times EES^2 + b2 \times EES + b3} \quad (22)$$

$b1, b2$  e  $b3$  coeficientes para as equações (21) e (22) presentes na tabela 7 da IEEE 1584, 2018;  
 $CF$  fator de correção de tamanho de invólucro;  
 $EES$  tamanho de invólucro equivalente.

Tabela 8 – Coeficientes para as equações (21) e (22)

Tipo de Invólucro	Arranjo dos eletrodos	b1	b2	b3
Típico	VCB	-0,000302	0.03441	0.4325
	VCBB	-0,0002976	0.032	0.479
	HCB	-0,0001923	0.01935	0.6899
Raso	VCB	0,002222	-0.02556	0.6222
	VCBB	-0,002778	0.1194	-0.2778
	HCB	-0.0005556	0.03722	0.4778

Fonte: Adaptado de IEEE 1584 (2018).

#### 4.3.9.2. Cálculo da Energia Incidente

Primeiramente, é preciso calcular os valores intermediários de energia incidente para que estes sejam posteriormente interpolados com o fim de encontrar o valor final de energia incidente. As equações abaixo determinam os valores intermediários da energia incidente:

$$E_{600} = \frac{12,552}{50} T \times 10 \left( \begin{array}{l} k1+k2 \log G + \frac{k3I_{arc\_600}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + \dots \\ \dots+k11 \log I_{bf}+k12 \log D+k13 \log I_{arc\_600}+\log \frac{1}{CF} \end{array} \right) \quad (23)$$

$$E_{2700} = \frac{12,552}{50} T \times 10 \left( \begin{array}{l} k1+k2 \log G + \frac{k3I_{arc\_2700}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + \dots \\ \dots+k11 \log I_{bf}+k12 \log D+k13 \log I_{arc\_2700}+\log \frac{1}{CF} \end{array} \right) \quad (24)$$

$$E_{14300} = \frac{12,552}{50} T \times 10 \left( \begin{array}{l} k1+k2 \log G + \frac{k3I_{arc\_14300}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + \dots \\ \dots+k11 \log I_{bf}+k12 \log D+k13 \log I_{arc\_14300}+\log \frac{1}{CF} \end{array} \right) \quad (25)$$

$$E_{\leq 600} = \frac{12,552}{50} T \times 10 \left( \begin{array}{l} k1+k2 \log G + \frac{k3I_{arc\_600}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + \dots \\ \dots+k11 \log I_{bf}+k12 \log D+k13 \log I_{arc}+\log \frac{1}{CF} \end{array} \right) \quad (26)$$

$E_{600}$	energia incidente quando $V_{oc} = 600V$ , em $J/cm^2$ ;
$E_{2700}$	energia incidente quando $V_{oc} = 2.700V$ , em $J/cm^2$ ;
$E_{14300}$	energia incidente quando $V_{oc} = 14.300V$ , em $J/cm^2$ ;
$E_{\leq 600}$	energia incidente quando $V_{oc} \leq 600V$ , em $J/cm^2$ ;
$T$	tempo de duração do arco, em s;
$G$	distância entre os condutores (gap), em mm;
$I_{arc\_600}$	corrente de arco para tensão do sistema $V=600V$ , em kA;
$I_{arc\_2700}$	corrente de arco para tensão do sistema $V=2.700V$ , em kA;
$I_{arc\_14300}$	corrente de arco para tensão do sistema $V=14.300V$ , em kA;
$I_{arc}$	corrente final de arco quando $V_{oc} \leq 600V$ , em kA;
$I_{bf}$	corrente de curto circuito trifásico simétrico, em kA;

$D$	distância de trabalho, em mm;
$CF$	fator de correção de tamanho de invólucro ( $CF=1$ para VOA e HOA);
$\log$	logaritmo na base 10;
$k1$ a $k13$	são coeficientes encontrados nas tabelas (3), (4) e (5) da IEEE 1584, 2018 que estão reproduzidas, respectivamente nas tabelas (9), (10) e (11) desse trabalho.

Com os valores intermediários, as equações abaixo são usadas para encontrar os valores finais de energia incidente: (IEEE 1584, 2018)

$$E_1 = \frac{E_{2700} - E_{600}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + E_{2700} \quad (27)$$

$$E_2 = \frac{E_{14300} - E_{2700}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + E_{14300} \quad (28)$$

$$E_3 = \frac{E_1(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{E_2(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (29)$$

$E_1$	primeiro termo da interpolação para tensão do sistema entre 600V e 2700V, em J/cm <sup>2</sup> ;
$E_2$	segundo termo da interpolação de $E$ para tensão do sistema maior que 2700V, em J/cm <sup>2</sup> ;
$E_3$	terceiro termo da interpolação de $E$ para tensão do sistema menor que 2700V, em J/cm <sup>2</sup> ;
$V_{oc}$	tensão do sistema, em kV.

- Se  $600V < V_{oc} \leq 2.700V$ , a energia incidente será  $E = E_3$ ;
- Se  $V_{oc} > 2.700V$ , o valor da energia incidente será  $E = E_2$ ;
- Se  $V_{oc} \leq 600V$ , o valor da energia incidente será  $E = E_{\leq 600}$ .

Tabela 9 – Coeficientes k1 a k13 para as equações (23), (26), (30) e (33)

600 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13
VCB	0.753364	0.566	1.752636	0	0	-4.783E-09	0.000001962	-0.000229	0.003141	1.092	0	-1.598	0.957
VCBB	3.068459	0.26	-0.098107	0	0	-5.767E-09	0.000002524	-0.00034	0.01187	1.013	-0.06	-1.809	1.19
HCB	4.073745	0.344	-0.370259	0	0	-5.382E-09	0.000002316	-0.000302	0.0091	0.9725	0	-2.03	1.036
VOA	0.679294	0.746	1.222636	0	0	-4.783E-09	0.000001962	-0.000229	0.003141	1.092	0	-1.598	0.997
HOA	3.470417	0.465	-0.261863	0	0	-3.895E-09	0.000001641	-0.000197	0.002615	1.1	0	-1.99	1.04

Fonte: IEEE 1584 (2018).

Tabela 10 – Coeficientes k1 a k13 para as equações (24) e (31)

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

Fonte: IEEE 1584 (2018).

Tabela 11 – Coeficientes k1 a k13 para as equações (25) e (32)

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

Fonte: IEEE 1584 (2018).

#### 4.3.10. Cálculo da Distância de Segurança

Esse parâmetro refere-se ao limite de aproximação que uma pessoa pode ter de eletrodos ou condutores energizados para que, em caso de arco, a vítima não esteja exposta a uma energia incidente maior que 1,2 cal/cm<sup>2</sup>. As equações abaixo determinam os valores intermediário das distâncias de segurança AFB (a sigla vem do inglês *Arch-flash Boundary*). (IEEE 1584, 2018)

$$AFB_{600} = 10 \left( \frac{k1+k2 \log G \frac{k3I_{arc\_600}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + k11 \log I_{bf} + k13 \log I_{arc\_600} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{T}}{-k12} \right) \quad (30)$$

$$AFB_{2700} = 10 \left( \frac{k1+k2 \log \frac{k3I_{arc\_2700}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + k11 \log I_{bf} + k13 \log I_{arc\_2700} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{T}}{-k12} \right) \quad (31)$$

$$AFB_{14300} = 10 \left( \frac{k1+k2 \log G \frac{k3I_{arc\_14300}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + k11 \log I_{bf} + k13 \log I_{arc\_14300} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{T}}{-k12} \right) \quad (32)$$

$$AFB_{\leq 600} = 10 \left( \frac{k1+k2 \log G + \frac{k3I_{arc\_600}}{k4I_{bf}^7+k5I_{bf}^6+k6I_{bf}^5+k7I_{bf}^4+k8I_{bf}^3+k9I_{bf}^2+k10I_{bf}} + k11 \log I_{bf} + k13 \log I_{arc} + \log \frac{1}{CF} - \log \frac{20}{T}}{-k12} \right) \quad (33)$$

Onde:

$AFB_{600}$	distância de segurança quando $V_{oc} = 600V$ , em mm;
$AFB_{2700}$	distância de segurança quando $V_{oc} = 2.700V$ , em mm;
$AFB_{14300}$	distância de segurança quando $V_{oc} = 14.300V$ , em mm;
$AFB_{\leq 60}$	distância de segurança quando $V_{oc} \leq 600V$ , em mm;
$T$	tempo de duração do arco, em s;
$G$	distância entre os condutores (gap), em mm;
$I_{arc\_600}$	corrente de arco para tensão do sistema $V=600V$ , em kA;

$I_{arc_{2700}}$	corrente de arco para tensão do sistema $V=2.700V$ , em kA;
$I_{arc_{14300}}$	corrente de arco para tensão do sistema $V=14.300V$ , em kA;
$I_{arc}$	corrente final de arco quando $V_{oc} \leq 600V$ , em kA;
$I_{bf}$	corrente de curto circuito trifásico simétrico, em kA;
$CF$	fator de correção de tamanho de invólucro ( $CF=1$ para VOA e HOA);
$\log$	logaritmo na base 10;
$k1$ a $k13$	são coeficientes encontrados nas tabelas (3), (4) e (5) da IEEE 1584, 2018 que estão reproduzidas, respectivamente nas tabelas (9), (10) e (11) desse trabalho.

Com os valores intermediários, basta usá-los nas equações abaixo para obter o valor final da distância de segurança: (IEEE 1584, 2018)

$$AFB_1 = \frac{AFB_{2700} - AFB_{600}}{2,1} (V_{oc} - 2,7) + AFB_{2700} \quad (34)$$

$$AFB_2 = \frac{AFB_{14300} - AFB_{2700}}{11,6} (V_{oc} - 14,3) + AFB_{14300} \quad (35)$$

$$AFB_3 = \frac{AFB_1(2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{AFB_2(V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (36)$$

$AFB_1$	primeiro termo da interpolação para tensão do sistema entre 600V e 2700V, em $J/cm^2$ ;
$AFB_2$	segundo termo da interpolação de $AFB$ para tensão do sistema maior que 2700V, em $J/cm^2$ ;
$AFB_3$	terceiro termo da interpolação de $AFB$ para tensão do sistema menor que 2700V, em $J/cm^2$ ;
$V_{oc}$	tensão do sistema, em kV.

- Se  $600V < V_{oc} \leq 2.700V$ , a distância de segurança será  $AFB = AFB_3$ ;
- Se  $V_{oc} > 2.700V$ , o valor da distância de segurança será  $AFB = AFB_2$ ;
- Se  $V_{oc} \leq 600V$ , o valor da distância de segurança será  $AFB = AFB_{\leq 600}$ .

#### **4.4. Conclusão do capítulo**

É notável o avanço do sistema elétrico desde o primeiro modelo para obtenção de energia incidente proposto por por Ralph Lee em 1982. O aumento da complexidade do sistema e os avanços computacionais foram impulsionadores para a transição do modelo teórico inicial de Lee para modelos baseados em ensaios laboratoriais e no uso de ferramentas computacionais para a obtenção de uma melhor aproximação dos valores reais de energia incidente, distância de segurança e corrente de arco.

Conforme os modelos vão se modernizando e melhorando a assertividade, é possível adotar soluções de projeto mais precisas e evitar o excesso de conservadorismo no dimensionamento de EPIs e de soluções de projeto. Medidas de proteção excessivamente conservadoras aumentam os gastos de implantação e podem levar ao aumento da dificuldade para o trabalhador exercer suas atividades laborais. Visto isso, é recomendável a atualização dos cálculos para o modelo mais moderno disponível.

## **5. MEDIDAS DE PROTEÇÃO CONTRA ARCOS ELÉTRICOS**

De posse das modelagens matemáticas e dos conceitos explorados, é possível usar essas ferramentas para discutir medidas de proteção dos trabalhadores contra os riscos trazidos por arcos elétricos. É importante ressaltar que o uso do modelo mais atual produz valores mais confiáveis para apoio às decisões de proteção.

Neste capítulo serão tratadas algumas medidas usadas para a redução dos riscos de acidentes por arcos elétricos. Será discutido o dimensionamento das vestimentas com ATPV adequado para os níveis de energia incidente, estudo de seletividade e o uso de relé de arco.

### **5.1. Estudo de seletividade e a proteção contra arcos elétricos**

O conceito de seletividade pode ser entendido como a capacidade de um sistema elétrico de, em caso de uma exposição a correntes anormais, efetuar a desenergização apenas da parte do circuito com defeito (MAMEDE, 2017). Preservando e garantindo a continuidade do fornecimento de energia para as partes do circuito que estão com o funcionamento normal.

Com a introdução desse conceito nos sistemas elétricos, apareceu a necessidade de temporizar o seccionamento de circuitos em situação de defeito. Segundo Mardegan e Parise (2018), com o aumento do tempo para a desenergização de circuitos em situação de falta, alguns equipamentos submetidos a faltas começaram a ser destruídos e foi onde os problemas gerados pelos arcos elétricos começaram a se agravar.

Como observado no Capítulo 4 deste trabalho, desde o primeiro modelo proposto por Lee (1982), o tempo de duração do arco sempre foi uma variável importante para o valor final de energia incidente. O retardo na eliminação de uma falta é traduzido diretamente em valores de energia incidente mais elevados.

É importante considerar na hora de determinar a curva de atuação dos relés da instalação os níveis de correntes de arco reduzidas. As correntes de arco são sempre uma porcentagem das correntes de curto circuito, como os modelos baseiam-se em ferramentas estatísticas, variações podem ser encontradas nos eventos reais. Para

considerar a possibilidade de uma corrente de arco mais baixa causar um maior tempo de eliminação do arco, é necessário observar como as proteções atuarão no caso dessas correntes. (IEEE, 2018) Instruções para o cálculo das correntes de arco reduzidas podem ser encontradas no tópico 4.3.7.2 Corrente de Arco Reduzida, deste trabalho.

É conveniente que os estudos de seletividade e de correntes de arco sejam realizados de forma simultânea. Assim, manipulações podem ser realizadas com a finalidade de alcançar valores mais baixos de energia incidente (MARDEGAN; PARISE, 2018). Caso o estudo de arco elétrico seja realizado com a instalação já em fase de implementação, as possibilidades de ajustes de projeto serão reduzidas e pode acarretar na necessidade de adoção de soluções mais caras ou não tão efetivas.

## 5.2. Relés de arco

Uma alternativa importante na redução do tempo de eliminação de arcos é fazer uso de relés digitais com função de detecção de arcos integrada. Esse tipo de relé utiliza sensores luminosos que detectam a presença de arcos, uma vez que o brilho durante o desenvolvimento de um arco elétrico é muito intenso, para atuar de forma mais rápida em caso de arcos, não necessitando da espera da atuação de uma função temporizada de sobrecorrente.

Os sensores são basicamente pontuais ou sensores de fibra ótica. A figura abaixo demonstra os modelos citados: (QUEIROZ, 2011)

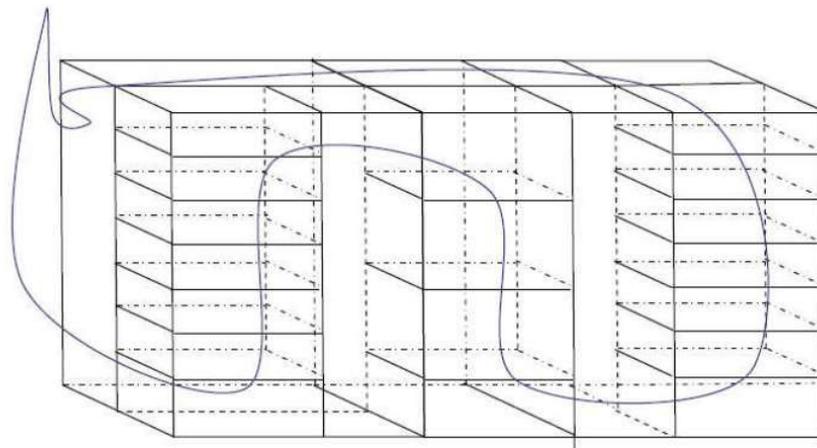
Figura 10 – Sensor pontual e sensor de fibra ótica para detecção de arcos



Fonte: Queiroz (2011).

O uso da fibra óptica como sensor possui a vantagem de detectar em 360° e em toda a extensão da fibra. É possível fazer o enlace de vários equipamentos em um cubículo. A figura abaixo ilustra a fibra óptica em azul passando por diversas gavetas de um painel.

Figura 11 – Fibra óptica sendo usada como sensor de luminosidade para a detecção de arcos.



Fonte: Queiroz (2011).

Uma outra possibilidade de aplicação de relés digitais na detecção de arcos é a combinação de sensores luminosos com sensores sonoros. A lógica para a detecção baseia-se na diferença de velocidade típica dessas duas ondas e fazendo possível a diferenciação entre um arco elétrico e outras fontes luminosas ou sonoras. (QUEIROZ; SENGER, 2012)

O sensor de lapela é outra possibilidade de proteção contra arcos elétricos. Esse sensor fica posicionado na roupa do operador que vai adentrar o ambiente passivo de ocorrência de arco e a é conectado à entrada do relé. Na detecção de um arco elétrico, o sensor envia o sinal para o relé fazer o seccionamento instantâneo do circuito, reduzindo o tempo de duração do arco. (MARDEGAN; PARISE, 2018)

Figura 12 – Sensor do tipo lapela para detecção de arcos



Fonte: Queiroz e Senger (2012).

As possibilidades de detecção de arco sem a necessidade de medição da corrente produzem uma redução significativa no tempo de duração do arco, mas precisa ser aplicada com critério para que não gere muitas discontinuidades no sistema em decorrência de alarmes falsos. Ambientes que possam ter incidência de luz forte por motivos diversos, por exemplo, podem ocasionar a atuação do relé.

### **5.3. Vestimentas para a proteção contra arcos**

As vestimentas de proteção contra os efeitos térmicos dos arcos elétricos são separadas em classes baseadas no nível de ATPV do tecido. A vestimenta é um EPI e é importante salientar que o EPI é a última proteção na hierarquia de medidas de controle em segurança do trabalho. Como a NR 10 exige o uso de fornecimento de vestimentas adequadas às atividades a serem desempenhadas pelo trabalhador levando em conta condutibilidade, inflamabilidade e influências eletromagnéticas, o dimensionamento e fornecimento das vestimentas adequadas é responsabilidade do empregador e é fiscalizada pelo Ministério do Trabalho.

Outra exigência importante da NR 10 que aumenta a segurança contra arcos é o Prontuário de Instalações Elétricas. Na alínea (a) do item 10.2.4 da NR 10 (2016), é exigido no prontuário “conjunto de procedimentos e instruções técnicas e administrativas

de segurança e saúde, implantadas e relacionadas a esta NR e descrição das medidas de controle existentes.” Com isso, no prontuário deve conter as medidas de controle para o exercício de atividades em ambientes passivos de ocorrência de arcos elétricos, dentre as medidas, os EPIs obrigatórios para cada procedimento.

Para a classificação das vestimentas, amostras são submetidas aos ensaios determinados nas normas ASTM F1959 /F1959M 14 e CENELEC ENV 50354:2000. Nos testes das normas da ASTM, três amostras do tecido dotadas de calorímetros de cobre são submetidas a descargas elétricas originadas por dois eletrodos verticais de 10mm de diâmetro distanciados de 305mm enquanto as medições são feitas através dos calorímetros. Cada amostra de tecido conta com dois calorímetros posicionados atrás do tecido para medir a energia que atravessa o tecido e dois ficam nas laterais para medir a energia emitida. Para a validação estatística das amostras, no mínimo 20 dados de calorímetros são coletados (CUSSOLIN; LAUFER, 2017)

Nos ensaios definidos na CENELEC ENV 50354:2000, os eletrodos estão distanciados de 30mm, são dispostos verticalmente no mesmo eixo e são cercados por uma caixa de teste em formato de um cilindro parabólico com as partes superior e inferior seladas para permitir que a energia seja direcionada apenas para a abertura na sua parte frontal. De frente para a abertura, é posicionada uma placa de 400x400mm com uma distância horizontal da abertura de 300mm. (CUSSOLIN; LAUFER, 2017)

Segundo Cussolin e Laufer (2017), há dois tipos de testes controlando a corrente nos eletrodos e para um tempo fixo de 500ms:

- Classe 1 – 4kA, 500ms;
- Classe 2 – 7kA, 500ms.

Os testes são feitos com dois disparos de corrente e a escolha da classe do teste depende do nível de proteção declarada pelo fabricante do equipamento. A avaliação é feita por inspeção e as condições abaixo devem ocorrer para a aprovação do tecido: (CUSSOLIN; LAUFER, 2017)

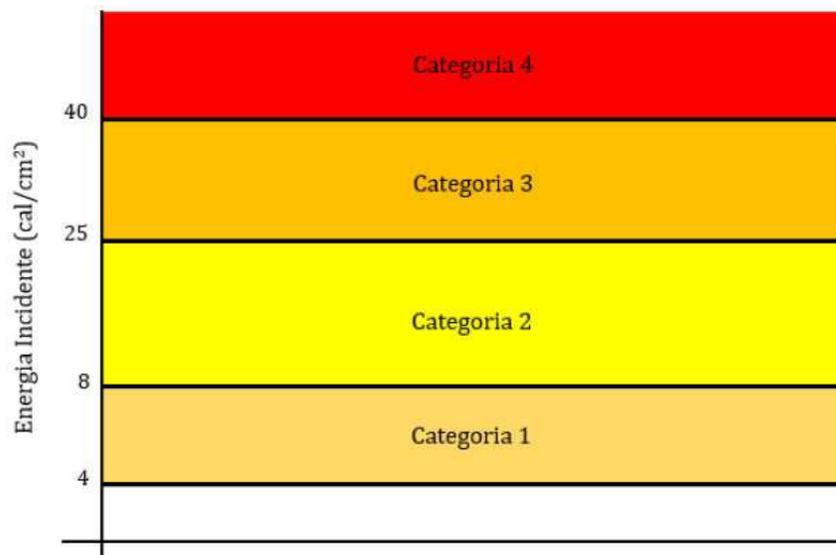
- Tempo de combustão do tecido deve ser menor ou igual a 5 segundos após a exposição do material ao arco;
- Os materiais não podem fundir;
- Não pode haver nenhum furo maior que 5mm medido em qualquer direção;
- No caso de roupas, além dos critérios acima, as costuras devem ser mantidas.

Se houver abertura de um ou mais orifícios na vestimenta durante os ensaios, é registrado a ocorrência de *breakopen*. A energia incidente que resulta em 50% de probabilidade de ocorrência de *breakopen* é chamada de *breakopen threshold energy (EBT)*. O valor de resistência a arco informado na vestimenta será o menor valor entre o ATPV e EBT. (RESENDE, 2016)

#### 5.3.1. Dimensionamento das vestimentas

A NFPA classifica categorias de risco que determinam as faixas de grau de proteção de ATPV necessário para que a vestimenta seja considerada adequada. A figura abaixo demonstra as faixas de energia incidente para cada categoria de EPI. A Categoria 0 não aparece na imagem pois não requer o uso de vestimentas especiais.

Figura 13 – Categorias de EPIs separadas por faixas de energia incidente



Fonte: Resende (2016).

Figura 14 – Identificação do grau de ATPV em vestimenta antichama



Fonte: Resende (2016).

As vestimentas especificadas devem possuir nível de ATPV igual ou superior aos valores de energia incidente que serão encontrados no ambiente onde a atividade será desenvolvida. Assim, com uma vestimenta de categoria adequada, em caso de um acidente com arco, a vítima terá uma chance de 50% de sofrer uma queimadura de segundo grau. (RESENDE, 2016)

#### **5.4. Conclusão**

Os métodos discutidos acima não são os únicos na proteção de trabalhadores contra os riscos de arcos elétricos, mas a integração do estudo de seletividade e o estudo de arco elétrico e o uso de relés de arco são métodos de engenharia importantes que podem reduzir o nível de energia incidente dos barramentos da instalação, enquanto o EPI é de uso sempre obrigatório e deve ser adequado ao nível de energia incidente que o trabalhador poderá estar exposto na execução de suas atividades.

As medidas discutidas são complementares e podem ser implementadas em conjunto para produzir um ambiente de trabalho mais seguro. É importante ter sempre em mente a hierarquia de medidas de controle para segurança do trabalho na hora de definir as proteções contra arcos elétricos que serão usadas na instalação. Como a figura (15) sugere, medidas de engenharia são mais eficientes e devem mitigar ao máximo o

risco reduzindo os valores de energia incidente para os menores níveis possíveis afim de tornar o EPI o último recurso na impossibilidade da eliminação do risco.

Figura 15 – Hierarquia de medidas de controle de riscos



Fonte: Resende (2016).

É importante atentar também para os locais onde pretende-se usar sensores luminosos para monitorar a ocorrência de arcos para que o ambiente não seja sujeito a alarmes falsos que possam comprometer a continuidade do fornecimento de energia e a confiabilidade do sistema.

## 6. ESTUDO DE CASO

### 6.1. Descrição do sistema estudado

Para aplicação da metodologia de cálculo IEEE 1584 (2018) e, ao mesmo tempo, ter uma base comparativa com os resultados obtidos com a versão da IEEE 1584 de 2002, o sistema escolhido para a aplicação do modelo foi o mesmo utilizado no estudo de caso desenvolvido por Queiroz (2011).

Segundo Queiroz (2011), instalação estudada é típica de plataformas petrolíferas e é dotada de três unidades de geração. Dois geradores fornecem energia como fonte principal do sistema e um terceiro gerador atua como alimentação de emergência. Os geradores principais, nomeados de Gerador A e Gerador B, são trifásicos, possuem potência de 600 kW e fornecem energia na tensão de 480 V quando acionados por motores de combustão interna movidos a gás. No painel nomeado de Painel A, estão concentradas as funções de disjunção, sincronismo e controle da geração principal. O Gerador de emergência é trifásico, possui uma potência de 250 kW e também fornece tensão em 480 V quando acionado por um motor a diesel. A disjunção, controle e sincronismo da geração de emergência fica concentrada no painel nomeado de Painel B. o diagrama unifilar utilizado por Queiroz (2011) encontra-se disponível no Anexo A.

O sistema opera normalmente com um gerador da unidade de geração principal operando enquanto o outro gerador da unidade principal e o gerador de emergência encontram-se como reserva, mas fora do sistema. No caso de um do gerador em operação ser retirado do sistema por qualquer motivo, o segundo gerador entrará no sistema para alimentar o mesmo barramento e manter as cargas e, simultaneamente, é dada a partida do gerador de emergência que deverá entrar no sistema caso o outro gerador principal não entre para suprir as cargas num espaço de 45 segundos. (QUEIROZ, 2011)

Como descrito por Queiroz (2011), a unidade de geração de emergência não opera em paralelo com a unidade principal. A transferência das cargas é feita por uma chave de transferência automática. Todos os geradores possuem uma resistência de

aterramento de 200 ohms e a energia é distribuída através de dois Centro de Controle de Motores nomeados de CCM A e CCM B na tensão de 480 V. O CCM A é responsável pelo suprimento de energia às cargas de normais e é alimentado apenas pela unidade principal e geração. O CCM B alimenta as cargas essenciais e pode ser alimentado pelo barramento da unidade geradora principal ou de emergência dependendo da situação e operação do sistema.

#### 6.1.1. Proteções dos sistemas de geração

As proteções descritas por Queiroz (2011) para os geradores são inerentes à máquina primária e ao gerador. Sendo as proteções para a máquina primária:

- Baixa pressão de óleo lubrificante;
- Nível de óleo lubrificante;
- Alta temperatura da água de refrigeração;
- Baixo nível de água de refrigeração;
- Excesso de velocidade;
- Excesso de vibração.

As proteções dos geradores são:

- Sobrecorrente;
- Potência reversa;
- Temperatura dos enrolamentos;
- Temperatura dos mancais;
- Subfrequência;
- Desequilíbrio de corrente;
- Sobretensão/subtensão.

A proteção de sobrecorrente instantânea e temporizada é feita nos disjuntores de ligação dos geradores com os barramentos das cargas e dispões dos equipamentos de modelos listados no quadro (4). Os coordenogramas podem ser conferidos no Apêndice D.

Quadro 4 - Equipamentos de proteção de sobrecorrente dos geradores

	<b>Relé</b>	<b>Disjuntor</b>	<b>Transformador de corrente (TC)</b>	<b>Unidade instantânea</b>	<b>Unidade temporizada</b>
<b>Gerador A</b>	Ampepector IIA-LI Fabricante: Westinghouse	Modelo: DS-416 Corrente Nominal = 1600 A Corrente de ruptura = 42 kA Fabricante: Westinghouse	Relação de transformação de 1200/5A	Oito vezes a corrente nominal	<i>Pick up</i> de 20 segundos para seis vezes a corrente nominal
<b>Gerador B</b>	Ampepector IIA-LI Fabricante: Westinghouse	Modelo: DS-416 Corrente Nominal = 1600 A Corrente de ruptura = 42 kA Fabricante: Westinghouse	Relação de transformação de 1200/5A	Oito vezes a corrente nominal	<i>Pick up</i> de 20 segundos para seis vezes a corrente nominal
<b>Gerador de Emergência</b>	Ampepector IIA-LI Fabricante: Westinghouse	Modelo: DS-206 Corrente Nominal = 800 A Corrente de ruptura = 42 kA Fabricante: Westinghouse	Relação de transformação de 800/5A	Oito vezes a corrente nominal	<i>Pick up</i> de 20 segundos para seis vezes a corrente nominal

Fonte: Queiroz (2011).

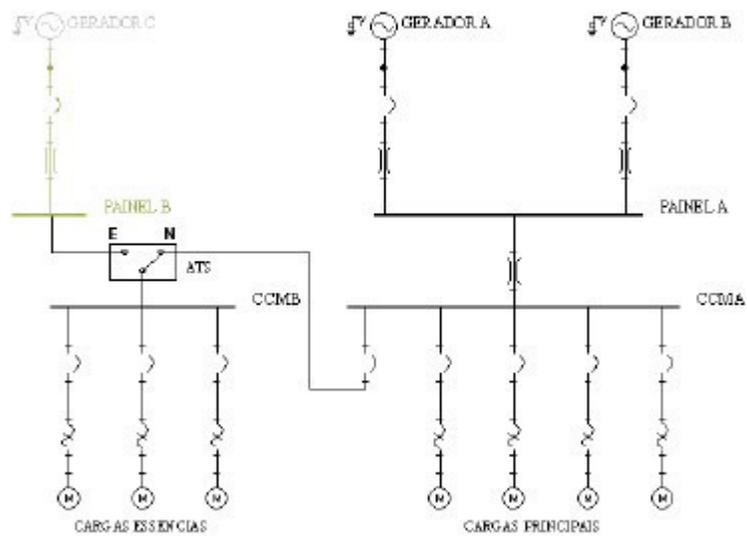
As proteções dos barramentos e do sistema de aterramento não serão abordadas neste trabalho pois não interferem nos parâmetros necessários para este estudo.

## **6.2. Modos de operação e análise de curto circuito**

Conforme descrito por Queiroz (2011), há três modos de operação para o sistema estudado. As diferentes condições de operação visam atender à instalação com segurança e redundância para garantir a continuidade dos serviços. No estudo de Queiroz (2011), os três modos de operação foram considerados para o cálculo das correntes de curto circuito. As correntes usadas para a aplicação da metodologia IEEE 1584 foram calculadas no trabalho de Queiroz (2011) com o uso do software PTW desenvolvido pela empresa SKM baseados na norma IEC 60909. Os relatórios das simulações de curto circuito para cada modo de operação estão presentes no Apêndice C As condições de operação são as descritas abaixo:

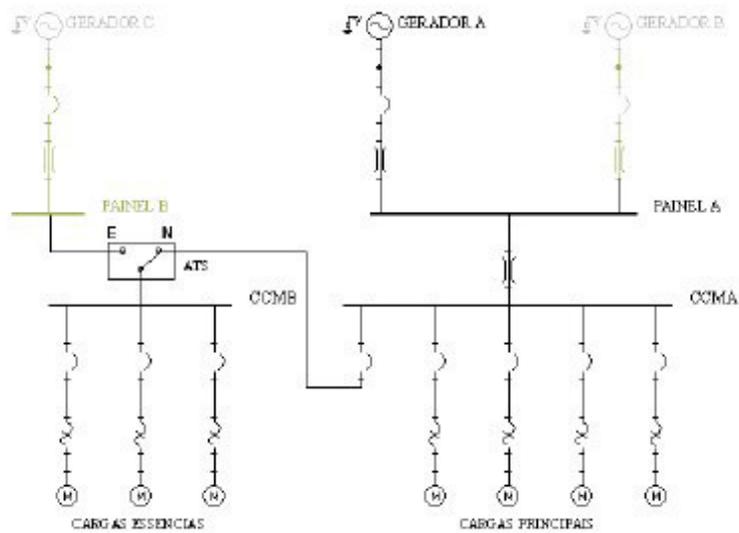
1. Gerador A e gerador B em paralelo: Nesta condição de operação, o gerador de emergência encontra-se fora do circuito do sistema. Esta é uma condição provisória usada para a realização de manobras no sistema, pois cada gerador da unidade principal possui capacidade para atender toda a demanda de cargas do sistema. A figura (16) demonstra o diagrama unifilar do sistema operando nessa condição.
2. Apenas um gerador principal em operação: Esta é a condição de operação normal em que um gerador da unidade principal garante a alimentação de todas as cargas do sistema. A figura (17) demonstra o diagrama unifilar do sistema operando nessa condição.
3. Apenas o gerador de emergência em operação: Nesta condição de operação, a chave automática transfere o Painel B para o barramento do Gerador de Emergência e este provê alimentação apenas para as cargas essenciais que são atendidas pelo Painel B. A figura (18) demonstra o diagrama unifilar do sistema operando nessa condição.

Figura 16 – Sistema operando com os dois geradores principais



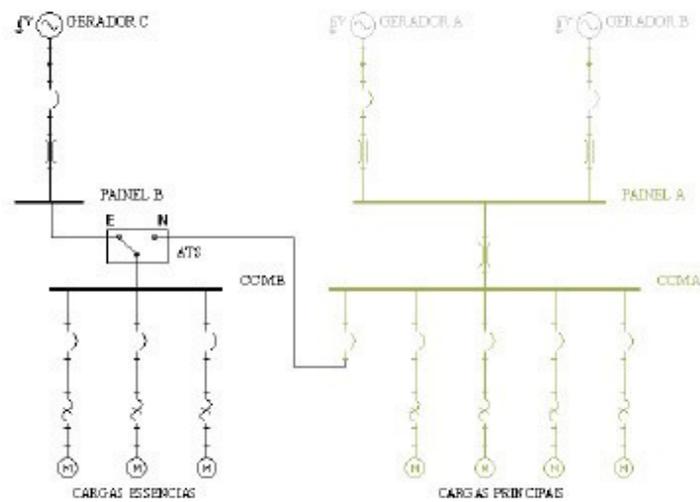
Fonte: Queiroz (2011).

Figura 17– Sistema operando com um gerador principal



Fonte: Queiroz (2011).

Figura 18 – Sistema operando com o gerador de emergência



Fonte: Queiroz (2011).

### 6.3. Resultados e comparações

A aplicação do modelo matemático proposto pela IEEE 1584 em sua nova versão foi feita com o uso do software Matlab. Os dados usados para os cálculos foram usados do estudo de caso desenvolvido por Queiroz (2011). Contudo, nem todos os parâmetros necessários para o desenvolvimento da metodologia podem ser encontrados no estudo de referência, para os dados que não puderam ser obtidos, foram usados valores recomendados pela IEEE 1584 (2018). Isso aconteceu pelo fato de a versão de 2018 usar como parâmetro fatores de correção para os tamanhos de invólucros ou painéis em que os terminais sujeitos ao arco elétrico estejam confinados e o arranjo dos eletrodos. Os códigos de Matlab desenvolvidos para a obtenção dos valores encontram-se comentados no Anexo B e foram testados e validados nos exemplos presente no Anexo D da IEEE 1584 (2018) com a obtenção de resultados similares aos apresentados pela norma.

O código precisa como parâmetros de entrada os itens abaixo:

- Tensão de operação do sistema;
- Corrente de curto circuito trifásico;

- Dimensões do invólucro dos condutores estudados;
- Tempo de eliminação do arco
- Distância entre os condutores;
- Arranjo físico dos eletrodos.

O código retorna os seguintes resultados:

- Corrente de arco;
- Corrente de arco reduzida;
- Energia incidente;
- Energia incidente em condição de arco reduzido;
- Distância de segurança.

As considerações feitas para a aplicação do algoritmo foram as seguintes:

- O arranjo dos condutores considerado foi de condutores verticais, eletrodos em caixa metálica (VCB);
- Valores de distância entre condutores e dimensões do invólucro foram considerados os presentes na tabela 8 da IEEE 1584, também retratada na tabela (2) deste trabalho.

O tempo de eliminação do arco considerado foi o de atuação da proteção que elimina a fonte que fornece energia ao arco. Os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo estão na tabela

Tabela 12 – Parâmetros resultantes da aplicação do modelo matemático IEEE 1584 (2018)

	<b>Painel A</b>	<b>Painel B</b>	<b>CCM A</b>	<b>CCM B</b>
<b>Tipo de Painel</b>	CDC	CDC	CCM	CCM
<b>I<sub>cc</sub> (kA)</b>	14,20	12,60	13,90	12,10
<b>V<sub>oc</sub> (kV)</b>	0,48	0,48	0,48	0,48

	<b>Painel A</b>	<b>Painel B</b>	<b>CCM A</b>	<b>CCM B</b>
<b>Tempo total de arco (s)</b>	0,45	0,25	0,45	0,25
<b>Corrente de arco elétrico (kA)</b>	10,65	9,43	10,71	9,30
<b>Corrente de arco reduzida (kA)</b>	9,33	8,27	9,39	8,15
<b>Energia Incidente (cal/cm<sup>2</sup>)</b>	9,06	4,43	13,34	6,38
<b>Energia Incidente em corrente de arco reduzida(cal/cm<sup>2</sup>)</b>	8,00	3,90	11,76	5,62
<b>Distância de segurança (mm)</b>	2.016,18	1.380,80	2.063,35	1.300,60
<b>Categoria de vestimenta (NFPA 70E)</b>	3	2	3	2

Fonte: O próprio autor.

O tempo de eliminação de arco foi o tempo para atuação do relé e desarme do disjuntor para a atuação das funções de sobrecorrente instantânea por conta do valor das correntes de arco.

A tabela (13) retrata os valores encontrados por Queiroz (2011) aplicando o modelo IEEE 1584 da versão de 2002:

Tabela 13 - Resultados do estudo de caso realizado por Queiroz (2011)

	<b>Painel A</b>	<b>Painel B</b>	<b>CCM A</b>	<b>CCM B</b>
<b>Tipo de Painel</b>	CDC	CDC	CCM	CCM
<b>I<sub>cc</sub> (kA)</b>	14,20	12,60	13,90	12,10

	<b>Painel A</b>	<b>Painel B</b>	<b>CCM A</b>	<b>CCM B</b>
<b>Voc (kV)</b>	0,48	0,48	0,48	0,48
<b>Tempo total de arco (s)</b>	0,45	0,25	0,45	0,25
<b>Corrente de arco elétrico (kA)</b>	8,43	7,63	8,69	7,72
<b>Energia Incidente (cal/cm<sup>2</sup>)</b>	10,22	5,10	16,78	8,20
<b>Distância de segurança (mm)</b>	2.619,00	1633,00	2.276,00	1.471,00
<b>Categoria de vestimenta (NFPA 70E)</b>	3	2	3	3

Fonte: Queiroz (2011).

Tabela 14 – Variação percentual dos parâmetros calculados com o modelo IEEE 1584 2018 em comparação com os valores obtidos com o modelo IEEE 1584 2002

	<b>Painel A</b>	<b>Painel B</b>	<b>CCM A</b>	<b>CCM B</b>
<b>Corrente de arco elétrico (kA)</b>	+ 26,33%	+ 8,39%	+ 8,06%	+ 5,57%
<b>Energia Incidente (cal/cm<sup>2</sup>)</b>	- 21,75%	- 23,53%	- 29,91%	- 31,46%
<b>Distância de segurança (mm)</b>	- 23,02%	- 15,44%	- 9,34%	- 11,58%

Fonte: O próprio autor.

Como é possível observar, os valores encontrados com a aplicação do modelo matemático da versão de 2002 resultaram em valores mais elevados de energia incidente e distância de segurança, apesar de os valores de corrente de arco encontrados através do modelo de cálculo da versão de 2018 serem mais altos.

Como a nova norma leva em consideração variáveis que não eram consideradas na versão anterior, não é possível afirmar categoricamente que o modelo de 2018 terá sempre valores mais altos de corrente, ou valores mais baixos de energia incidente e distância de aproximação, sendo necessário a atualização dos cálculos para a conferência com o modelo mais atual. Isso faz com que seja essencial para as instalações a atualização dos cálculos para o modelo de 2018, pois os valores podem ser mais altos ou mais baixos dependendo das condições encontradas em cada caso. No caso estudado, foi possível reduzir a categoria de risco para as vestimentas para operação no CCM B, uma redução de categoria de risco significa menos gastos com aquisição de material para a empresa e mais mobilidade para o trabalhador que vai desempenhar suas tarefas.

## 7. CONCLUSÃO

Apesar da baixa visibilidade do arco elétrico nas normas de segurança nacionais, neste trabalho é possível tomar dimensão da ordem de grandeza das variáveis envolvidas na ocorrência deste evento. O conhecimento desses parâmetros e de como eles afetam os níveis de energia incidente é uma importante ferramenta para que engenheiros e técnicos que trabalham no setor elétrico e, principalmente, no sistema elétrico de potência tracem estratégias de prevenção e redução de danos causados por um eventual arco elétrico. Mesmo com a modelagem matemática complexa e as grandes equações, houve muita melhoria em precisão desde os primeiros alertas para a proteção da vida humana contra os perigos do arco elétrico para garantir segurança e evitar o superdimensionamento das proteções.

Mesmo estando atrasado no aspecto legislativo em relação a alguns países, as normas nacionais vigentes acabam tratando as queimaduras por explosões com arco de forma indireta e, para estar em conformidade com todas as exigências normativas do Ministério do Trabalho e do Emprego, é preciso um estudo dos valores de energia incidente e correntes de arco nas instalações para a preservação da vida dos trabalhadores. As fiscalizações estão cada vez mais atentas e têm cobrado com mais frequência das empresas os dimensionamentos adequados dos EPIs para a proteção contra os efeitos térmicos de arcos elétricos.

Com relação ao estudo de caso, a comparação dos resultados mostra as divergências entre os valores obtidos quando aplicadas diferentes versões da mesma norma. Os modelos matemáticos empregam cada vez mais recursos tecnológicos e computacionais para serem desenvolvidos e tendem a aproximar-se cada vez mais dos valores reais de energia incidente e correntes de arco que seriam observados para a situação estudada. Com isso, é essencial a atualização dos cálculos para a conferência da necessidade tomadas de decisão para aumentar a segurança das instalações.

Além de alertar os profissionais que estão diretamente expostos aos riscos do arco elétrico, este trabalho também fornece informações que podem ser usadas pelos profissionais de projetos para a concepção de instalações mais seguras. O entendimento

da ferramenta de cálculo e a compreensão do impacto das decisões de projeto sobre as variáveis que influenciam os valores de energia incidente, podem fazer com que o projeto da instalação já reduza os riscos de acidentes com arcos e também os gastos posteriores que seriam feitos para tratar desses riscos. Com o avanço das tecnologias em proteção de sistemas elétricos, há possibilidades de mitigação dos riscos inerentes ao arco elétrico usando soluções de projeto e com a adoção de equipamentos específicos. É importante enfatizar que, em segurança do trabalho, o uso adequado de EPIs é importantíssimo e sempre obrigatório, mas as soluções de engenharia devem vir antes fazendo com que o ambiente de trabalho seja o mais seguro possível, garantindo que o EPI atue na proteção do trabalhador apenas como último recurso.

### **7.1. Sugestões de trabalhos futuros**

Alguns estudos podem ser desenvolvidos com o exposto neste trabalho para fornecer mais insumos para o aumento da segurança das instalações contra os perigos de arcos elétricos. Abaixo são citadas algumas sugestões de temas para trabalhos futuros:

- Estudo do impacto das decisões de seletividade nos valores de energia incidente e de tempo de eliminação do arco, abordando as consequências da temporização do seccionamento de circuitos em falta sobre o grau de ATPV necessário para as vestimentas dos trabalhadores;
- Estudo sobre como o uso de painéis resistentes a arco e a manipulação das distâncias entre os barramentos pode afetar os valores de energia incidente e o grau de ATPV necessário para as vestimentas dos trabalhadores;
- Estudo sobre abordagens de arco elétrico em sistemas de corrente contínua e as proteções utilizadas para esse tipo de cenário.

## 8. BIBLIOGRAFIA

CASTRO, A. N. P. D.; LIMA JÚNIOR, E. M. Perfil epidemiológico de pacientes vítimas de choque elétrico em um hospital de referência em Fortaleza. **Revista Brasileira de Queimaduras**, Fortaleza, v. 1, n. 14, p. 27-30, Abril 2015. Disponível em: <<http://rbqueimaduras.org.br/details/239/pt-BR/perfil-epidemiologico-de-pacientes-vitimas-de-choque-eletrico-em-um-hospital-de-referencia-em-fortaleza>>. Acesso em: 20 Junho 2019.

CHOUCAIR, J. S. **Cálculo da energia incidente para escolha adequada da vestimenta de proteção**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, p. 41. 2011.

CUSSOLIN, L. T.; LAUFER, R. G. **Guia Para Determinação do ATPV**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, p. 93. 2017.

DOUGHTY, R. L.; NEAL, T. E.; FLOYD, H. L. **Predicting Incident Energy to Better Manage the Electric Arc Hazard on 600-V Power Distribution Systems**. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS. [S.I.]: IEEE. 2000. p. 257-269.

EPE , 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-Anual-de-Energia-Eletrica-por-classe-nacional>>. Acesso em: 17 Abril 2019.

HOAGLAND, E. **Myths and Facts in Selection of Personnel Protective Equipment for Arc Flash Hazard Mitigation Utilizing NFPA 70E and applicable ASTM standards**. 48th IEEE Industrial & Commercial Power Systems Conference. Louisville: IEEE. 2012.

IEEE 1584. **IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations**. [S.I.]. 2018.

IEEE. Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2019. Disponível em: <<http://www.ieee.org.br/organizacao/>>. Acesso em: 12 Maio 2019.

KINDERMANN, G. **Curto-Circuito**. 2. ed. Porto Alegre: [s.n.], 1997.

LEE, R. H. The other electrical hazard: Electrical arc blast burns. **IEE Trans. Ind. Applicat.**, p. 246-251, Maio/Junho 1982.

MAMEDE, J. F. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2017.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, v. I, p. 28-33, Janeiro 2018.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, p. 32-37, Março 2018.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, p. 36-41, Abril 2018.

MARDEGAN, C. S.; PARISE, G. Proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, São Paulo, v. II, p. 30 - 35, Fevereiro 2018.

NFPA 70E. **Standard for Electrical Safety in the Workplace**. National Fire Protection Association. [S.l.], p. 110. 2015. (978-145590926-1).

NR 10. **SEGURANÇA EM INSTALAÇÕES E SERVIÇOS EM ELETRICIDADE**. Ministério da Economia. [S.l.]. 2016.

NR 6. **NR 6: Equipamento de Proteção Individual - EPI**. Ministério da Economia. [S.l.]. 2018.

OBSERVATÓRIO Digital de Saúde e Segurança do Trabalho, 2019. Disponível em: <<https://observatoriosst.mpt.mp.br/>>. Acesso em: 19 Março 2019.

QUEIROZ, A. R. S. **Utilização de relés digitais para mitigação dos riscos envolvendo arco elétrico**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 130. 2011.

QUEIROZ, A. R. S.; SENGER, E. C. Proteção contra Arco Elétrico e EPIs. **O Setor Elétrico**, São Paulo, p. 46-51, Janeiro 2012.

QUEIROZ, A. R. S.; SENGER, E. C. Proteção contra Arco Elétrico e EPIs. **O Setor Elétrico**, São Paulo, p. 42-47, Fevereiro 2012.

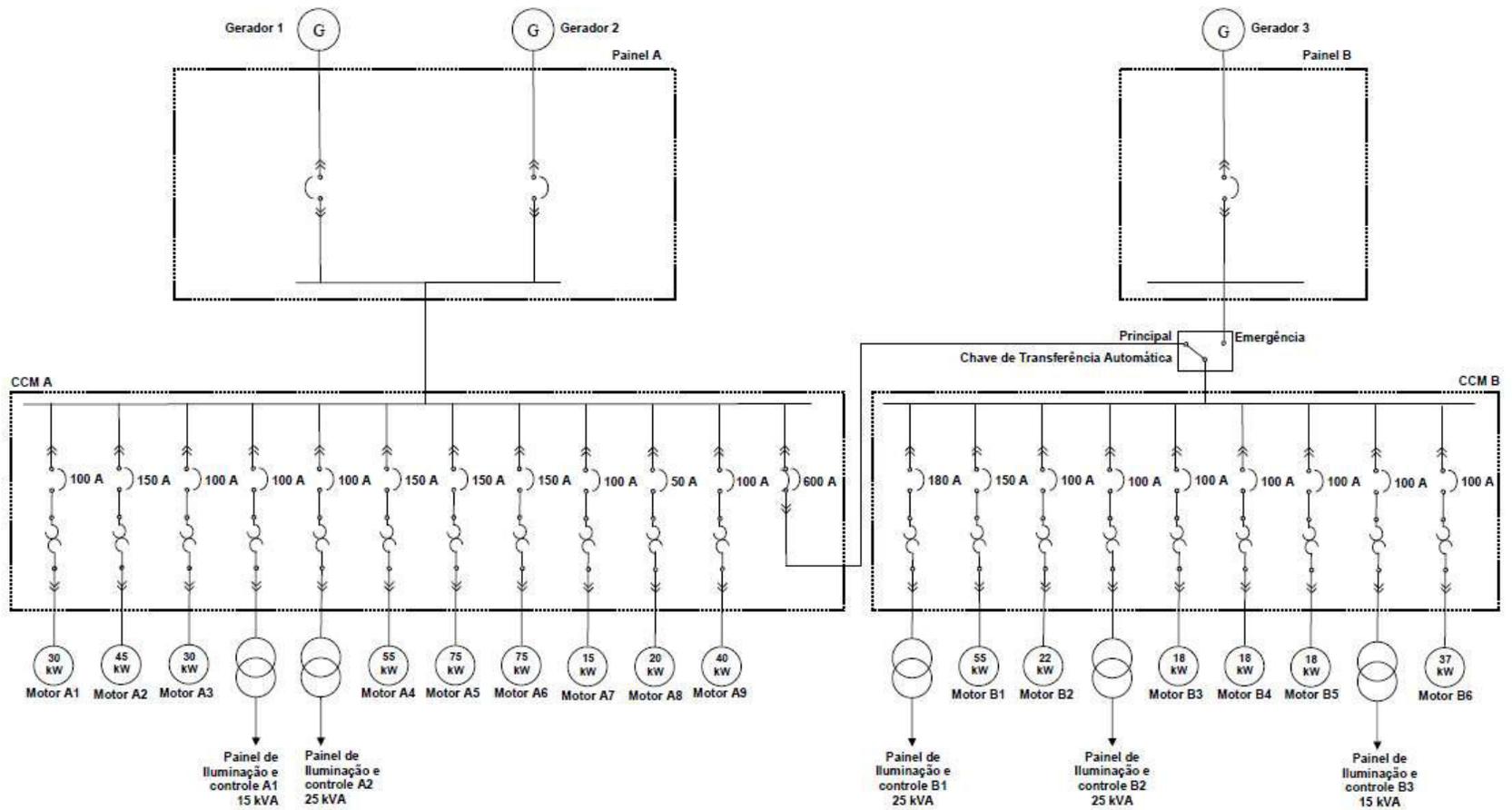
QUEIROZ, A. R. S.; SENGER, E. C. Proteção contra Arco Elétrico e EPIs. **O Setor Elétrico**, São Paulo , p. 30-35, Março 2012.

QUEIROZ, A. R. S.; SENGER, E. C. Proteção contra Arco Elétrico e EPIs. **O Setor Elétrico**, São Paulo, p. 36-40, Abril 2012.

QUEIROZ, A. R. S.; SENGER, E. C. Proteção contra Arco Elétrico e EPIs. **O Setor Elétrico**, São paulo, p. 34-39, Maio 2012.

RESENDE, F. B. **Proteção Elétrica em Subestações: Uma abordagem Sobre a Energia Incidente**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 100. 2016.

## APÊNDICE A – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA ESTUDADO



Fonte: Queiroz, 2011.

## APÊNDICE B – ALGORITMOS USADOS PARA OS CÁLCULOS

### B.1 ALGORITMO PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO IEE 1584 NO PAINEL A

```
clear
clc

%DADOS DO PAINEL A
Voc = .48;           %TENSÃO DO SISTEMA (kV)
Ibf = 14.2;         %CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO (kA)
G = 32;            %GAP ENTRE CONDUTORES (mm)
D = 610;           %DISTÂNCIA DE TRABALHO (mm)
W = 355.6;         %LARGURA DO INVÓLUCRO (mm)
H = 304.8;         %ALTURA DO INVÓLUCRO (mm)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 01 - DETERMINANDO A CORRENTE INTERMEDIÁRIA

%CORRENTE INTERMEDIÁRIA PARA Voc = 600V

k1 = -0.04287; k2 = 1.035; k3 = -0.083; k4 = 0; k5 = 0;
k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229; k9 = 0.003141; k10 = 1.092;

Iarc_600 =
power(10, k1+k2*log10(Ibf)+k3*log10(G)) * ((k4*power(Ibf, 6)) + (k5*power(Ibf, 5)) + (k
6*power(Ibf, 4)) + (k7*power(Ibf, 3)) + (k8*power(Ibf, 2)) + (k9*Ibf) + k10);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 02 - DETERMINANDO A CORRENTE DE ARCO FINAL

Iarc = 1/sqrt(power(0.6/Voc, 2) * ((1/(Iarc_600^2)) - ((0.6^2-
Voc^2)/(0.6^2*Ibf^2))))
T = 450;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 03 - DETERMINANDO O FATOR DE CORREÇÃO DEO TAMANHO DO INVÓLUCRO

W1 = 0.03937*W;
H1 = 0.03937*H;
EES = (W1+H1)/2;

CF = -0.000302*EES^2+0.03441*EES+0.4325;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 04 - DETERMINANDO OS VALORES INTERMEDIÁRIOS DE ENERGIA INCIDENTE

%ENERGIA INCIDENTE INTERMEDIÁRIA PARA Voc = 600V
```

```

k1 = 0.753364; k2 = 0.566; k3 = 1.752636; k4 = 0;
k5 = 0; k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229;
k9 = 0.003141; k10 = 1.092; k11 = 0; k12 = -1.598; k13 = 0.957;

aux1 =
((k4*power(Ibf, 7))+(k5*power(Ibf, 6))+(k6*power(Ibf, 5))+(k7*power(Ibf, 4))+(k8*power(Ibf, 3))+(k9*power(Ibf, 2))+(k10*Ibf));
aux2 = (k11*log10(Ibf))+(k12*log10(D))+(k13*log10(Iarc))+(log10(1/CF));
aux3 = k1+(k2*log10(G))+(k3*Iarc_600)/aux1+aux2;
E_600 = (12.552/50)*T*(power(10, aux3));

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 05 - DETERMINANDO O VALOR FINAL DE ENERGIA INCIDENTE

```

```
E = E_600/4.184
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 06 - DETERMINANDO O AFB ITERMEDIÁRIO

```

```
%AFB PARA Voc = 600V
```

```

k1 = 0.753364; k2 = 0.566; k3 = 1.752636; k4 = 0;
k5 = 0; k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229;
k9 = 0.003141; k10 = 1.092; k11 = 0; k12 = -1.598; k13 = 0.957;

```

```

aux4 = aux2 - (k12*log10(D)) - log10(20/T);
aux5 = k1+(k2*log10(G))+(k3*Iarc_600)/aux1+aux4;
AFB_600 = power(10, (aux5/-k12));

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 07 - DETERMINANDO O AFB FINAL

```

```
AFB = AFB_600;
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 08 - DETERMINANDO O COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DE CORRENTE DE ARCO

```

```

TAB2 = [0 -1.4269e-06 8.3137e-5 -1.9382e-3 0.022366 -0.12645 0.30226];
varCf =
(TAB2(1)*power(Voc, 6))+(TAB2(2)*power(Voc, 5))+(TAB2(3)*power(Voc, 4))+(TAB2(4)*power(Voc, 3))+(TAB2(5)*power(Voc, 2))+(TAB2(6)*Voc)+TAB2(7);
VARCF = 1 - 0.5*varCf;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 09 - DETERMINAR A CORRENTE DE ARCO FINAL REDUZIDA

```

```

Iarc_min = Iarc*VARCF
T_I_min = 450;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 10 - REFAZENDO O PASSO 04 USANDO A CORRENTE DE ARCO REDUZIDA

```

```

k1 = 0.753364; k2 = 0.566; k3 = 1.752636; k4 = 0;

```

```

k5 = 0; k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229;
k9 = 0.003141; k10 = 1.092; k11 = 0; k12 = -1.598; k13 = 0.957;

%Iarc_600_min = Iarc_600*VARCF;

aux1_min =
((k4*power(Ibf,7))+(k5*power(Ibf,6))+(k6*power(Ibf,5))+(k7*power(Ibf,4))+(k8*power(Ibf,3))+(k9*power(Ibf,2))+(k10*Ibf));
aux2_min =
(k11*log10(Ibf))+(k12*log10(D))+(k13*log10(Iarc_min))+(log10(1/CF));
aux3_min = k1+(k2*log10(G))+(k3*Iarc_600)/aux1_min+aux2_min;
E_600_min = (12.552/50)*T_I_min*(power(10,aux3_min));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 11 - DETERMINANDO O VALOR FINAL DE ENERGIA INCIDENTE

E_min = E_600_min/4.184

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 12 - REFAZENDO O PASSO 06 E 07 USANDO A CORRENTE DE ARCO REDUZIDA
if(E_min > E)

    k1 = 0.753364; k2 = 0.566; k3 = 1.752636; k4 = 0;
    k5 = 0; k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229;
    k9 = 0.003141; k10 = 1.092; k11 = 0; k12 = -1.598; k13 = 0.957;

    aux4_min = aux2_min - (k12*log10(D)) - log10(20/T_I_min);
    aux5_min = k1+(k2*log10(G))+(k3*Iarc_600)/aux1_min+aux4_min;
    AFB_600_min = power(10,(aux5_min/-k12));

    AFB = AFB_600_min
else
    AFB = AFB_600
end

```

## B.2 ALGORITMO PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO IEE 1584 NO PAINEL B

```
clear
clc

%DADOS DO PAINEL B
Voc = .48;           %TENSÃO DO SISTEMA (kV)
Ibf = 12.6;         %CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO (kA)
G = 32;            %GAP ENTRE CONDUTORES (mm)
D = 610;           %DISTÂNCIA DE TRABALHO (mm)
W = 355.6;         %LARGURA DO INVÓLUCRO (mm)
H = 304.8;         %ALTURA DO INVÓLUCRO (mm)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 01 - DETERMINANDO A CORRENTE INTERMEDIÁRIA

%CORRENTE INTERMEDIÁRIA PARA Voc = 600V

k1 = -0.04287;  k2 = 1.035;  k3 = -0.083;  k4 = 0;  k5 = 0;
k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229; k9 = 0.003141; k10 = 1.092;

Iarc_600 =
power(10, k1+k2*log10(Ibf)+k3*log10(G)) * ((k4*power(Ibf, 6)) + (k5*power(Ibf, 5)) + (k
6*power(Ibf, 4)) + (k7*power(Ibf, 3)) + (k8*power(Ibf, 2)) + (k9*Ibf) + k10);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 02 - DETERMINANDO A CORRENTE DE ARCO FINAL

Iarc = 1/sqrt(power(0.6/Voc, 2) * ((1/(Iarc_600^2)) - ((0.6^2-
Voc^2)/(0.6^2*Ibf^2))))
T = 250;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 03 - DETERMINANDO O FATOR DE CORREÇÃO DEO TAMANHO DO INVÓLUCRO

W1 = 0.03937*W;
H1 = 0.03937*H;
EES = (W1+H1)/2;

CF = -0.000302*EES^2+0.03441*EES+0.4325;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 04 - DETERMINANDO OS VALORES INTERMEDIÁRIOS DE ENERGIA INCIDENTE

%ENERGIA INCIDENTE INTERMEDIÁRIA PARA Voc = 600V

k1 = 0.753364;  k2 = 0.566;  k3 = 1.752636;  k4 = 0;
k5 = 0;  k6 = -4.783e-9;  k7 = 1.962e-6;  k8 = -0.000229;
k9 = 0.003141;  k10 = 1.092;  k11 = 0;  k12 = -1.598;  k13 = 0.957;
```

```

aux1 =
((k4*power(Ibf, 7))+(k5*power(Ibf, 6))+(k6*power(Ibf, 5))+(k7*power(Ibf, 4))+(k8*power(Ibf, 3))+(k9*power(Ibf, 2))+(k10*Ibf));
aux2 = (k11*log10(Ibf))+(k12*log10(D))+(k13*log10(Iarc))+(log10(1/CF));
aux3 = k1+(k2*log10(G))+((k3*Iarc_600)/aux1)+aux2;
E_600 = (12.552/50)*T*(power(10, aux3));

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 05 - DETERMINANDO O VALOR FINAL DE ENERGIA INCIDENTE

```

```

E = E_600/4.184

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 06 - DETERMINANDO O AFB ITERMEDIÁRIO

```

```

%AFB PARA Voc = 600V

```

```

k1 = 0.753364; k2 = 0.566; k3 = 1.752636; k4 = 0;
k5 = 0; k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229;
k9 = 0.003141; k10 = 1.092; k11 = 0; k12 = -1.598; k13 = 0.957;

```

```

aux4 = aux2 - (k12*log10(D)) - log10(20/T);
aux5 = k1+(k2*log10(G))+((k3*Iarc_600)/aux1)+aux4;
AFB_600 = power(10, (aux5/-k12));

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 07 - DETERMINANDO O AFB FINAL

```

```

AFB = AFB_600

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 08 - DETERMINANDO O COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DE CORRENTE DE ARCO

```

```

TAB2 = [0 -1.4269e-06 8.3137e-5 -1.9382e-3 0.022366 -0.12645 0.30226];
varCf =
(TAB2(1)*power(Voc, 6))+(TAB2(2)*power(Voc, 5))+(TAB2(3)*power(Voc, 4))+(TAB2(4)*power(Voc, 3))+(TAB2(5)*power(Voc, 2))+(TAB2(6)*Voc)+TAB2(7);
VARCF = 1 - 0.5*varCf;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 09 - DETERMINAR A CORRENTE DE ARCO FINAL REDUZIDA

```

```

Iarc_min = Iarc*VARCF
T_I_min = 250;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 10 - REFAZENDO O PASSO 04 USANDO A CORRENTE DE ARCO REDUZIDA

```

```

k1 = 0.753364; k2 = 0.566; k3 = 1.752636; k4 = 0;
k5 = 0; k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229;
k9 = 0.003141; k10 = 1.092; k11 = 0; k12 = -1.598; k13 = 0.957;

```

```

%Iarc_600_min = Iarc_600*VARCF;

aux1_min =
((k4*power(Ibf,7))+(k5*power(Ibf,6))+(k6*power(Ibf,5))+(k7*power(Ibf,4))+(k8*power(Ibf,3))+(k9*power(Ibf,2))+(k10*Ibf));
aux2_min =
(k11*log10(Ibf))+(k12*log10(D))+(k13*log10(Iarc_min))+(log10(1/CF));
aux3_min = k1+(k2*log10(G))+(k3*Iarc_600)/aux1_min+aux2_min;
E_600_min = (12.552/50)*T_I_min*(power(10,aux3_min));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 11 - DETERMINANDO O VALOR FINAL DE ENERGIA INCIDENTE

E_min = E_600_min/4.184

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 12 - REFAZENDO O PASSO 06 E 07 USANDO A CORRENTE DE ARCO REDUZIDA
if(E_min > E)

    k1 = 0.753364; k2 = 0.566; k3 = 1.752636; k4 = 0;
    k5 = 0; k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229;
    k9 = 0.003141; k10 = 1.092; k11 = 0; k12 = -1.598; k13 = 0.957;

    aux4_min = aux2_min - (k12*log10(D)) - log10(20/T_I_min);
    aux5_min = k1+(k2*log10(G))+(k3*Iarc_600)/aux1_min+aux4_min;
    AFB_600_min = power(10,(aux5_min/-k12));

    AFB_min = AFB_600_min
else
    AFB = AFB_600
end

```

### B.3 ALGORITMO PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO IEE 1584 NO CCM A

```
clear
clc

%DADOS DO CCM A
Voc = .48;           %TENSÃO DO SISTEMA (kV)
Ibf = 13.9;         %CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO (kA)
G = 25;            %GAP ENTRE CONDUTORES (mm)
D = 457.2;         %DISTÂNCIA DE TRABALHO (mm)
W = 355.6;         %LARGURA DO INVÓLUCRO (mm)
H = 304.8;         %ALTURA DO INVÓLUCRO (mm)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 01 - DETERMINANDO A CORRENTE INTERMEDIÁRIA

%CORRENTE INTERMEDIÁRIA PARA Voc = 600V

k1 = -0.04287; k2 = 1.035; k3 = -0.083; k4 = 0; k5 = 0;
k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229; k9 = 0.003141; k10 = 1.092;

Iarc_600 =
power(10, k1+k2*log10(Ibf)+k3*log10(G)) * ((k4*power(Ibf, 6)) + (k5*power(Ibf, 5)) + (k
6*power(Ibf, 4)) + (k7*power(Ibf, 3)) + (k8*power(Ibf, 2)) + (k9*Ibf) + k10);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 02 - DETERMINANDO A CORRENTE DE ARCO FINAL

Iarc = 1/sqrt(power(0.6/Voc, 2) * ((1/(Iarc_600^2)) - ((0.6^2 -
Voc^2)/(0.6^2*Ibf^2))))
T = 450;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 03 - DETERMINANDO O FATOR DE CORREÇÃO DEO TAMANHO DO INVÓLUCRO

W1 = 0.03937*W;
H1 = 0.03937*H;
EES = (W1+H1)/2;

CF = -0.000302*EES^2+0.03441*EES+0.4325;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 04 - DETERMINANDO OS VALORES INTERMEDIÁRIOS DE ENERGIA INCIDENTE

%ENERGIA INCIDENTE INTERMEDIÁRIA PARA Voc = 600V

k1 = 0.753364; k2 = 0.566; k3 = 1.752636; k4 = 0;
k5 = 0; k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229;
k9 = 0.003141; k10 = 1.092; k11 = 0; k12 = -1.598; k13 = 0.957;
```

```

aux1 =
((k4*power(Ibf, 7))+(k5*power(Ibf, 6))+(k6*power(Ibf, 5))+(k7*power(Ibf, 4))+(k8*power(Ibf, 3))+(k9*power(Ibf, 2))+(k10*Ibf));
aux2 = (k11*log10(Ibf))+(k12*log10(D))+(k13*log10(Iarc))+(log10(1/CF));
aux3 = k1+(k2*log10(G))+((k3*Iarc_600)/aux1)+aux2;
E_600 = (12.552/50)*T*(power(10,aux3));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 05 - DETERMINANDO O VALOR FINAL DE ENERGIA INCIDENTE

E = E_600/4.184

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 06 - DETERMINANDO O AFB ITERMEDIÁRIO

%AFB PARA Voc = 600V

k1 = 0.753364; k2 = 0.566; k3 = 1.752636; k4 = 0;
k5 = 0; k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229;
k9 = 0.003141; k10 = 1.092; k11 = 0; k12 = -1.598; k13 = 0.957;

aux4 = aux2 - (k12*log10(D)) - log10(20/T);
aux5 = k1+(k2*log10(G))+((k3*Iarc_600)/aux1)+aux4;
AFB_600 = power(10, (aux5/-k12));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 07 - DETERMINANDO O AFB FINAL

AFB = AFB_600;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 08 - DETERMINANDO O COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DE CORRENTE DE ARCO

TAB2 = [0 -1.4269e-06 8.3137e-5 -1.9382e-3 0.022366 -0.12645 0.30226];
varCf =
(TAB2(1)*power(Voc, 6))+(TAB2(2)*power(Voc, 5))+(TAB2(3)*power(Voc, 4))+(TAB2(4)*power(Voc, 3))+(TAB2(5)*power(Voc, 2))+(TAB2(6)*Voc)+TAB2(7);
VARCF = 1 - 0.5*varCf;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 09 - DETERMINAR A CORRENTE DE ARCO FINAL REDUZIDA

Iarc_min = Iarc*VARCF
T_I_min = 450;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 10 - REFAZENDO O PASSO 04 USANDO A CORRENTE DE ARCO REDUZIDA

k1 = 0.753364; k2 = 0.566; k3 = 1.752636; k4 = 0;
k5 = 0; k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229;
k9 = 0.003141; k10 = 1.092; k11 = 0; k12 = -1.598; k13 = 0.957;

%Iarc_600_min = Iarc_600*VARCF;

```

```

aux1_min =
((k4*power(Ibf,7))+(k5*power(Ibf,6))+(k6*power(Ibf,5))+(k7*power(Ibf,4))+(k8*power(Ibf,3))+(k9*power(Ibf,2))+(k10*Ibf));
aux2_min =
(k11*log10(Ibf))+(k12*log10(D))+(k13*log10(Iarc_min))+(log10(1/CF));
aux3_min = k1+(k2*log10(G))+(k3*Iarc_600)/aux1_min+aux2_min;
E_600_min = (12.552/50)*T_I_min*(power(10,aux3_min));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 11 - DETERMINANDO O VALOR FINAL DE ENERGIA INCIDENTE

E_min = E_600_min/4.184

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 12 - REFAZENDO O PASSO 06 E 07 USANDO A CORRENTE DE ARCO REDUZIDA
if(E_min > E)

    k1 = 0.753364; k2 = 0.566; k3 = 1.752636; k4 = 0;
    k5 = 0; k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229;
    k9 = 0.003141; k10 = 1.092; k11 = 0; k12 = -1.598; k13 = 0.957;

    aux4_min = aux2_min - (k12*log10(D)) - log10(20/T_I_min);
    aux5_min = k1+(k2*log10(G))+(k3*Iarc_600)/aux1_min+aux4_min;
    AFB_600_min = power(10,(aux5_min/-k12));

    AFB_min = AFB_600_min
else
    AFB = AFB_600
end

```

## B.4 ALGORITMO PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO IEE 1584 NO CCM B

```
clear
clc

%CCM B
Voc = .48;           %TENSÃO DO SISTEMA (kV)
Ibf = 12.1;         %CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO (kA)
G = 25;            %GAP ENTRE CONDUTORES (mm)
D = 457.2;         %DISTÂNCIA DE TRABALHO (mm)
W = 355.6;         %LARGURA DO INVÓLUCRO (mm)
H = 304.8;         %ALTURA DO INVÓLUCRO (mm)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 01 - DETERMINANDO A CORRENTE INTERMEDIÁRIA

%CORRENTE INTERMEDIÁRIA PARA Voc = 600V

k1 = -0.04287; k2 = 1.035; k3 = -0.083; k4 = 0; k5 = 0;
k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229; k9 = 0.003141; k10 = 1.092;

Iarc_600 =
power(10, k1+k2*log10(Ibf)+k3*log10(G)) * ((k4*power(Ibf, 6)) + (k5*power(Ibf, 5)) + (k
6*power(Ibf, 4)) + (k7*power(Ibf, 3)) + (k8*power(Ibf, 2)) + (k9*Ibf) + k10);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 02 - DETERMINANDO A CORRENTE DE ARCO FINAL

Iarc = 1/sqrt(power(0.6/Voc, 2) * ((1/(Iarc_600^2)) - ((0.6^2-
Voc^2)/(0.6^2*Ibf^2))))
T = 250;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 03 - DETERMINANDO O FATOR DE CORREÇÃO DEO TAMANHO DO INVÓLUCRO

W1 = 0.03937*W;
H1 = 0.03937*H;
EES = (W1+H1)/2;

CF = -0.000302*EES^2+0.03441*EES+0.4325;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 04 - DETERMINANDO OS VALORES INTERMEDIÁRIOS DE ENERGIA INCIDENTE

%ENERGIA INCIDENTE INTERMEDIÁRIA PARA Voc = 600V

k1 = 0.753364; k2 = 0.566; k3 = 1.752636; k4 = 0;
k5 = 0; k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229;
k9 = 0.003141; k10 = 1.092; k11 = 0; k12 = -1.598; k13 = 0.957;
```

```

aux1 =
((k4*power(Ibf, 7))+(k5*power(Ibf, 6))+(k6*power(Ibf, 5))+(k7*power(Ibf, 4))+(k8*power(Ibf, 3))+(k9*power(Ibf, 2))+(k10*Ibf));
aux2 = (k11*log10(Ibf))+(k12*log10(D))+(k13*log10(Iarc))+(log10(1/CF));
aux3 = k1+(k2*log10(G))+(k3*Iarc_600)/aux1+aux2;
E_600 = (12.552/50)*T*(power(10,aux3));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 05 - DETERMINANDO O VALOR FINAL DE ENERGIA INCIDENTE

E = E_600/4.184

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 06 - DETERMINANDO O AFB ITERMEDIÁRIO

%AFB PARA Voc = 600V

k1 = 0.753364; k2 = 0.566; k3 = 1.752636; k4 = 0;
k5 = 0; k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229;
k9 = 0.003141; k10 = 1.092; k11 = 0; k12 = -1.598; k13 = 0.957;

aux4 = aux2 - (k12*log10(D)) - log10(20/T);
aux5 = k1+(k2*log10(G))+(k3*Iarc_600)/aux1+aux4;
AFB_600 = power(10, (aux5/-k12));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 07 - DETERMINANDO O AFB FINAL

AFB = AFB_600;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 08 - DETERMINANDO O COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DE CORRENTE DE ARCO

TAB2 = [0 -1.4269e-06 8.3137e-5 -1.9382e-3 0.022366 -0.12645 0.30226];
varCf =
(TAB2(1)*power(Voc, 6))+(TAB2(2)*power(Voc, 5))+(TAB2(3)*power(Voc, 4))+(TAB2(4)*power(Voc, 3))+(TAB2(5)*power(Voc, 2))+(TAB2(6)*Voc)+TAB2(7);
VARCF = 1 - 0.5*varCf;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 09 - DETERMINAR A CORRENTE DE ARCO FINAL REDUZIDA

Iarc_min = Iarc*VARCF
T_I_min = 250;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 10 - REFAZENDO O PASSO 04 USANDO A CORRENTE DE ARCO REDUZIDA

k1 = 0.753364; k2 = 0.566; k3 = 1.752636; k4 = 0;
k5 = 0; k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229;
k9 = 0.003141; k10 = 1.092; k11 = 0; k12 = -1.598; k13 = 0.957;

%Iarc_600_min = Iarc_600*VARCF;

```

```

aux1_min =
((k4*power(Ibf,7))+(k5*power(Ibf,6))+(k6*power(Ibf,5))+(k7*power(Ibf,4))+(k8*power(Ibf,3))+(k9*power(Ibf,2))+(k10*Ibf));
aux2_min =
(k11*log10(Ibf))+(k12*log10(D))+(k13*log10(Iarc_min))+(log10(1/CF));
aux3_min = k1+(k2*log10(G))+(k3*Iarc_600)/aux1_min+aux2_min;
E_600_min = (12.552/50)*T_I_min*(power(10,aux3_min));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 11 - DETERMINANDO O VALOR FINAL DE ENERGIA INCIDENTE

E_min = E_600_min/4.184

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PASSO 12 - REFAZENDO O PASSO 06 E 07 USANDO A CORRENTE DE ARCO REDUZIDA
if(E_min > E)

    k1 = 0.753364; k2 = 0.566; k3 = 1.752636; k4 = 0;
    k5 = 0; k6 = -4.783e-9; k7 = 1.962e-6; k8 = -0.000229;
    k9 = 0.003141; k10 = 1.092; k11 = 0; k12 = -1.598; k13 = 0.957;

    aux4_min = aux2_min - (k12*log10(D)) - log10(20/T_I_min);
    aux5_min = k1+(k2*log10(G))+(k3*Iarc_600)/aux1_min+aux4_min;
    AFB_600_min = power(10,(aux5_min/-k12));

    AFB_min = AFB_600_min
else
    AFB = AFB_600
end

```

## 9. APÊNDICE C – CÁLCULOS DE CURTO CIRCUITO

### C.1 CONDIÇÃO 1 – DOIS GERADORES PRINCIPAIS EM PARALELO

16 Feb 2011 14:40:52

-----  
 SKM POWER\*TOOLS FOR WINDOWS  
 IEC 60909 FAULT ANALYSIS REPORT  
 COPYRIGHT(C) SKM SYSTEMS ANALYSIS, INC. 1995-2006  
 -----

THREE PHASE IEC 60909 FAULT REPORT  
 System Frequency(Hz): 60 Tmin: 0.02 sec.  
 Calculate Maximum Short-Circuit Current  
 =====

#### PAINEL DOS GERADORES PRINCIPAIS

\*FAULT BUS: PAINEL A Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.  
 R/X of Z(eq): 0.0833 Ik" (kA): 22.031  
 Ip(kA): 55.599 Ik(kA): 3.473

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	30.853	14.196	10.250	8.994
Ib(Sym. RMS) (kA)	19.353	12.425	10.114	8.993
i(DC) (kA)	24.028	6.867	1.661	0.091
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.594	1.143	1.013	1.000

=====

#### PAINEL DO GERADOR DE EMERGENCIA

\*FAULT BUS: PAINEL B Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.  
 R/X of Z(eq): 0.1114 Ik" (kA): 21.096  
 Ip(kA): 51.362 Ik(kA): 3.464

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	28.037	12.572	9.885	8.858
Ib(Sym. RMS) (kA)	18.548	12.028	9.875	8.858
i(DC) (kA)	21.024	3.658	0.450	0.005
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.512	1.045	1.001	1.000

=====

### PAINEL DAS CARGAS NORMAIS

\*FAULT BUS: CCM A Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.  
 R/X of Z(eq): 0.0859 Ik" (kA): 21.999  
 Ip(kA): 55.315 Ik(kA): 3.472

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	30.628	13.886	10.126	8.912
Ib(Sym. RMS) (kA)	19.309	12.353	10.035	8.912
i(DC) (kA)	23.775	6.342	1.360	0.054
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.586	1.124	1.009	1.000

### PAINEL DAS CARGAS ESSENCIAIS

\*FAULT BUS: CCM B Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.  
 R/X of Z(eq): 0.1338 Ik" (kA): 20.269  
 Ip(kA): 48.049 Ik(kA): 3.453

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	25.997	12.141	9.927	8.988
Ib(Sym. RMS) (kA)	17.917	11.909	9.925	8.988
i(DC) (kA)	18.837	2.363	0.210	0.002
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.451	1.019	1.000	1.000

### DISJUNTOR GERADOR 01A

GROUP CONTRIBUTION THROUGH BRANCH : BUS-UG-01A

R/X: 0.068 Ik" (kA): 6.713  
 Ip(kA): 17.262 Ik(kA): 1.736

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	9.972	5.826	4.759	4.372
Ib(Sym. RMS) (kA)	6.387	5.205	4.704	4.372
i(DC) (kA)	7.659	2.616	0.721	0.044
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.561	1.119	1.012	1.000

DISJUNTOR GERADOR 01B

GROUP CONTRIBUTION THROUGH BRANCH : BUS-UG-01B

R/X: 0.068 Ik" (kA): 6.713  
 Ip(kA): 17.262 Ik(kA): 1.736

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	9.972	5.826	4.759	4.372
Ib(Sym. RMS) (kA)	6.387	5.205	4.704	4.372
i(DC) (kA)	7.659	2.616	0.721	0.044
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.561	1.119	1.012	1.000

Fonte: Queiroz (2011).

## C.2 CONDIÇÃO 2 – UM GERADOR PRINCIPAL EM FUNCIONAMENTO

16 Feb 2011 14:48:08

-----  
 SKM POWER\*TOOLS FOR WINDOWS  
 IEC 60909 FAULT ANALYSIS REPORT  
 COPYRIGHT(C) SKM SYSTEMS ANALYSIS, INC. 1995-2006  
 -----

THREE PHASE IEC 60909 FAULT REPORT  
 System Frequency(Hz): 60 Tmin: 0.02 sec.  
 Calculate Maximum Short-Circuit Current

=====

### PAINEL DOS GERADORES PRINCIPAIS

\*FAULT BUS: PAINEL A Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.  
 R/X of Z(eq): 0.0898 Ik" (kA): 15.319  
 Ip(kA): 38.339 Ik(kA): 1.736

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
---------------	-----	-----	-----	------

Ib(Asym. RMS) (kA)	20.883	8.386	5.519	4.663
Ib(Sym. RMS) (kA)	12.966	7.230	5.438	4.663
i(DC) (kA)	16.370	4.250	0.940	0.047
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.611	1.160	1.015	1.000

### PAINEL DO GERADOR DE EMERGENCIA

\*FAULT BUS: PAINEL B Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.  
 R/X of Z(eq): 0.1048 Ik" (kA): 14.933  
 Ip(kA): 36.656 Ik(kA): 1.734

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
---------------	-----	-----	-----	------

Ib(Asym. RMS) (kA)	19.771	7.680	5.389	4.644
Ib(Sym. RMS) (kA)	12.647	7.098	5.374	4.644
i(DC) (kA)	15.197	2.932	0.407	0.006
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.563	1.082	1.003	1.000

### PAINEL DAS CARGAS NORMAIS

\*FAULT BUS: CCM A Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.  
 R/X of Z(eq): 0.0889 Ik" (kA): 15.331  
 Ip(kA): 38.405 Ik(kA): 1.736

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	20.917	8.325	5.432	4.573
Ib(Sym. RMS) (kA)	12.961	7.173	5.359	4.573
i(DC) (kA)	16.418	4.226	0.890	0.037
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.614	1.161	1.014	1.000

### PAINEL DAS CARGAS ESSENCIAIS

\*FAULT BUS: CCM B Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.  
 R/X of Z(eq): 0.1194 Ik" (kA): 14.556  
 Ip(kA): 35.099 Ik(kA): 1.732

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	18.800	7.423	5.445	4.740
Ib(Sym. RMS) (kA)	12.379	7.092	5.440	4.740
i(DC) (kA)	14.149	2.192	0.240	0.002
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.519	1.047	1.001	1.000

### DISJUNTOR GERADOR 01A

GROUP CONTRIBUTION THROUGH BRANCH : BUS-UG-01A

R/X: 0.068 Ik" (kA): 6.713  
 Ip(kA): 17.262 Ik(kA): 1.736

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	9.972	5.826	4.759	4.372
Ib(Sym. RMS) (kA)	6.387	5.205	4.704	4.372
i(DC) (kA)	7.659	2.616	0.721	0.044
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.561	1.119	1.012	1.000

Fonte: Queiroz (2011).

### C.3 CONDIÇÃO 3 – GERADOR DE EMERGÊNCIA EM FUNCIONAMENTO

16 Feb 2011 14:50:02

-----  
SKM POWER\*TOOLS FOR WINDOWS  
IEC 60909 FAULT ANALYSIS REPORT  
COPYRIGHT(C) SKM SYSTEMS ANALYSIS, INC. 1995-2006  
-----

THREE PHASE IEC 60909 FAULT REPORT  
System Frequency(Hz): 60 Tmin: 0.02 sec.  
Calculate Maximum Short-Circuit Current  
=====

#### PAINEL DO GERADOR DE EMERGENCIA

\*FAULT BUS: PAINEL B Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.  
R/X of Z(eq): 0.0825 Ik" (kA): 4.731  
Ip(kA): 11.951 Ik(kA): 0.724

TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	6.600	2.924	2.032	1.790
Ib(Sym. RMS) (kA)	4.101	2.518	1.999	1.790
i(DC) (kA)	5.172	1.488	0.361	0.020
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.610	1.162	1.016	1.000

#### PAINEL DAS CARGAS ESSENCIAIS

\*FAULT BUS: CCM B Voltage: 0.480 kV Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.  
R/X of Z(eq): 0.0837 Ik" (kA): 4.724  
Ip(kA): 11.912 Ik(kA): 0.723

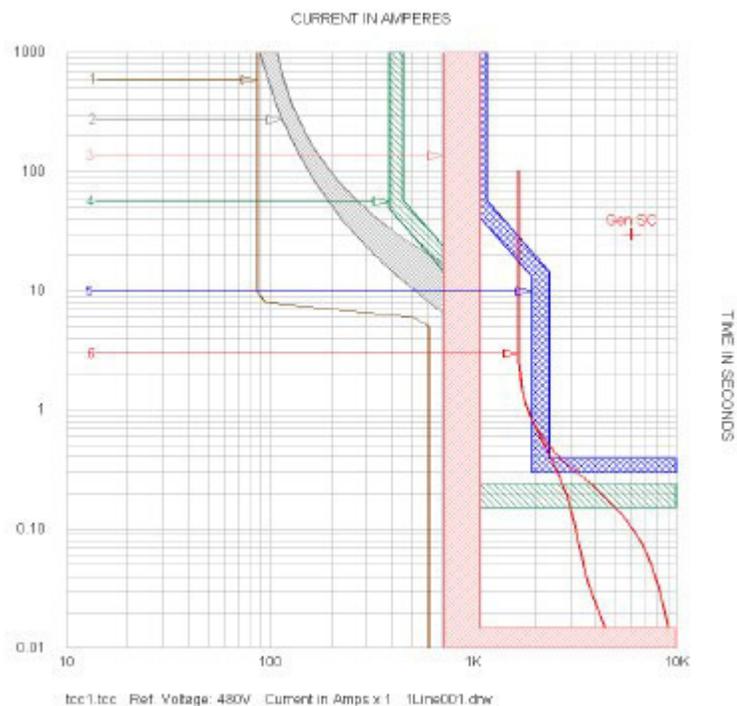
TIME (Cycles)	0.5	3.0	6.0	12.5
Ib(Asym. RMS) (kA)	6.566	2.856	1.973	1.734
Ib(Sym. RMS) (kA)	4.083	2.474	1.946	1.734
i(DC) (kA)	5.142	1.428	0.324	0.015
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.608	1.155	1.014	1.000

Fonte: Queiroz (2011).

## APÊNDICE D – COORDENOGRAMAS

### D.1 Coordenograma 1 - Coordenação entre o Gerador A e a maior carga presente no CCM B

Figura 19 – Coordenograma 1



Fonte: Queiroz (2011).

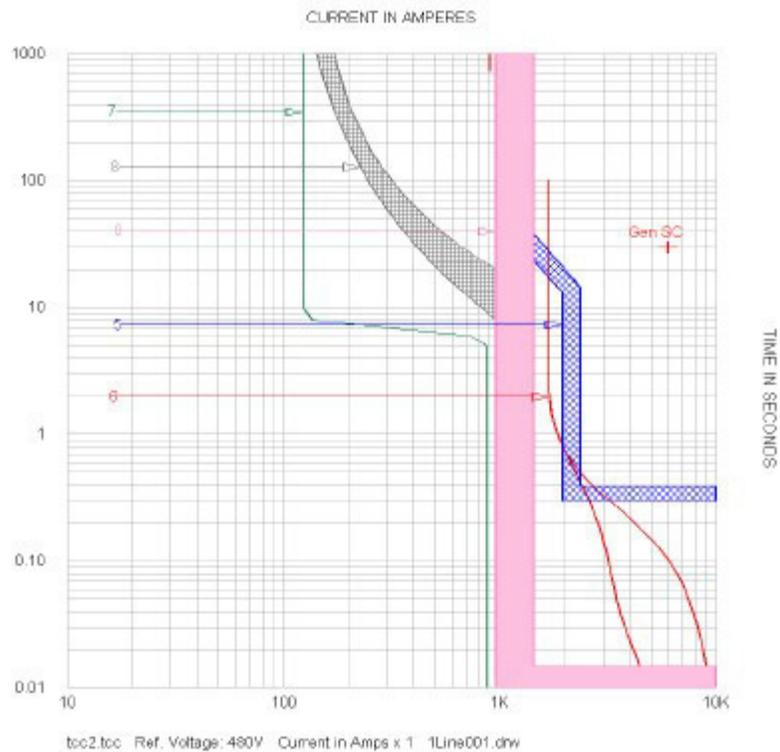
Onde:

- 1 – Curva de partida e operação do maior motor deste CCM;
- 2 – Curva do relé térmico do maior motor desse CCM;
- 3 – Curva magnética do disjuntor de proteção do maior motor deste CCM;
- 4 – Curva LTD e STD do relé Ampector do disjuntor alimentador do CCM B;
- 5 – Curva LTD e STD do relé Ampector do disjuntor alimentador do gerador principal A;

- 6 – Curva de dano do gerador principal A.

## D.2 Coordenograma 2 - Coordenação entre o Gerador A e a maior carga presente no CCM A

Figura 20 – Coordenograma 2



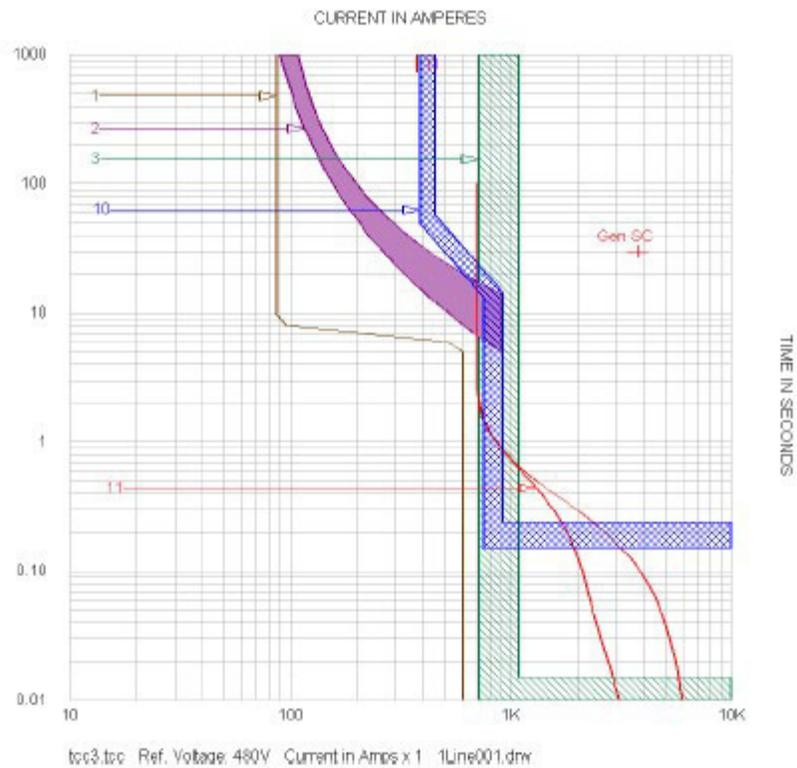
Fonte: Queiroz (2011).

Onde:

- 7 – Curva de partida e operação do maior motor deste CCM;
- 8 – Curva do relé térmico do maior motor desse CCM;
- 9 – Curva magnética do disjuntor de proteção do maior motor deste CCM;
- 5 – Curva LTD e STD do relé Ampektor do disjuntor alimentador do gerador principal A;
- 6 – Curva de dano do gerador principal A.

### D.3 Coordenograma 3 - Coordenação entre o Gerador C (gerador de emergência) e a maior carga presente no CCM B

Figura 21 – Coordenograma 3



Fonte: Queiroz (2011).

Onde:

- 1 – Curva de partida e operação do maior motor deste CCM;
- 2 – Curva do relé térmico do maior motor desse CCM;
- 3 – Curva magnética do disjuntor de proteção do maior motor deste CCM;
- 10 – Curva LTD e STD do relé Ampector do disjuntor alimentador do gerador de emergência;
- 11 – Curva de dano do gerador de emergência.