

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA

ARCO ELÉTRICO EM SISTEMAS INDUSTRIAIS:  
MÉTODOS DE CÁLCULO E MEDIDAS DE  
MITIGAÇÃO

**Leandro Junior de Oliveira**

**Itajubá, setembro de 2021**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA

**Leandro Junior de Oliveira**

# **ARCO ELÉTRICO EM SISTEMAS INDUSTRIAIS: MÉTODOS DE CÁLCULO E MEDIDAS DE MITIGAÇÃO**

**Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para  
obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia  
Elétrica**

**Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência.**

**Orientador: Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho.**

**Setembro de 2021**

**Itajubá**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por estar comigo em todos os momentos, me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Ao professor José Maria de Carvalho Filho por ter aceitado a orientação desse trabalho e me ajudado no decorrer desse período.

À minha família pela confiança e apoio empregados a mim. Em especial a meu pai e minha mãe, Antônio e Nildes, por todo amor e suporte durante esse tempo, pela preocupação e por ter orado por mim. Ao meu irmão Lucas pelo apoio e ajuda em tudo aquilo que precisei.

À minha namorada Solange por acreditar em mim, por todo apoio, amor, carinho e pelos conhecimentos partilhados. E por ser a maior incentivadora a realizar este trabalho.

A todos colegas e amigos que estiveram ao meu lado durante essa caminhada.

A todos professores e funcionários da UNIFEI que proporcionaram a mim a oportunidade de realizar o mestrado.

A CAPES pelo apoio financeiro.

## RESUMO

Neste trabalho será apresentado um estudo sobre o arco elétrico em sistemas elétricos indústrias abordando os métodos de cálculo de acordo com os guias IEEE Std 1584 – 2002 e sua revisão IEEE Std 1584 – 2018. Foram apresentadas as modificações introduzidas pela nova versão do guia, identificando as diferenças na avaliação do arco elétrico. Uma abordagem sobre as medidas de mitigação de arco elétrico também será realizada. O desenvolvimento do trabalho teve por base a análise comparativa dos métodos de cálculo de arco elétrico das versões 2002 e 2018, as quais foram aplicadas em um estudo de caso teste. Primeiramente, o caso teste será avaliado aplicando-se os métodos de cálculos de acordo com os guias 2002 e 2018, sendo executados em software dedicado “*PTW*”. Posteriormente, o caso teste será novamente avaliado considerando o decaimento AC das correntes de curto-circuito de geradores e motores, sendo executados em *scripts* desenvolvidos em “*Matlab*” e aplicando as equações dos guias 2002 e 2018. Os resultados das abordagens são comparados, e então avaliados a necessidade e urgência de revisão dos estudos de arco elétrico existentes, e também qual a influência ao considerar o decaimento AC das correntes de curto-circuito nos cálculos da energia incidente e na definição das vestimentas.

**Palavras-chave** – Cálculo dos parâmetros do arco elétrico, energia incidente, medidas de mitigação, decaimento AC das correntes de curto-circuito.

## **ABSTRACT**

In this work a study on the electric arc in industrial electrical systems will be presented, approaching the calculation methods according to the IEEE Std 1584 – 2002 and its revision IEEE Std 1584 – 2018 guides. The modifications introduced by the new version of the guide were presented, identifying the differences in the evaluation of the electric arc. An approach to arc flash mitigation measures will also be carried out. The development of the work was based on the comparative analysis of the electric arc calculation methods of the 2002 and 2018 versions, which were applied in a test case study. First, the test case will be evaluated by applying the calculation methods according to the 2002 and 2018 guides, being executed in dedicated “PTW” software. Subsequently, the test case will be evaluated again considering the AC decay of the short-circuit currents of generators and motors, being executed in scripts developed in "Matlab" and applying the equations from the 2002 and 2018 guides. The results of the approaches are compared, and The need and urgency of reviewing existing arc flash studies were then evaluated, as well as the influence when considering the AC decay of short-circuit currents in the incident energy calculations and in the definition of the garments.

**Keywords** – Arc flash parameters calculation, incident energy, mitigation measures, AC decay of short-circuit currents.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Diagrama vetorial de tensões e correntes.....	27
Figura 2. 2 - A natureza direcional de um arco elétrico sem o comportamento caótico .....	28
Figura 2. 3 - Mecanismos de transferência de energia na ocorrência de um acidente com arco elétrico .....	29
Figura 2. 4 - Ilustração da fonte de arco e o objeto receptor de calor .....	30
Figura 2. 5 - Fatalidades elétricas segundo dados do (ESFI, 2019).....	33
Figura 2. 6 - Dados sobre lesões elétricas segundo o (ESFI, 2019).....	33
Figura 2. 7 - Dados sobre mortes no ano de 2020 no Brasil.....	34
Figura 2. 8 - Dados sobre morte por choque elétrico por região .....	35
Figura 2. 9 - Dados de morte por choque elétrico em função da faixa etária .....	35
Figura 4. 1 - Configuração de teste VCB: a) Desenho esquemático, b) Configuração eletrodo laboratório e c) Equipamento correspondente.....	47
Figura 4. 2 - Configuração de teste VCBB: a) Desenho esquemático, b) Configuração eletrodo laboratório e c) Equipamento correspondente.....	47
Figura 4. 3 - Configuração de teste VOA: a) Desenho esquemático, b) Configuração eletrodo laboratório e c) Equipamento correspondente.....	47
Figura 4. 4 - Configuração de teste HCB: a) Desenho esquemático, b) Configuração eletrodo laboratório e c) Equipamento correspondente.....	48
Figura 4. 5 - Configuração de teste HOA: a) Desenho esquemático, b) Configuração eletrodo laboratório e c) Equipamento correspondente.....	48
Figura 4. 6 - Passos para aplicação do guia IEEE STD 1584 – 2002 .....	60
Figura 4. 7 - Passos para aplicação da norma IEEE STD 1584 – 2018.....	61
Figura 4. 8 - Energia Incidente em painel 480 V (modelo 2018 vs 2002) .....	63

Figura 4. 9 - Energia Incidente ao ar livre 480 V (modelo 2018 vs 2002).....	63
Figura 4. 10 - Energia Incidente em painel 13,8 kV (modelo 2018 vs 2002).....	64
Figura 4. 11 - Energia Incidente ao ar livre 13,8 kV (modelo 2018 vs 2002) .....	64
Figura 5. 1 - Sistema elétrico utilizando ZSI .....	69
Figura 5. 2 - Zonas de proteção dos relés diferenciais .....	70
Figura 5. 3 - Sensor de ponto .....	70
Figura 5. 4 - Sensor de fibra óptica .....	71
Figura 5. 5 - Relé de proteção contra arco elétrico, VAMP 321 .....	72
Figura 5. 6 - Relé de proteção contra arco elétrico, ZYGGOT Arco .....	73
Figura 5. 7 - Relé de proteção contra arco elétrico, SEL-751.....	73
Figura 5. 8 - Exemplo de chave de manutenção.....	75
Figura 5. 9 - Diagrama de circuito de controle para conexões do interruptor no modo de manutenção .....	75
Figura 5. 10 - Operação utilizando robô e modo de operação convencional, direita e esquerda respectivamente .....	76
Figura 5. 11 - Limites de aproximação .....	82
Figura 5. 12 - Etiquetagem após realização do estudo de arco elétrico.....	84
Figura 6. 1 – Cálculo da energia incidente sem considerar o decaimento AC das correntes de curto- circuito.....	86
Figura 6. 2 - Cálculo da energia incidente considerando de forma simplificada o decaimento AC das contribuições de correntes de curto-circuito .....	87
Figura 6. 3 - Cálculo da energia incidente considerando de forma detalhada o decaimento AC das correntes de curto-circuito .....	88
Figura 6. 4 - Fluxograma para determinar o tempo de atuação dos dispositivos de proteção .....	93

Figura 6. 5 - Fluxograma de aplicação do guia IEEE Std 1584 - 2002 para cálculo da energia incidente .....	96
Figura 6. 6 - Fluxograma de aplicação do guia IEEE Std 1584 - 2018 para cálculo da energia incidente .....	99
Figura 6. 7 - Primeiro segmento (corrente arco x tempo) para cálculo da energia incidente parcial .	100
Figura 6. 8 - Exemplo de cálculo da energia incidente parcial .....	101
Figura 7. 1 - Diagrama unifilar do sistema elétrico industrial do caso teste.....	103
Figura 7. 2 - Correntes de curto-circuito total: (vermelho) para cálculo da corrente de arco e (azul) para cálculo da corrente de arco mínima.....	108
Figura 7. 3 - Corrente de arco calculada para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) corrente de arco e (azul) corrente de arco mínima. ....	108
Figura 7. 4 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima.....	110
Figura 7. 5 - Correntes de curto-circuito total: (vermelho) para cálculo da corrente de arco e (azul) para cálculo da corrente de arco mínima.....	110
Figura 7. 6 - Corrente de arco calculada para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) corrente de arco e (azul) corrente de arco mínima.....	111
Figura 7. 7 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima.....	112
Figura 7. 8 - Correntes de curto-circuito total para cálculo da corrente de arco e para cálculo da corrente de arco mínima .....	113
Figura 7. 9 - Corrente de arco calculada para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) corrente de arco e (azul) corrente de arco mínima.....	113
Figura 7. 10 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima.....	114
Figura 7. 11 - Corrente de curto-circuito total para cálculo da corrente de arco e para cálculo da corrente de arco mínima .....	115



Figura 7. 12 - Corrente de arco calculada para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) corrente de arco e (azul) corrente de arco mínima.....	115
Figura 7. 13 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima.....	116
Figura 7. 14 - Corrente de curto-circuito total para cálculo das correntes de arco e arco mínima.....	117
Figura 7. 15 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima.....	118
Figura 7. 16 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima.....	119
Figura 7. 17- Correntes de curto-circuito total: (vermelho) para cálculo da corrente de arco e (azul) para cálculo da corrente de arco mínima.....	119
Figura 7. 18 - Corrente de arco calculada para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) corrente de arco e (azul) corrente de arco mínima.....	120
Figura 7. 19 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima.....	121
Figura 7. 20 - Correntes de curto-circuito total para cálculo das correntes de arco e arco mínima ...	121
Figura 7. 21 - Corrente de arco calculada para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) corrente de arco e (azul) corrente de arco mínima.....	122
Figura 7. 22 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima.....	123
Figura 7. 23 - Correntes de curto-circuito total para cálculo da corrente de arco e para cálculo da corrente de arco mínima.....	123
Figura 7. 24 - Corrente de arco calculada para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) corrente de arco e (azul) corrente de arco mínima.....	124
Figura 7. 25 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima.....	125

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 - Classes dos equipamentos e <i>gaps</i> típicos de barramentos conforme IEEE 1584 – 2002.	38
Tabela 3. 2 - Classes de equipamentos e distâncias de trabalho típicas conforme IEEE 1584 – 2002.	39
Tabela 3. 3 - Fatores de distância "x" para equipamentos conforme IEEE Std 1584 – 2002.....	42
Tabela 4. 1 - Dimensões dos gabinetes e classe de tensão.....	46
Tabela 4. 2 - Diretrizes para determinar as alturas e larguras equivalentes do painéis .....	51
Tabela 4. 3 - Coeficientes das Equações (4.9) e (4.10) .....	53
Tabela 4. 4 - Mudanças de análise após a publicação da nova versão do Guia IEEE 1584.....	62
Tabela 5. 1 - Disposições da Norma NFPA 70E.....	78
Tabela 5. 2 - Vestimentas de Proteção e Equipamentos de Proteção Individual (EPI) conforme a categoria de risco .....	80
Tabela 6. 1 - Constantes características Mxt.....	91
Tabela 7. 1 - Ajuste do relé R Sec TR1.....	103
Tabela 7. 2 - Ajuste do relé R GER para corrente de arco .....	104
Tabela 7. 3 - Ajuste do relé R Sec TR2 .....	104
Tabela 7. 4 - Ajuste do disjuntor DJ Sec TR3.....	104
Tabela 7. 5 - Ajuste do disjuntor DJ CCM BT.....	104
Tabela 7. 6 - Resultados da análise de arco elétrico - Método IEEE Std 1584 – 2002 (PTW) .....	106
Tabela 7. 7 - Resultado da análise de arco elétrico - Método IEEE Std 1584 – 2018 (PTW).....	107
Tabela 7. 8 - Tempo de atuação do relé R Sec TR1 para a Corrente de Arco .....	109
Tabela 7. 9 - Tempo de atuação do relé R GER .....	109
Tabela 7. 10 - Tempo de atuação do relé R Sec TR1 para Corrente de Arco Mínima.....	109
Tabela 7. 11 - Tempo de atuação do relé R Sec TR2 para a Corrente de Arco .....	111

Tabela 7. 12 - Tempo de atuação do relé R Sec TR2 para a corrente de arco mínima .....	112
Tabela 7. 13 - Tempo de atuação do disjuntor DJ Sec TR3 para a Corrente de Arco e Corrente de Arco Mínima .....	114
Tabela 7. 14 - Tempo de atuação do disjuntor DJ CCM BT para a Corrente de Arco e Corrente de Arco Mínima .....	116
Tabela 7. 15 - Resultados da análise de arco elétrico segundo o método IEEE Std 1584 – 2002 (considerando o decaimento AC das correntes de curto-circuito).....	116
Tabela 7. 16 - Tempo de atuação do relé R Sec TR1 para a Corrente de Arco e Corrente de Arco Mínima .....	118
Tabela 7. 17 - Tempo de atuação do relé R GER para correntes de Arco e Arco Mínima .....	118
Tabela 7. 18 - Tempo de atuação do relé R Sec TR2 para a Corrente de Arco .....	120
Tabela 7. 19 - Tempo de atuação do relé R Sec TR2 para a Corrente de Arco Mínima .....	120
Tabela 7. 20 - Tempo de atuação do disjuntor DJ Sec TR3 para a Corrente de Arco e Corrente de Arco Mínima .....	122
Tabela 7. 21 - Tempo de atuação do disjuntor DJ CCM BT para a Corrente de Arco e Corrente de Arco Mínima .....	124
Tabela 7. 22 - Resultado da análise de arco elétrico segundo o método IEEE STD 1584 – 2018 considerando o decremento AC das correntes de curto-circuito .....	125
Tabela 7. 23 - Comparação dos níveis de energia incidente para os diferentes métodos .....	126
Tabela 7. 24 - Classificação de risco/perigo conforme NFPA 70E - 2012 (NFPA, 2012) .....	126
Tabela 10. 1 – Coeficientes para Equação (4.1).....	133
Tabela 10. 2 – Coeficientes para as Equações (4.11) e (4.18) .....	134
Tabela 10. 3 – Coeficientes para as Equações (4.12) e (4.19) .....	134
Tabela 10. 4 – Coeficientes para as Equações (4.13) e (4.20) .....	135
Tabela 10. 5 - Coeficientes para cálculo da corrente de arco mínimo conforme equação (4.25) .....	135

Tabela 10. 6 - Dados da concessionária de energia elétrica .....	136
Tabela 10. 7 - Parâmetros do gerador .....	136
Tabela 10. 8 - Parâmetros dos transformadores .....	136
Tabela 10. 9 - Parâmetros dos cabos .....	137
Tabela 10. 10 – Parâmetro dos motores .....	137
Tabela 10. 11 - Dados entrada para equações do guia IEEE 1584 - 2002 .....	138
Tabela 10. 12 - Dados de entrada para equações do guia IEEE 1584 - 2018 .....	138
Tabela 10. 13 - Valores intermediários - Barramento QDG-MT 13,8 kV – IEEE Std 1584 - 2002 ..	139
Tabela 10. 14 - Valores intermediários - Barramento CCM-MT 4,16 kV – IEEE Std 1584 - 2002 ..	140
Tabela 10. 15 - Valores intermediários - Barramento QDG-BT 440 V – IEEE Std 1584 - 2002 .....	141
Tabela 10. 16 - Valores intermediários - Barramento CCM-BT 440 V – IEEE Std 1584 - 2002 .....	141
Tabela 10. 17 - Valores intermediários - Barramento QDG-MT 13,8 kV – IEEE Std 1584 - 2018 ..	142
Tabela 10. 18 - Valores intermediários - Barramento CCM-MT 4,16 kV – IEEE Std 1584 - 2018 ..	143
Tabela 10. 19 - Valores intermediários - Barramento QDG-BT 440 V – IEEE Std 1584 - 2018 .....	143
Tabela 10. 20 - Valores intermediários - Barramento CCM-BT 440 V – IEEE Std 1584 - 2018 .....	144

## ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRACOPEL	Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade
AC	<i>Alternating current</i>
AFB	Limite do arco elétrico
AFD	<i>Arc-Flash Detection</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ATPV	<i>Arc Thermal Protection Value</i>
BLS	<i>Bureau of Labor Statistics</i>
CB	<i>Circuit Breaker</i>
CCM	Centro de controle de motores
CF	Fator de correção do tamanho do gabinete
EI	Extremamente Inversa
EPI	Equipamento de proteção individual
ESFI	<i>Electrical Safety Foundation International</i>
GAP	Vão, espaçamento entre condutores
HCB	<i>Horizontal conductors/electrodes inside a metal box/enclosure</i> (Condutores/eletrodos horizontais dentro de uma caixa/gabinete de metal)
HOA	<i>Horizontal conductors/electrodes in open air</i> (Condutores/eletrodos horizontais ao ar livre)
HRC	<i>Hard Risk Hazard</i>
IAC	Internal Arc Cubicle
ICCBs	<i>Insulated case circuit breakers</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IR	<i>Infra-red</i>
LSC	Loss of Service Continuity

LVPCB	<i>Low Voltage power circuit breaker</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MCCB	<i>Molded case circuit breakers</i>
MI	Muito Inversa
MMPR	<i>Microprocessor Based Multifunctional Relay</i>
N.E.T.A	<i>International Electrical Testing Association</i>
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i>
NI	Normalmente Inversa
PI	Partições Isolantes
PM	Partições Metálicas
PTW	<i>Power Tools for Windows</i>
RMS	Root mean square
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>
TC	Transformador de corrente
TL	Tempo longo
VAMP	Relé de proteção contra arco, Schneider Electric
VCB	<i>Vertical conductors/electrodes inside a metal box/enclosure</i> (Condutores/eletrodos verticais dentro de uma caixa/gabinete de metal)
VCBB	<i>Vertical conductors/electrodes terminated in na insulating barrier inside a metal box/enclosure</i> (Condutores/eletrodos verticais terminados em uma barreira isolante dentro de uma caixa/gabinete de metal)
VOA	<i>Vertical conductors/electrodes terminated in insulating barrier inside a metal box/enclosure</i> (Condutores/eletrodos verticais ao ar livre)
ZSI	Intertravamento Seletivo de Zona
ZYGOT	Relé de proteção contra arco, Varixx

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_0$	Projeção da área de superfície do objeto em um plano normal à direção da fonte ao objeto (cm <sup>2</sup> )
$AFB_1$	Primeiro termo de interpolação do AFB entre 600 V e 2.700 V (mm)
$AFB_{14.300}$	Limite do arco elétrico para $V_{oc}$ = 14.300 V (mm)
$AFB_2$	Segundo termo de interpolação do AFB para $V_{oc}$ maior que 2.700 V (mm)
$AFB_{2.700}$	Limite do arco elétrico para $V_{oc}$ = 2.700 V (mm)
$AFB_3$	Terceiro termo de interpolação do AFB para $V_{oc}$ menor que 2.700 V (mm)
$AFB_{600}$	Limite do arco elétrico para $V_{oc}$ = 600 V (mm)
$A_s$	Área total da superfície da fonte (cm <sup>2</sup> )
$Altura_1$	Altura equivalente do gabinete (mm)
$C_f$	Fator de cálculo
$D_B$	Distância limite do ponto de arco (mm)
$E''$	Tensão interna do gerador atrás da reatância subtransitória (pu)
$E'$	Tensão interna do gerador por trás da reatância transitória (pu)
$E_1$	Primeiro termo de interpolação de E entre 600 V e 2.700 V (V/cm <sup>2</sup> )
$E_{14.300}$	Energia incidente em $V_{oc}$ = 14.300 V (J/cm <sup>2</sup> )
$E_2$	Segundo termo de interpolação de E usado quando $V_{oc}$ é maior que 2.700 V (V/cm <sup>2</sup> )
$E_{2.700}$	Energia incidente em $V_{oc}$ = 2.700 V (J/cm <sup>2</sup> )
$E_3$	Terceiro termo de interpolação de E usado quando $V_{oc}$ é menor que 2.700 V (V/cm <sup>2</sup> )
$E_{600}$	Energia incidente em $V_{oc}$ = 600 V (J/cm <sup>2</sup> )
$E_{AE}$	Energia do Arco Elétrico (Cal / cm <sup>2</sup> )
$E_B$	Energia incidente na distância limite (J/cm <sup>2</sup> )
$E_a$	Queda de tensão no arco (V)
$E_n$	Energia incidente normalizada para tempo e distância (J/cm <sup>2</sup> )
$E_s$	Queda de tensão na alimentação (V)
$I_a$	Corrente de arco (“ <i>GUIA IEEE STD 1584 – 2002</i> ”)(kA)
$I_{arc}$	Corrente de arco (“ <i>GUIA IEEE STD 1584 – 2018</i> ”) (kA)
$I_{arc\_1}$	Primeiro termo de interpolação da $I_{arc}$ (kA), entre 600 V e 2700 V
$I_{arc\_14300}$	Corrente de arco RMS (kA), para $V_{oc}$ = 14.300 V

$I_{arc\_2}$	Segundo termo de interpolação da $I_{arc}$ (kA), para $V_{oc}$ maior que 2700 V
$I_{arc\_2700}$	Corrente de arco RMS (kA), para $V_{oc} = 2700$ V
$I_{arc\_3}$	Terceiro termo de interpolação da $I_{arc}$ (kA), para $V_{oc}$ menor que 2700 V
$I_{arc\_600}$	Corrente de arco RMS (kA), para $V_{oc} = 600$ V
$I_{arc\_min}$	Segunda corrente de arco RMS reduzida com base no $V_{arcCf}$ (kA)
$I_{bf}$	Corrente de falta franca trifásica (kA)
$I_{ef}$	Valor eficaz da corrente de falta (A)
$I_{pk}$	Corrente de “ <i>pick up</i> ” ajustada para o relé (A)
$I_{scc}^2$	Corrente de curto-circuito (kA)
$K_1$	Coeficiente para o tipo de aterramento do sistema
$K_1$	Coeficiente para o tipo de configuração do gabinete (aberta ou fechada)
$K_1$	Constante dependente da curva
$K_d$	Constante definida pelo dial de tempo
$Largura_1$	Largura equivalente do gabinete (mm)
$Q_0$	Calor absorvido pela superfície projetada do objeto (W)
$Q_s$	Calor emitido pela fonte, por unidade de área (W)
$T''$	Constante de tempo transitória do motor (pu)
$T_a$	Temperatura absoluta da superfície absorvente (K)
$T_d''$	Constante de tempo do período subtransitório (pu)
$T_d'$	Constante de tempo do período transitório (pu)
$T_e$	Temperatura absoluta da superfície emissora (K)
$V_a$	Tensão terminal do gerador (pu)
$V_{arcCf}$	Fator de correção da variação da corrente de arco
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto (tensão do sistema) (V)
$X''$	Reatância transitória do motor (pu)
$X_d''$	Reatância subtransitória de eixo direto (pu)
$X_d'$	Reatância transitória de eixo direto (pu)
$b_1$	Coeficiente usado na equação de CF
$b_2$	Coeficiente usado na equação de CF
$b_3$	Coeficiente usado na equação de CF
$i_{AC}$	Corrente de curto-circuito



$i_F$	Corrente de campo em dadas condições de carga (pu)
$i_{Fg}$	Corrente de campo em tensão nominal sem carga (pu)
C	Coefficiente de absorção da superfície absorvente
D	Distância do possível ponto do arco à pessoa (mm)
E	Energia incidente (J/cm <sup>2</sup> )
EES	Tamanho equivalente do gabinete (mm)
h	Transferência de calor ( $W/in^2$ ) ou ( $W/6,45 * cm^2$ )
t	Tempo de duração do arco (“ <i>GUIA IEEE STD 1584 – 2002</i> ”) (s)
T	Tempo de duração do arco (“ <i>GUIA IEEE STD 1584 – 2018</i> ”) (s)
x	Expoente da distância
A	Constante igual a 4 para VCB e 10 para VCBB e HCB; e
AFB	Limite do arco elétrico final no $V_{oc}$ especificado (mm)
Altura	Altura real do gabinete (mm)
B	Constante igual a 20 para VCB, 24 para VCBB e 22 para HCB
CF	Coefficiente de fator de correção do gabinete
D	Profundidade do painel (“ <i>Depth</i> ”)(mm)
E	Energia incidente final na $V_{oc}$ especificada (J/cm <sup>2</sup> )
E	Tensão pré-falta atrás da reatância transitória X’ do motor
G	Gap entre os condutores (mm)
H	Altura do painel (“ <i>Height</i> ”)(mm)
K	Coefficiente para configurações dos gabinetes/painéis
Largura	Largura real do gabinete (mm)
M	Múltiplo da corrente de “tape” (“pick up”)
V	Tensão do sistema (kV)
W	Largura do painel (“ <i>Width</i> ”)(mm)
n	Constante dependente da curva
r	Distância do centro da fonte ao objeto (cm)
$\Delta t$	Intervalo de amostragem (s)

# Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	23
1.1	Relevância do tema e objetivos da dissertação .....	23
1.2	Estrutura da dissertação.....	24
2	ARCO ELÉTRICO .....	26
2.1	Considerações iniciais .....	26
2.2	Considerações sobre o arco elétrico .....	26
2.2.1	Definição e natureza do arco elétrico .....	26
2.2.2	Natureza direcional e composição do arco elétrico.....	28
2.2.3	Arco elétrico como fonte de calor .....	29
2.4	Causas da ocorrência do arco elétrico .....	31
2.5	Estatísticas de acidentes .....	31
2.5.1	Dados estatísticos dos acidentes de origem elétrica nos Estados Unidos.....	31
2.5.2	Dados estatísticos dos acidentes de origem elétrica no Brasil .....	33
2.6	Considerações finais.....	35
3	MÉTODO DE CÁLCULO IEEE STD 1584 - 2002 .....	36
3.1	Considerações iniciais .....	36
3.2	Principais Etapas .....	36
3.2.1	Coletar os dados do sistema e da instalação.....	36
3.2.2	Determinar os modos de operação do sistema .....	37
3.2.3	Determinar as correntes de falta franca.....	37
3.2.4	Determinar as correntes de falta de arco .....	37
3.2.5	Obter as características do dispositivo de proteção e a duração dos arcos.....	38
3.2.6	Documentar as tensões do sistema e as classes de equipamento.....	38
3.2.7	Selecionar as distâncias de trabalho .....	38
3.2.8	Determinar a energia incidente.....	39
3.2.9	Determinar o limite de proteção contra arco elétrico .....	39
3.3	Cálculo da energia incidente .....	39
3.3.1	Intervalos do modelo .....	40
3.3.2	Cálculo da corrente de arco .....	40
3.3.3	Cálculo da energia incidente .....	41

3.3.4	Limite de proteção contra arco-elétrico.....	42
3.4	Críticas ao Guia IEEE 1584 – 2002 .....	43
3.5	Consideração final.....	44
4	MÉTODO DE CÁLCULO IEEE STD 1584 – 2018 .....	45
4.1	Considerações iniciais .....	45
4.2	Cálculo da energia incidente .....	45
4.2.1	Intervalos do modelo .....	45
4.2.2	Cálculo da corrente de arco .....	48
4.2.3	Correção do gabinete.....	50
4.2.4	Cálculo da Energia Incidente .....	53
4.2.5	Cálculo do Limite de Arco Elétrico .....	55
4.2.6	Variação da corrente de arco .....	58
4.3	Análise comparativa entre IEEE STD 1584 – 2002 e 2018 .....	59
4.3.1	Mudanças na aplicação da norma IEEE STD 1584.....	59
4.3.2	Principais passos na aplicação dos guias IEEE STD 1584 2002 e 2018.....	59
4.4	Influências da configuração dos eletrodos nos resultados.....	62
4.5	Consideração final.....	64
5	MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DO ARCO ELÉTRICO E NFPA-70E.....	66
5.1	Considerações iniciais .....	66
5.2	Medidas de mitigação passivas .....	66
5.3	Medidas de mitigação ativas .....	67
5.4	Métodos de mitigação .....	67
5.4.1	Atuação nos ajustes dos dispositivos de proteção .....	68
5.4.2	Intertravamento seletivo de zona (ZSI) .....	68
5.4.3	Relés diferenciais .....	69
5.4.4	Relés de Arco (AFD).....	70
5.4.5	Configuração de Ajuste para Manutenção .....	74
5.4.6	Afastamento das pessoas .....	76
5.4.7	Práticas de segurança .....	76
5.5	Equipamentos resistentes a arco.....	77
5.5.1	Classe de continuidade de serviço (LSC – <i>Loss of Service Continuity</i> ).....	77
5.5.2	Classe de compartimentação (PM).....	77

5.5.3	Classe de arco interno .....	78
5.5.4	Classe de acessibilidade do painel.....	78
5.6	Considerações sobre a Norma NFPA-70E .....	78
5.6.1	Classificação da categoria de risco/perigo conforme “NFPA 70E – 2012” (NFPA 70E, 2012) .....	79
5.6.2	Distâncias limites de aproximação conforme NFPA 70E – 2012 .....	81
5.6.3	Rotulagem de equipamentos conforme “NFPA 70E – 2012” (NFPA 70E, 2012).....	83
5.7	Considerações finais.....	84
6	PROPOSTA DE CÁLCULO DO ARCO ELÉTRICO CONSIDERANDO DECAIMENTO AC	85
6.1	Considerações iniciais .....	85
6.2	Métodos de cálculo para corrente de curto-circuito e arco elétrico.....	85
6.2.1	Método 1 – Não considera o Decaimento AC.....	85
6.2.2	Método 2 – Considera o Decaimento AC de Forma Simplificada .....	86
6.2.3	Método 3 – Considera o Decaimento AC de Forma Detalhada .....	87
6.3	Proposta Cálculo do Arco Elétrico considerando o Decaimento AC.....	88
6.3.1	Obtenção das Correntes de Decaimento de Geradores e Motores.....	89
6.3.2	Obtenção do tempo de atuação da proteção .....	91
6.3.3	Obtenção da corrente em cada intervalo .....	94
6.3.4	Cálculo da energia liberada em cada segmento e energia incidente total .....	94
6.4	Consideração final.....	101
7	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE CÁLCULO DO ARCO ELÉTRICO ..	102
7.1	Considerações iniciais .....	102
7.2	Caso teste .....	102
7.3	Software Utilizado.....	104
7.3.1	Procedimentos utilizados.....	104
7.3.2	Premissas Adotadas pelo Software PTW .....	105
7.4	Resultados Obtidos - Método IEEE Std 1584 – 2002 utilizando o <i>software</i> PTW .....	106
7.5	Resultados dos cálculos segundo Método IEEE Std 1584 – 2018 utilizando o <i>software</i> PTW .....	106
7.6	Resultados dos cálculos segundo Método IEEE STD 1584 – 2002 utilizando o programa desenvolvido em Matlab e considerando o decaimento AC .....	107
7.7	Resultados dos cálculos segundo Método IEEE STD 1584 – 2018 utilizando o programa desenvolvido em Matlab e considerando o decaimento AC .....	117

7.8	Comparações entre os cálculos da energia incidente para os quatro metodologias avaliadas	125
8	CONCLUSÕES.....	128
8.1	Considerações Finais.....	128
8.2	Propostas de futuros trabalhos.....	130
9	REFERÊNCIAS .....	131
10	ANEXOS.....	133
10.1	COEFICIENTES PARA AS EQUAÇÕES DO GUIA IEEE 1584 – 2018.....	133
10.2	DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO - CASOS TESTE.....	136
10.3	VALORES PARCIAIS DAS CORRENTES E ENERGIAS INCIDENTES GERADOS PELOS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS EM MATLAB.....	139
10.3.1	Parâmetros parciais do barramento QDG-MT 13,8 kV – Equações Guia IEEE 1584 – 2002 .....	139
10.3.2	Parâmetros parciais do barramento CCM-MT 4,16 kV – Equações Guia IEEE 1584 – 2002 .....	140
10.3.3	Parâmetros parciais do barramento QDG-BT 440 V – Equações Guia IEEE 1584 – 2002	141
10.3.4	Parâmetros parciais do barramento CCM-BT 440 V – Equações Guia IEEE 1584 – 2002 .....	141
10.3.5	Parâmetros parciais do barramento QDG-MT 13,8 kV – Equações Guia IEEE 1584 – 2018	142
10.3.6	Parâmetros parciais do barramento CCM-MT 4,16 kV – Equações Guia IEEE 1584 – 2018	143
10.3.7	Parâmetros parciais do barramento QDG-BT 440 V – Equações Guia IEEE 1584 – 2018	143
10.3.8	Parâmetros parciais do barramento CCM-BT 440 V – Equações Guia IEEE 1584 – 2018	144
10.4	CURVAS DE SELETIVIDADE – TCC's .....	145
10.4.1	TCC – DJ CCM BT.....	145
10.4.2	TCC – DJ Sec TR3.....	146
10.4.3	TCC – R Sec TR2.....	147
10.4.4	TCC – R Sec TR1.....	148
10.4.5	TCC – R GER .....	149

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Relevância do tema e objetivos da dissertação

A operação e manutenção, por trabalhadores, de instalações elétricas industriais são realizadas com iminente perigo/risco de exposição ao arco elétrico e seus efeitos. A exposição e possíveis lesões de trabalhadores, somado as avarias aos equipamentos, tornam necessárias análises e atenção especial ao fenômeno, além de medidas de mitigação do arco elétrico.

Anualmente, trabalhadores são lesionados ou acabam morrendo devido a acidentes elétricos. Choque elétrico e queimadura devido a contato direto ou indireto com condutores energizados ou circuitos expostos são as causas de acidentes de origem elétrica aos trabalhadores dos diversos setores da economia. As queimaduras devido a acidentes com arco elétrico nem sempre são contabilizadas individualmente, mas fazem parte das estatísticas de acidentes com origem elétrica disponibilizada por órgãos de diversos países.

A lesão causada pela exposição do trabalhador ao acidente com arco elétrico traz desde pequenas lesões, devido a queimaduras pelo contato com plasma do arco elétrico ou impacto sofrido pelas ondas de pressão e produtos ejetados na ocorrência do acidente, até afastamento temporário para recuperação das lesões sofridas ou no pior caso a morte.

Neste contexto, tomando como base os guias IEEE Std 1584 – 2002 “*Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*” (IEEE Std 1584, 2002) e sua revisão IEEE Std 1584 – 2018 (IEEE Std 1584, 2018) o presente trabalho tem como objetivo, por meio de um estudo de caso, comparar os resultados obtidos utilizando os métodos de análise de arco elétrico dos guias. Uma terceira análise, do caso em estudo, é realizada considerando a influência do decremento AC das contribuições das correntes de curto-circuito dos motores e geradores síncronos. Os resultados das três análises são comparados e é verificado se existe divergência na definição da categoria de perigo/risco resultante dos métodos, e consequentemente, alterações na determinação dos Equipamentos de Proteção Individual (EPI).

O estudo foi dirigido, apresentando inicialmente os métodos de cálculos para familiarização com as metodologias de cálculo de cada guia. Os parâmetros necessários para a realização dos cálculos são apresentados e as considerações pertinentes são feitas no decorrer do trabalho.

Vale ressaltar que, tanto os guias supracitadas, quanto trabalhos realizados e publicados a respeito do acidente com arco elétrico apresentam metodologias para cálculos da energia incidente e limites de aproximação segura. Destarte, a apresentação e o entendimento desses trabalhos, bem como apresentação das metodologias de cálculo numa única obra, contemplado por estudo de caso comparativo entre os métodos, revelam a singularidade deste trabalho como guia de aplicação na área dos estudos de arco elétrico, sobretudo nos sistemas industriais. Entende-se que esta é a principal contribuição oferecida por este trabalho de mestrado, por:

- Reunir em um único trabalho uma vasta quantidade de informações dispersas em inúmeras normas e publicações;
- Apresentar os descritivos e as particularidades de cada guia, visando facilitar o estudo e entendimento dos vários aspectos de cada uma delas;
- Apresentar um compêndio que possa ser utilizado como guia de consulta para os profissionais da área.

## **1.2 Estrutura da dissertação**

Para serem atingidos os objetivos propostos, a dissertação está estruturada em 9 capítulos e 4 anexos.

No segundo capítulo são tratados os aspectos relacionados ao arco elétrico. São apresentadas as definições pertinentes e a sua natureza, abordando como o arco elétrico é gerado e como ele se apresenta aos trabalhadores expostos no momento do acidente.

O terceiro capítulo aborda o método de cálculo da energia incidente e limite de arco elétrico de acordo com o guia IEEE STD 1584 - 2002. No desenvolvimento do capítulo são descritas as etapas a serem seguidas para cálculo dos parâmetros relacionados ao arco elétrico e por fim é apresentado o modelo segundo o guia. É acrescentada uma seção extra neste capítulo para tratar das críticas recebidas a norma e seus métodos de cálculo.

O quarto capítulo, assim como o terceiro, traz as etapas a serem seguidas para realizar os cálculos dos parâmetros do arco elétrico, mas seguindo o guia IEEE STD 1584 - 2018 que substituiu o guia IEEE STD 1584 - 2002. Os métodos de cálculo dos parâmetros relacionados ao arco elétrico são apresentados e são apresentadas as considerações necessárias.

O quinto capítulo apresenta os métodos de mitigação do arco elétrico e destaca as medidas a serem colocadas em prática para minimizar as ocorrências e os efeitos dos

acidentes com arco elétrico em ambientes industriais nos trabalhadores e nos equipamentos. São destacadas medidas passivas e ativas que podem ser implementadas no ambiente industrial. Considerações sobre a categoria de risco/perigo e as vestimentas adequadas são apresentadas conforme NFPA 70E.

O sexto capítulo apresenta três metodologias para cálculo do arco elétrico. A primeira não considera o decaimento AC da corrente de curto-circuito e mantém as contribuições de motores e geradores fixas, isto implica em resultados mais conservadores. A segunda metodologia permite considerar uma redução no tempo de contribuição da corrente de curto-circuito de motores e geradores, e também da intensidade da corrente de curto-circuito de geradores para melhor avaliar o arco elétrico. A terceira metodologia faz uso de equações que consideram o decaimento AC das correntes de curto-circuito de motores e geradores. Esta última metodologia é a que permite melhor precisão nos cálculos da energia incidente na ocorrência do arco elétrico, fornecendo valores de energia mais próximos do caso real e permitindo a seleção do equipamento de proteção adequado para as atividades de operação e manutenção dos sistemas.

O sétimo capítulo apresenta uma análise comparativa dos resultados dos cálculos relacionados ao arco elétrico utilizando um caso teste, e tendo como abordagem a segunda e terceira metodologia apresentadas no capítulo seis para aplicação das equações dos guias IEEE STD 1584 - 2002 e 2018.

O oitavo capítulo apresenta as conclusões dos trabalhos assim como as propostas para desenvolvimento de trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas e em seguida os quatro anexos.



## **2 ARCO ELÉTRICO**

### **2.1 Considerações iniciais**

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos envolvendo o fenômeno de arco elétrico, sua natureza e as suas diferentes formas de dissipação de energia. Serão apresentadas as possíveis causas de ocorrência e os efeitos causados nos trabalhadores e nos equipamentos.

Dados estatísticos também serão apresentados para destacar a importância da prevenção de acidentes de origem elétrica. Embora menos frequente que outros tipos de ocorrências, os acidentes de origem elétrica têm grande potencial de levar os trabalhadores à morte. Os dados estatísticos apresentados incluem os acidentes e lesões causadas aos trabalhadores pelo arco elétrico.

### **2.2 Considerações sobre o arco elétrico**

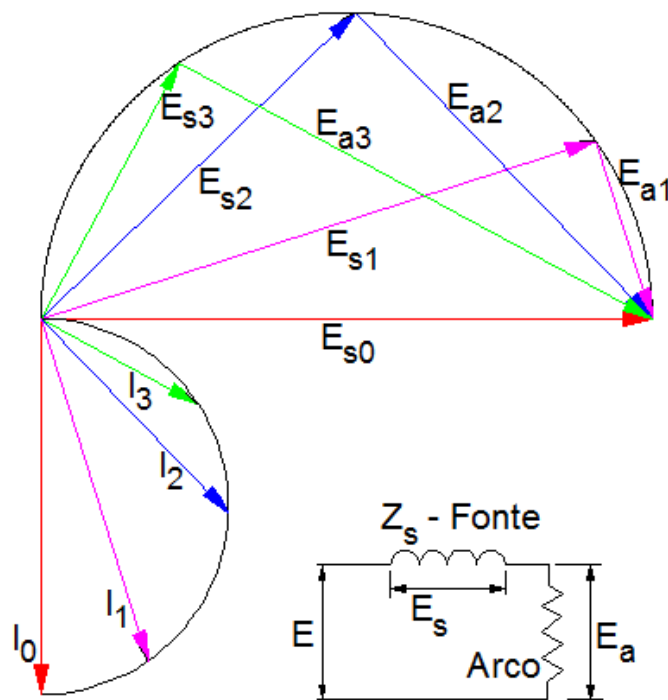
As subseções a seguir definem o arco elétrico, sua natureza e como ele se manifesta.

#### **2.2.1 Definição e natureza do arco elétrico**

O arco elétrico, de acordo com (LEE, 1982), é definido como à passagem de corrente elétrica devido ao vapor de material gerado no terminal do arco e que anteriormente era circundado por ar. Pode também ser definido como a passagem de corrente elétrica através do ar ou através de outro material não condutivo, movimentando-se em altas velocidades (QUEIROZ, SENGER, 2012). Ou ainda, como a passagem de corrente elétrica através do ar ionizado e do vapor do material terminal do arco (DAS, 2012).

O arco elétrico possui natureza resistiva e que lhe confere um fator de potência unitário. De acordo com (DAS, 2012) a queda de tensão de um arco elétrico ao ar livre é da ordem de 5 – 10 V/cm enquanto em um longo condutor sólido ou trançado é da ordem de 0,016 – 0,033 V/cm. Ainda segundo (DAS, 2012) devido à queda de tensão ser elevada, sistemas de baixa tensão tem parte considerável de sua tensão associada ao arco.

O trabalho de (LEE, 1982) apresenta um diagrama vetorial onde são representados os vetores de queda de tensão de alimentação ( $E_s$ ) e queda de tensão no arco ( $E_a$ ), conforme figura 2.1. A natureza indutiva do sistema de alimentação e resistiva do arco elétrico faz com que estes vetores estejam em quadratura. Os índices 0, 1, 2 e 3 retratam 4 condições de arco, sendo 0 uma falta franca, e os índices 1, 2 e 3 com comprimentos de arco curto, moderado e longo respectivamente. A corrente total é representada no diagrama pelos vetores  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ . É importante observar que como o arco é de natureza resistiva o vetor de queda de tensão no arco está em fase com a corrente total. Outro ponto importante é a diminuição da tensão disponível ao sistema de alimentação ( $E_s$ ) com o aumento do comprimento do arco, e consequente aumento na queda de tensão do arco ( $E_a$ ).

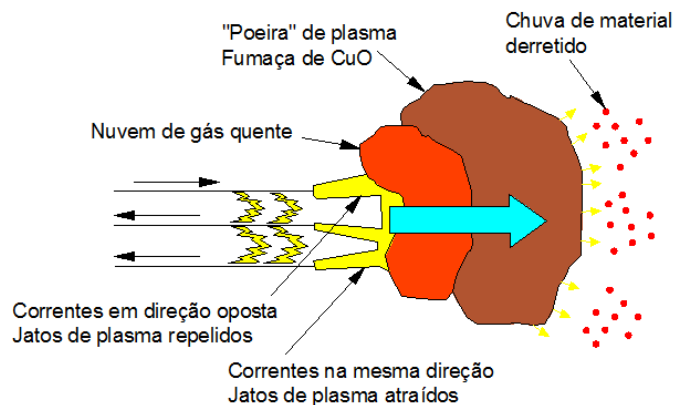


**Figura 2. 1- Diagrama vetorial de tensões e correntes**  
**Fonte: Adaptado LEE (2021)**

De acordo com (LEE, 1982) a condição de máxima potência do arco ocorre quando a queda de tensão do arco é igual à queda de tensão do sistema, representado na figura 2.1 como a condição 2. Nesta condição, a queda de tensão do arco é de 70,7% da tensão de alimentação e 70,7% do nível de falta franca, como se trata de um fenômeno de natureza resistiva, a potência máxima do arco é  $0,707^2$  ou 0,5 vezes a capacidade máxima da falta franca (kVA) do sistema naquele ponto.

### 2.2.2 Natureza direcional e composição do arco elétrico

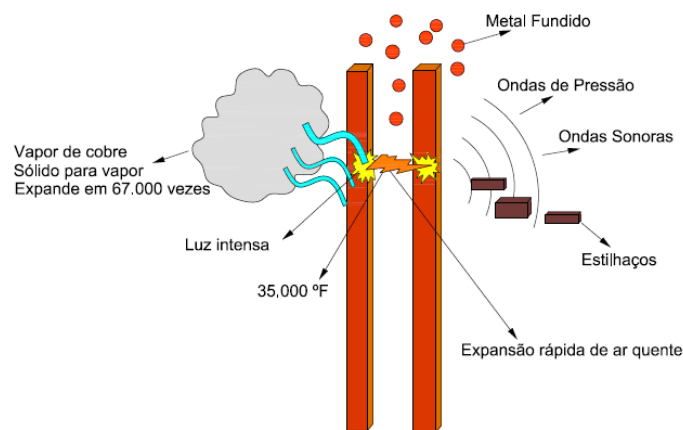
De acordo com (QUEIROZ, SENGER, 2012), a influência da convecção, dos jatos de plasmas e das forças eletromagnéticas fazem com que o comportamento de um arco elétrico em um sistema trifásico seja considerado como caótico. Para exemplificar, a condição retratada na figura 2.2, extraída e adaptada de (QUEIROZ, SENGER, 2012), demonstra a natureza direcional do arco elétrico, porém, sem considerar o comportamento caótico.



**Figura 2. 2 - A natureza direcional de um arco elétrico sem o comportamento caótico**  
**Fonte: Queiroz e Senger (2021)**

A nuvem de plasma é direcionada para fora e alimentada pelos jatos de plasma. Estes jatos são criados devido às forças magnéticas de atração e repulsão originadas pelas correntes trifásicas de alimentação do sistema (QUEIROZ, SENGER, 2012). A energia conduzida pelo plasma é limitada, conforme visto anteriormente pela impedância do arco e pela impedância do sistema em geral, e conduzirá tanta energia quanto estiver disponível. Queima de barramentos vaporizando o cobre ou o alumínio são efeitos dessa enorme descarga de energia. O resultado é uma explosão de fogo, possivelmente levando a ferimentos graves e fatais (VERSTRATEN, LUCHTENBERG, 2013).

Na ocorrência de um acidente envolvendo arco elétrico, a produção de ondas de pressão, ondas sonoras, luz intensa, projeção de estilhaços e material fundido são mecanismos de transferência de energia de um arco elétrico conforme (VERSTRATEN, LUCHTENBERG, 2013) e apresentado na figura 2.3.



**Figura 2. 3 - Mecanismos de transferência de energia na ocorrência de um acidente com arco elétrico**  
**Fonte: Adaptado Verstraten e Luchtenberg (2013)**

### 2.2.3 Arco elétrico como fonte de calor

As propriedades do arco elétrico são aplicadas em muitos processos industriais que fazem uso das altas temperaturas atingidas por esse fenômeno. Temperaturas da ordem de 20.000 K para os terminais e cerca 13.000 K para a parte central do arco são relatadas (LEE, 1982).

Sabe-se que a transferência de calor é uma função da diferença entre as quartas potências das temperaturas absolutas e a partir do objeto de maior temperatura (superfície emissora) para o de menor temperatura (superfície receptora) conforme equação (2.1) (LEE, 1982).

$$h = C * 3,68 * (T_e^4 - T_a^4) * 10^{-11} \quad (2.1)$$

Onde:

$h$  – transferência de calor ( $W/in^2$ ) ou ( $W/6,45 * cm^2$ );

$C$  – coeficiente de absorção da superfície absorvente;

$T_e$  – temperatura absoluta da superfície emissora (K); e

$T_a$  – temperatura absoluta da superfície absorvente (K).

O trabalho de LEE separa a relação (2.1) em dois elementos e considera (1) calor total que emana da fonte e (2) a proporção de calor absorvido pela área unitária do objeto absorvente. As equações (2.2) e (2.3) retratam o calor gerado por uma fonte por unidade de área e o calor recebido por um objeto por unidade de área.

$$h = 3,68 * T_e^4 * 10^{-11} \quad (W/in^2) \quad (2.2a)$$

$$h = 0,571 * T_e^4 * 10^{-11} \text{ (W/cm}^2\text{)} \quad (2.2b)$$

$$Q_0 = \frac{Q_s * A_s}{4 * \pi * r^2} * A_0 \text{ (W)} \quad (2.3)$$

Onde:

$h$  – transferência de calor (W/in<sup>2</sup>) ou (W/6,45\*cm<sup>2</sup>);

$Q_s$  – calor emitido pela fonte, por unidade de área;

$A_s$  – área total da superfície da fonte;

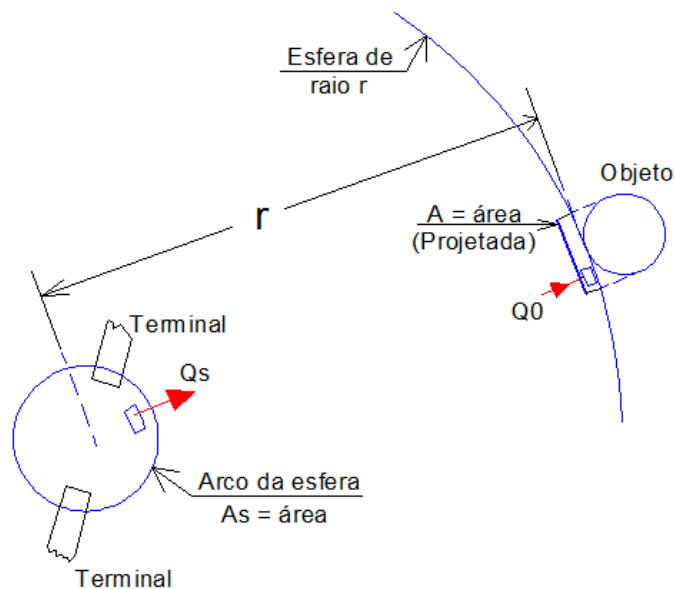
$r$  – distância do centro da fonte ao objeto;

$A_0$  – projeção da área de superfície do objeto em um plano normal à direção da fonte ao objeto; e

$Q_0$  – calor absorvido pela superfície projetada do objeto.

Um entendimento melhor do que foi exposto é conseguido analisando-se a Figura 2.4.

As temperaturas nos terminais metálicos dos arcos elétricos são relatadas em (DAS, 2012) e (LEE, 1982) com temperaturas da ordem de 20.000 K podendo atingir em tipos especiais de arco até 50.000 K. A parte intermediária (plasma) do arco pode atingir 13.000 K. Estas temperaturas só são superadas na terra por laser que pode atingir cerca de 100.000 K.



**Figura 2. 4 - Ilustração da fonte de arco e o objeto receptor de calor**  
**Fonte: Adaptado Lee (1982)**

## 2.4 Causas da ocorrência do arco elétrico

O arco elétrico pode surgir como uma descarga entre um ponto energizado e o terra ou entre dois pontos energizados, devido ao rompimento do dielétrico entre eles (MARDEGAN, PARISE, 2012). As causas que levam a falta por arco elétrico são expostas no trabalho de (VERSTRATEN, LUCHTENBERG, 2013) sendo elas:

- Fator humano: segundo especialistas 70% dos acidentes com arco elétrico na Europa ocorrem durante ou após intervenções no sistema elétrico, como por exemplo em trabalhos de manutenção (toque de sonda de teste na superfície errada, ferramentas esquecidas, etc;
- Falhas do isolamento: esses acidentes ocorrem devido à instalação inadequada, manutenção insuficiente, umidade, animais, etc;
- Existência de vazios no isolamento; e
- Presença de poeira, contaminação ou umidade nas superfícies isolantes.

## 2.5 Estatísticas de acidentes

Os acidentes de origem elétrica estão presentes nos diversos setores da economia e afetam a vida de trabalhadores que atuam direta e indiretamente com a eletricidade. As estatísticas de acidentes envolvendo eletricidade são apresentadas por organizações que, ao coletar e analisar os dados os disponibilizam para que representantes das indústrias, instituições governamentais e qualquer organização em que seus trabalhadores estejam sujeitos ao risco.

Na sequência, são apresentados dados sobre acidentes ocupacionais envolvendo eletricidade nos Estados Unidos e no Brasil.

### 2.5.1 Dados estatísticos dos acidentes de origem elétrica nos Estados Unidos

Os dados sobre as lesões elétricas ocupacionais nos Estados Unidos da América, no período de 2003 a 2009, são coletados e analisados pela *Electrical Safety Foundation International* (ESFI) e apresentadas no trabalho (CAWLEY, BRENNER, 2013) com objetivo de fornecer ao corpo técnico das indústrias, informações para tomadas de decisão sobre a segurança de seus funcionários e onde realizar a alocação dos recursos disponíveis para minimização dos problemas. Tais informações no trabalho foram compiladas pela ESFI, mas

os dados são disponibilizados pelo *U.S. Bureau of Labor Statistics* (BLS) e o *U.S. Census Bureau*.

Taxas de lesões elétricas, de acordo com (CAWLEY, BRENNER, 2013), são calculadas conforme a equação (2.4) e permitem normalizar os dados de exposição a um perigo e comparar os diferentes grupos e setores ocupacionais.

$$\left( \frac{\text{Incidentes}}{\text{Trabalhadores}} \right) \times \text{Multiplicador} \quad (2.4)$$

Onde:

*Incidentes* : Total de acidentes elétricos fatais e não fatais para um determinado grupo;

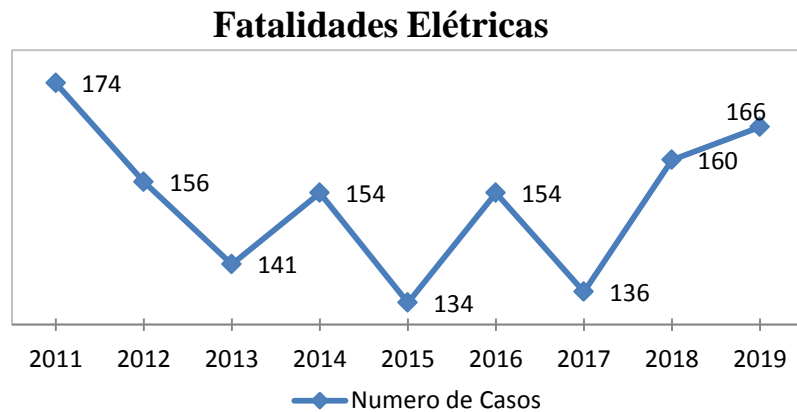
*Trabalhadores* : Número de trabalhadores que são membros do grupo; e

*Multiplicador* : 100.000 para lesões fatais ou 10.000 para lesões não-fatais.

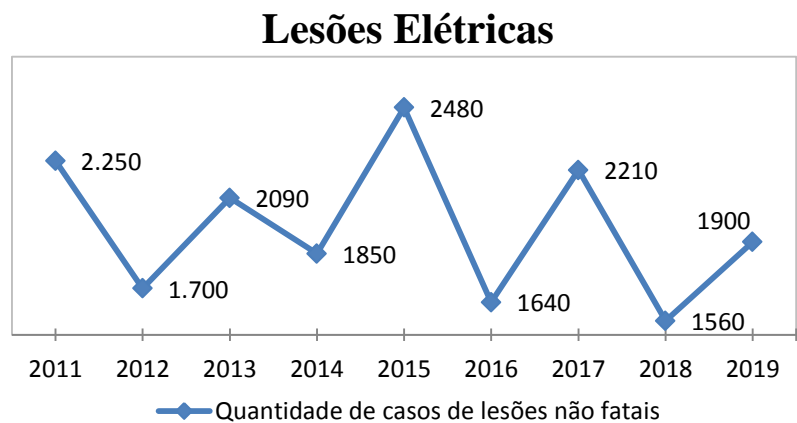
Conforme apresentado em (CAWLEY, BRENNER, 2013), os acidentes de origem elétrica, embora em menor quantidade, tem maior potencial em ocasionar uma fatalidade que outros tipos de acidentes ocupacionais. No trabalho (CAWLEY, BRENNER, 2013), são comparados os acidentes de origem elétrica com os acidentes envolvendo quedas. Enquanto no período de 2003 a 2009 ocorreram 20.033 lesões elétricas com 1.573 mortes, no mesmo período ocorreram 1.718.219 acidentes por queda e 5.279 mortes, o que correspondem a 1 morte a cada 13 acidentes elétricos e 1 morte a cada 325 acidentes por queda, demonstrando o potencial de fatalidade em acidentes de origem elétrica.

O trabalho (ESFI, 2019) apresenta os dados dos acidentes de origem elétrica, fatais e não fatais relativos ao período de 2011 a 2019 conforme figura 2.5.

Observa-se que os acidentes fatais de origem elétrica tiveram um aumento nos anos de 2018 e 2019, sendo superados somente pelo número de acidentes ocorridos em 2011, totalizando em 2019 o número de 166 fatalidades. A figura 2.6 retrata as lesões elétricas não fatais, mas que envolveram dias de afastamento de trabalhadores e totalizaram 1.900 casos em 2019.



**Figura 2. 5 - Fatalidades elétricas segundo dados do (ESFI, 2019)**  
**Fonte: ESFI (2019)**



**Figura 2. 6 - Dados sobre lesões elétricas segundo o (ESFI, 2019)**  
**Fonte: ESFI (2019)**

## 2.5.2 Dados estatísticos dos acidentes de origem elétrica no Brasil

No Brasil, os dados relacionados aos acidentes de origem elétrica são apurados e disponibilizados pela Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade (ABRACOPEL). A ABRACOPEL disponibiliza em seu Anuário Estatístico as informações relacionadas aos acidentes de origem elétrica contabilizando os dados de mortes por choque elétrico e os incêndios provocados por sobrecarga.

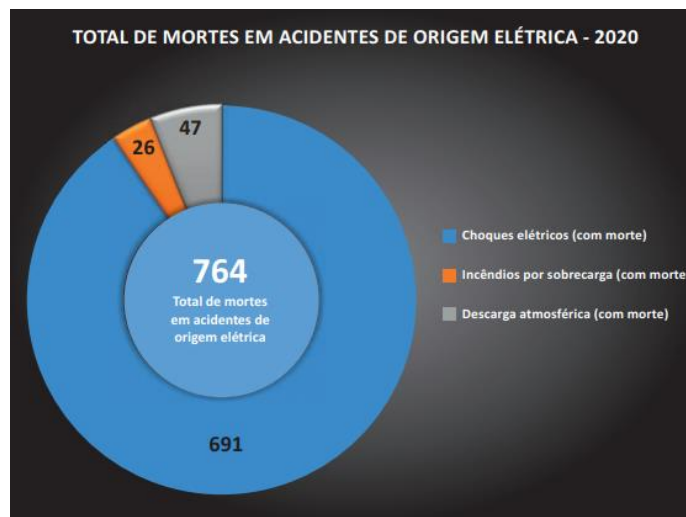
A coleta de dados realizada para elaboração de seu anuário estatístico é baseada em informações eletrônicas disponíveis nos meios de comunicação e informações de profissionais técnicos do setor elétrico informando os acidentes em suas regiões. Essas informações são analisadas por uma equipe treinada e, uma vez verificada a autenticidade, são incorporadas à base de dados.



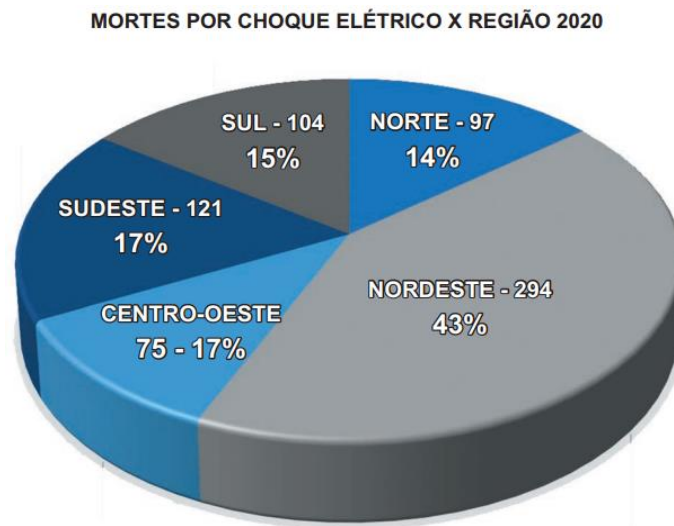
Os dados de morte por acidentes de origem elétrica, contabilizados no ano de 2020, somam 764 mortes, sendo 691 causados por choques elétricos, 47 por descargas atmosféricas e 26 por incêndios devido a sobrecargas, conforme figura 2.7. De acordo com (ABRACOPEL, 2021) as mortes de profissionais ou pessoas leigas causadas por choque elétrico são resultados de negligência, desconhecimento dos riscos e até mesmo descaso ao se aventurarem em trabalhos em eletricidade.

Os dados referentes às mortes de acordo com a figura 2.8 mostram que a região nordeste é a que mais apresenta casos, sendo responsável por quase metade dos acidentes (43%). De acordo com o anuário estatístico da ABRACOPEL (ABRACOPEL, 2021) um dos motivos pelo alto índice de acidentes na região nordeste é a falta de técnica ou normatização para construção de imóveis e consequente realização da instalação elétrica.

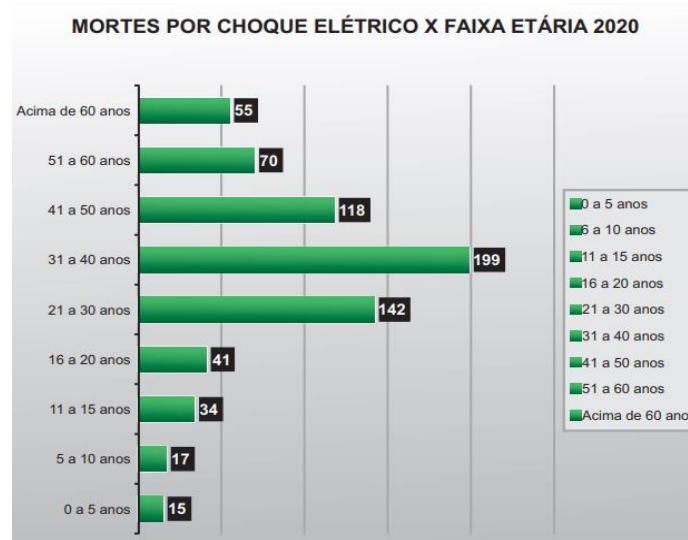
Um retrato das mortes causadas por acidentes elétricos por faixa etária é mostrado na figura 2.9. O maior índice de acidentes corresponde à faixa etária de 31 a 40 anos com 199 mortes, seguido pelas faixas etárias de 21 a 30 anos com 142 mortes e 41 a 50 anos com 118 mortes. Estas faixas correspondem a classe trabalhadora que muitas vezes não possui a qualificação adequada para realizar os trabalhos ligados a energia elétrica, ou mesmo os que possuem podem ser negligentes e não tomam as medidas adequadas para minimizar o risco.



**Figura 2. 7 - Dados sobre mortes no ano de 2020 no Brasil**  
**Fonte: ABRACOPEL (2021)**



**Figura 2. 8 - Dados sobre morte por choque elétrico por região**  
 Fonte: ABRACOPEL (2021)



**Figura 2. 9 - Dados de morte por choque elétrico em função da faixa etária**  
 Fonte: ABRACOPEL (2021)

## 2.6 Considerações finais

Este capítulo apresentou o fenômeno do arco elétrico e suas características, como a natureza direcional e a composição do arco elétrico, além dos efeitos aos quais trabalhadores estão expostos na ocorrência de um acidente com arco elétrico.

Foram também apresentadas as estatísticas de acidentes envolvendo arco elétrico nos Estados Unidos e no Brasil. Os dados coletados demonstram a letalidade por acidentes de origem elétrica quando comparados com outros acidentes ocupacionais, evidenciando assim a necessidade de políticas voltadas para segurança de trabalhadores em serviços de manutenção e operação dos sistemas elétricos.

## **3 MÉTODO DE CÁLCULO IEEE STD 1584 - 2002**

### **3.1 Considerações iniciais**

Este capítulo tem como objetivo principal apresentar a metodologia de cálculo da corrente de arco, energia incidente e distância segura de aproximação contra arco elétrico aos quais trabalhadores podem ser expostos quando da realização de manobras de operação e manutenção em sistemas trifásicos AC segundo as prescrições do guia IEEE Std 1584-2002.

Os procedimentos abrangem os cálculos da corrente de arco, energia incidente e distâncias seguras de aproximação contra arco elétrico aplicados a sistemas trifásicos AC. O estudo do risco de arco elétrico pode ser considerado um complemento dos estudos de curto-circuito e seletividade e analisa para cada barramento do sistema elétrico industrial qual energia os trabalhadores estão sujeitos, e quais medidas de proteção devem ser tomadas.

### **3.2 Principais Etapas**

As etapas a serem seguidas conforme recomenda o guia IEEE Std 1584 – 2002, são descritas no decorrer deste capítulo proporcionando um entendimento claro do procedimento proposto.

#### **3.2.1 Coletar os dados do sistema e da instalação**

No estudo de curto-circuito se faz um levantamento detalhado dos dados dos equipamentos do sistema elétrico visando o estudo de arco elétrico. Os dados requeridos para o estudo de curto-circuito são mostrados no anexo A do guia IEEE Std 1584 – 2002. Além dos dados de curto-circuito, também é necessário obter os tempos de operação dos dispositivos de proteção de sobrecorrente, normalmente obtidos a partir do estudo de seletividade.

Diagramas unifilares atualizados e completos devem estar disponíveis para os estudos, caso contrário, um levantamento de campo minucioso do sistema elétrico deve ser realizado e de modo a atualizar a documentação. Conforme mencionado do guia IEEE Std 1584 – 2002 a coleta de dados requer o maior esforço das equipes e pode ser minimizado com ajuda dos

trabalhadores locais que estão familiarizados com o *layout* dos equipamentos e o local onde estão instalados.

### **3.2.2 Determinar os modos de operação do sistema**

A configuração operacional do sistema é de fundamental importância para as análises a serem realizadas e o guia IEEE Std 1584 – 2002 prescreve exemplos de modos de operação que fuja de um modo de operação normal, como no caso de um sistema radial simples. Alguns modos de operação prescritos pela norma são:

- Um ou mais alimentadores da concessionária em serviço;
- Disjuntor de barramento secundário da subestação de interface de serviço público aberto ou fechado;
- Subestação unitária com um ou dois alimentadores primários.
- Subestação unitária com dois transformadores com disjuntor de interligação abertos ou fechados;
- Centro de controle de motores (CCM) com um ou dois alimentadores, um ou ambos energizados.
- Geradores funcionando em paralelo com a rede elétrica ou em *standby by*.

### **3.2.3 Determinar as correntes de falta franca**

As correntes de faltas francas devem ser calculadas preferencialmente utilizando softwares adequados, como por exemplo, o software PTW - *Power Tools for Windows* (SKM, 2019).

### **3.2.4 Determinar as correntes de falta de arco**

Conforme recomenda o guia IEEE Std 1584 – 2002 ao identificar o ponto de interesse, a corrente de arco total juntamente com a parcela dessa corrente que passa pelo primeiro dispositivo de proteção a montante devem ser calculados. Ao ser realizado o cálculo da corrente de falta franca se obtém um dos parâmetros para determinação da corrente de arco, juntamente com outros parâmetros que serão mencionados em etapas posteriores.

### 3.2.5 Obter as características do dispositivo de proteção e a duração dos arcos

A corrente de arco calculada é usada para definir o tempo de operação dos dispositivos de proteção. As curvas tempo-corrente destes dispositivos devem ser analisadas e o tempo de eliminação de faltas deve ser determinado. A norma “IEEE Std 1584-2002” traz em sua seção “4.7 Etapa 5” como determinar o tempo de atuação de fusíveis e uma tabela referente aos tempos de atuação de disjuntores. No capítulo 5 da norma “IEEE Std 1584-2002” são mostradas fórmulas desenvolvidas para uso com fusíveis classe L e RK1 com limitação de corrente para calcular as energias de arco elétrico. Neste mesmo capítulo um conjunto de equações para cálculo da energia incidente e limite de arco elétrico em sistemas contendo disjuntores de baixa tensão do tipo MCCB (*Molded Case Circuit Breakers*), LVPCB (*Low-Voltage Power Circuit Breakers*) e ICCB (*Insulated Case Circuit Breakers*) são apresentados.

### 3.2.6 Documentar as tensões do sistema e as classes de equipamento

A Tabela 3.1 extraída do guia IEEE Std 1584 – 2002 define para cada classe de equipamento o *gap* típico entre os barramentos. Estes *gaps* permitem que as equações sejam aplicadas e sejam considerados os *gaps* que retratem as condições normalmente encontradas nos equipamentos.

**Tabela 3. 1 - Classes dos equipamentos e *gaps* típicos de barramentos conforme IEEE 1584 – 2002**

<b>Classes dos Equipamentos</b>	<b><i>Gaps</i> típicos de Equipamentos (mm)</b>
Painéis de 15 kV	152
Painéis de 5 kV	104
Painéis de baixa tensão	32
CCMs e painéis de baixa tensão	25
Cabos	13
Outros	Não requerido

Fonte: Adaptado de IEEE Std 1584 (2002)

### 3.2.7 Selecionar as distâncias de trabalho

A Tabela 3.2 extraída do guia IEEE Std 1584 – 2002 define as distâncias de trabalho típicas as quais os trabalhadores estão sujeitos em serviços de manutenção e operação dos equipamentos. Conforme prescreve o guia IEEE Std 1584 – 2002 a proteção contra arco elétrico se baseia no nível de energia incidente no rosto e tronco do trabalhador tomando

como base as distâncias contidas na Tabela 3.2. Ressalta-se que os ferimentos nessas áreas (rosto e tronco) tem maior potencial de fatalidade.

**Tabela 3. 2 - Classes de equipamentos e distâncias de trabalho típicas conforme IEEE 1584 – 2002**

<b>Classes dos Equipamentos</b>	<b>Distância de trabalho típica <sup>a</sup> (mm)</b>
Painéis de 15 kV	910
Painéis de 5 kV	910
Painéis de baixa tensão	610
CCMs e painéis de baixa tensão	455
Cabos	455
Outros	Deve ser determinado em campo

**Fonte: Adaptado IEEE Std 1584 (2002)**

<sup>a</sup> Distância de trabalho típica é a soma da distância entre o trabalhador que está a frente do equipamento até a fonte potencial de arco dentro do equipamento.

### **3.2.8 Determinar a energia incidente**

Com os dados dos equipamentos levantados, calculadas as correntes de falta francas e de arco, verificados os tempos de operação dos dispositivos de proteção, determinados os gaps típicos dos barramentos e distâncias de trabalho, e algum outro parâmetro exigido pelas equações do modelo que serão apresentadas em seção subsequente, pode-se fazer o cálculo da energia incidente nos pontos selecionados para realização do estudo. O uso de softwares e planilhas pode auxiliar o cálculo da energia incidente em um barramento ou um conjunto de barramentos. O guia IEEE Std 1584 – 2002 disponibiliza exemplos e instruções no Anexo B.

### **3.2.9 Determinar o limite de proteção contra arco elétrico**

O limite de proteção contra arco elétrico segundo o guia IEEE Std 1584 – 2002 consiste no *“limite de aproximação à distância de partes vivas que não são isoladas ou expostas dentro do qual uma pessoa pode receber uma queimadura de segundo grau”* (IEEE Std 1584, 2002), respeitar esta distância é essencial para garantir a proteção de pessoas que não estejam adequadamente vestidas contra o arco elétrico. A energia usada como base para o cálculo do limite de proteção contra arco elétrico é de 5,0 (J/cm<sup>2</sup>).

## **3.3 Cálculo da energia incidente**

O guia IEEE Std 1584 – 2002 estabelece em seu Capítulo 9 uma discussão sobre as considerações e condições para desenvolvimento do modelo para cálculo da energia incidente. Apresenta a gama de aplicação do modelo, um resumo das conclusões dos estudos, além de

considerar as faixas de correntes de falta francas, tensão do sistema, *gap* entre os eletrodos, tipos de aterramento, tipos de falta, tempo de extinção da falta, frequência, materiais do eletrodo e as correntes de arco.

A seguir são apresentados os passos utilizados para cálculo da corrente de arco, energia incidente e a distância limite de proteção contra arco.

### 3.3.1 Intervalos do modelo

O intervalo de aplicação das equações do modelo para cálculo da energia incidente e do limite de proteção contra arco elétrico conforme o guia IEEE Std 1584 – 2002 é:

- Faixa de tensão: 208 V a 15.000 V, trifásica;
- Frequências de 50 Hz ou 60 Hz;
- Faixa de corrente de falta franca: 700 A a 106.000 A;
- Sistemas de todos os tipos de aterramento e não aterrados;
- Invólucros de equipamentos de tamanhos geralmente disponíveis no mercado;
- *Gaps* entre condutores de 13 mm a 152 mm; e
- Falta envolvendo as três fases.

### 3.3.2 Cálculo da corrente de arco

A corrente de arco trifásica é calculada conforme o guia IEEE Std 1584 – 2002 para dois níveis de tensão (1) abaixo de 1000 V e (2) acima de 1000 V. O cálculo da corrente de arco é de fundamental importância para determinação do tempo de atuação dos dispositivos de proteção e posterior cálculo da energia incidente. A equação (3.1) é utilizada para realizar o cálculo da corrente de arco para sistemas com tensão abaixo de 1000 (V).

$$\log_{10} I_a = K + 0,662 * \log_{10} I_{bf} + 0,0966 * V + 0,000526 * G + 0,5588 * V * (\log_{10} I_{bf}) - 0,00304 * G * (\log_{10} I_{bf}) \quad (3.1)$$

Onde:

$I_a$ : é a corrente de arco (kA);

K: é - 0,153 para configurações abertas; e

é - 0,097 para configurações em caixa.

$I_{bf}$ : é a corrente de falta franca trifásica (RMS simétrica) (kA);

$V$ : é a tensão do sistema (kV);

$G$ : é o Gap entre os condutores (mm), conforme tabela 3.1 (IEEE Std 1584, 2002).

A corrente de arco trifásico para tensões acima de 1000 V deve ser calculada conforme equação (3.2).

$$\log_{10} I_a = 0,00402 + 0,983 * \log_{10} I_{bf} \quad (3.2)$$

Finalmente a corrente de arco é determinada fazendo conforme equação (3.3).

$$I_a = 10^{\log_{10} I_a} \quad (3.3)$$

Uma segunda corrente de arco é calculada com valor igual a 85% de  $I_a$ . Como mencionado na seção 9.10.4 do guia IEEE 1584 – 2002 existe uma dificuldade em prever com precisão a corrente de arco e seu cálculo é utilizado para determinar o tempo de operação dos dispositivos de proteção, logo, dependendo do valor da corrente na curva tempo-corrente dos dispositivos de proteção à energia incidente calculada é afetada. Portanto, realiza-se dois cálculos da corrente de arco e energia.

### 3.3.3 Cálculo da energia incidente

A equação para cálculo da energia incidente segundo o guia IEEE Std 1584 – 2002 é baseada em dados normalizados de tempo e possível distância do ponto de arco até o trabalhador, sendo esses valores respectivamente 0,2 segundos e 610 mm. O valor normalizado da energia incidente é dado conforme a equação (3.4).

$$\log_{10} E_n = K_1 + K_2 + 1,081 * \log_{10} I_a + 0,0011 * G \quad (3.4)$$

Onde:

$E_n$ : é a energia incidente (J/cm<sup>2</sup>) normalizada para o tempo e distância padronizada.

$K_1$ : – 0,792 para configurações abertas (sem gabinete); e

– 0,555 para configurações de caixa (equipamento fechado);

$K_2$ : 0 para sistemas não-aterrados e de alta resistência; e

– 0,113 para sistemas aterrados;

$G$ : é o espaço entre os condutores (mm), conforme tabela 3.1.



A energia normalizada é encontrada conforme (3.5).

$$E_n = 10^{\log_{10} E_n} \quad (3.5)$$

Para converter a energia incidente do seu valor normalizado para a condição real deve-se considerar a equação (3.6) (IEEE Std 1584, 2002).

$$E = 4,184 * C_f * E_n * \left(\frac{t}{0,2}\right) * \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \quad (3.6)$$

Onde:

E: é a energia incidente (J/cm<sup>2</sup>);

$C_f$ : é um fator de cálculo

1,0 para tensões acima de 1 kV;

1,5 para tensões iguais ou inferiores a 1 kV;

$E_n$ : é a energia incidente normalizada;

t: é o tempo de arco (segundos);

D: é a distância do possível ponto do arco à pessoa (mm);

x: é o expoente da distância, conforme tabela 3.3.

A tabela 3.3 foi extraída do guia IEEE Std 1584 – 2002 mostra o fator de distância x utilizado na equação (3.6) de acordo com a tensão do sistema, tipo de equipamento e *gap* entre os condutores.

**Tabela 3. 3 - Fatores de distância "x" para equipamentos conforme IEEE Std 1584 – 2002**

Tensão do Sistema (kV)	Tipo de Equipamento	Gap típico entre condutores (mm)	Fator de distância x
0,208 – 1	Ar livre	10 – 40	2,000
	Painel de Distribuição	32	1,473
	CCM e painel	25	1,641
	Cabos	13	2,000
>1 - 5	Ar livre	102	2,000
	Painel de Distribuição	13 – 102	0,973
	Cabos	13	2,000
>5 – 15	Ar livre	13 – 153	2,000
	Painel de Distribuição	153	0,973
	Cabos	13	2,000

Fonte: Adaptado IEEE Std 1584 (2002)

### 3.3.4 Limite de proteção contra arco-elétrico

O modelo derivado empiricamente para cálculo do limite de proteção contra arco elétrico é retratado conforme equação (3.7).

$$D_B = \left[ 4,184 * C_f * E_n * \left( \frac{t}{0,2} \right) * \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (3.7)$$

Onde:

$D_B$ : é a distância limite do ponto de arco (mm);

$C_f$ : é um fator de cálculo

1,0 para tensões acima de 1 kV; e

1,5 para tensões iguais ou inferiores a 1 kV;

$E_n$ : é a energia incidente normalizada;

$E_B$ : é a energia incidente em J/cm<sup>2</sup> na distância limite (fixada em 5,0 (J/cm<sup>2</sup>));

t: é o tempo (segundos);

x: é o expoente da distância da tabela 3.3 (IEEE Std 1584, 2002).

### 3.4 Críticas ao Guia IEEE 1584 – 2002

Críticas ao modelo de cálculo do guia IEEE 1584 – 2002 são feitas em “*Electric Arcing Burn Hazards*” (STOKES, SWEETING, 2006) sobre as considerações a respeito dos cálculos relacionados ao arco elétrico. De acordo com os autores a premissa utilizada no guia é que o risco de queimadura por arcos elétricos é devido ao aquecimento radioativo, sendo toda a dissipação do arco elétrico convertida em radiação. Mas o aquecimento convectivo devido à nuvem de plasma é o mais importante, e o aquecimento radioativo um componente significativo. Outro ponto abordado pelos autores é que o guia superestima o risco de exposição em alta tensão e subestima a exposição ocorrida em tensões abaixo de 1000 V.

Segundo (STOKES, SWEETING, 2006) o artigo “*The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns*” (LEE, 1982) é considerado como ponto de partida para entendimento do comportamento do arco elétrico descrito no guia IEEE 1584 – 2002. Os autores listam algumas referências importantes sobre arcos elétricos e que não são referenciados no trabalho de (LEE, 1982) e consequentemente não são levadas em consideração sobre o entendimento do arco elétrico e como tratá-lo, enfatizando que o guia IEEE 1584 – 2002 considera a proposição de Lee sobre o aquecimento radioativo ser a principal fonte de queimaduras ignorando toda literatura subsequente sobre arco elétrico.

Ainda segundo (STOKES, SWEETING, 2006) como a maior parte da energia do arco é fornecida e armazenada na nuvem de plasma, e que não é considerada no “Guia IEEE 1584

– 2002”, existe a possibilidade dos trabalhadores expostos a nuvem de plasma serem lesionados mais gravemente do que o considerado pelo “Guia IEEE 1584 – 2002”.

### **3.5 Consideração final**

Embora diversos autores, a exemplo Stokes e Sweeting, apresentem críticas com relação ao guia IEEE STD 1584 – 2002, ele foi e ainda é utilizado como referência nos cálculos dos parâmetros do arco elétrico, avaliação do nível de risco e escolha dos equipamentos de proteção dos trabalhadores, fornecendo resultados que se acatados pelos responsáveis técnicos das indústrias minimizam lesões e salvam vidas.

## **4 MÉTODO DE CÁLCULO IEEE STD 1584 – 2018**

### **4.1 Considerações iniciais**

Este capítulo tem como objetivo principal apresentar a metodologia de cálculo da corrente de arco, energia incidente e distância segura de aproximação contra arco elétrico em sistemas trifásicos AC segundo as prescrições do guia IEEE Std 1584 – 2018.

Este Guia tem como objetivo auxiliar na análise de riscos aos quais os trabalhadores estão submetidos além de definir equipamentos de proteção individual necessários.

### **4.2 Cálculo da energia incidente**

#### **4.2.1 Intervalos do modelo**

O modelo utilizado para cálculo das grandezas relacionadas ao arco elétrico é determinado empiricamente e baseado em análises estatísticas apropriadas. O modelo pode ser aplicado considerando os seguintes limites:

- Tensão fase-fase trifásica: 208 V a 15.000 V;
- Frequência: 50 Hz ou 60 Hz;
- Corrente de falta franca (RMS simétrica):
  - 208 V a 600 V: 500 A a 106.000 A;
  - 601 V a 15.000 V: 200 A a 65.000 A;
- Gaps entre condutores:
  - 208 V a 600 V: 6,35 a 76,2 mm;
  - 601 V a 15.000 V: 19,05 a 254 mm;
- Distâncias de trabalho maior ou igual a 305 mm;
- Tempo de eliminação da falta: sem limite.
- Gabinetes testados conforme características apresentadas na tabela 4.1.

Tabela 4. 1 - Dimensões dos gabinetes e classe de tensão

Tensão de Circuito Aberto (V)	Dimensões do Gabinete (H x W x D)
	Unidades SI (métricas)
600	508 mm x 508 mm x 508 mm
2700	660,4 mm x 660,4 mm x 660,4 mm
14300	914,4 mm x 914,4 mm x 914,4 mm

Fonte: Adaptado IEEE Std 1584 (2018)

Onde:

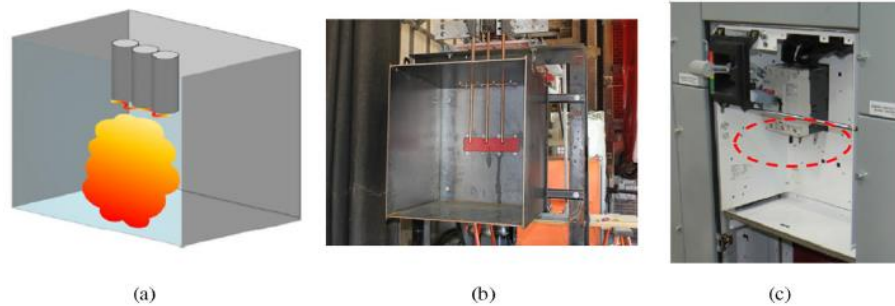
*H*: é a altura do painel (*Height*);*W*: é a largura do painel (*Width*);*D*: é a profundidade do painel (*Depth*).

- Limites da dimensão do gabinete (Estabelecidos usando os gabinetes da versão 2002)
  - Altura ou largura máxima: 1.244,6 mm;
  - Área máxima de abertura: 1,549 m<sup>2</sup>;
  - Largura mínima: a largura do gabinete deve ser maior que 4 vezes o gap entre os condutores (eletrodos;)
- Configurações dos eletrodos:

Conforme Anexo G do guia (IEEE Std 1584, 2018), o modelo considera cinco configurações de instalação de eletrodos instalados de forma vertical e horizontal em gabinetes metálicos, ou ao ar livre, com o terminal do eletrodo com ponta aberta ou terminada em barreira:

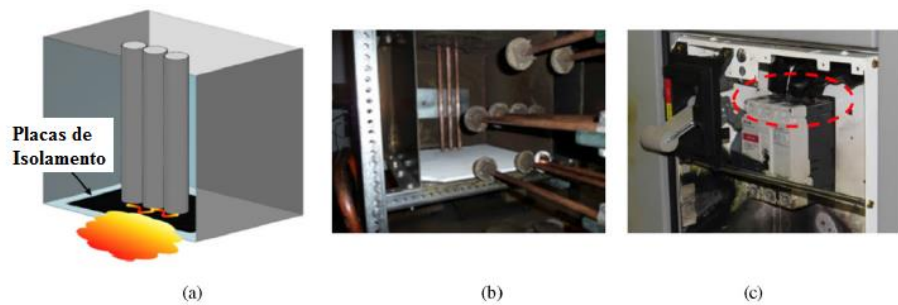
- **VCB:** *Vertical conductors/electrodes inside a metal box/enclosure* (Condutores/eletrodos verticais dentro de uma caixa/gabinete de metal);
- **VCBB:** *Vertical conductors/electrodes terminated in insulating barrier inside a metal box/enclosure* (Condutores/eletrodos verticais terminados em uma barreira isolante dentro de uma caixa/gabinete de metal);
- **VOA:** *Vertical conductors/electrodes in open air* (Condutores/eletrodos verticais ao ar livre);
- **HCB:** *Horizontal conductors/electrodes inside a metal box/enclosure* (Condutores/eletrodos horizontais dentro de uma caixa/gabinete de metal);
- **HOA:** *Horizontal conductors/electrodes inside a metal box /enclosure* (Condutores/eletrodos horizontais ao ar livre).

As figuras 4.1 a 4.5 apresentam os desenhos esquemáticos, as configurações dos eletrodos montadas em laboratório para realização dos testes, e do equipamento correspondente a cada configuração.



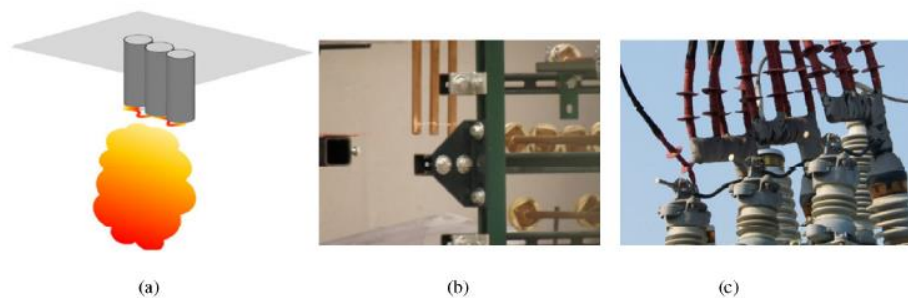
**Figura 4.1 - Configuração de teste VCB: a) Desenho esquemático, b) Configuração eletrodo laboratório e c) Equipamento correspondente**

Fonte: Adaptado Zhang, Wang e at all (2020)



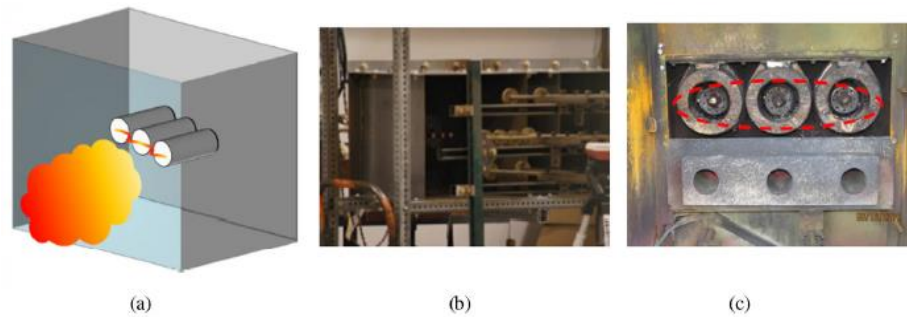
**Figura 4.2 - Configuração de teste VCBB: a) Desenho esquemático, b) Configuração eletrodo laboratório e c) Equipamento correspondente**

Fonte: Adaptado Zhang, Wang e at all (2020)

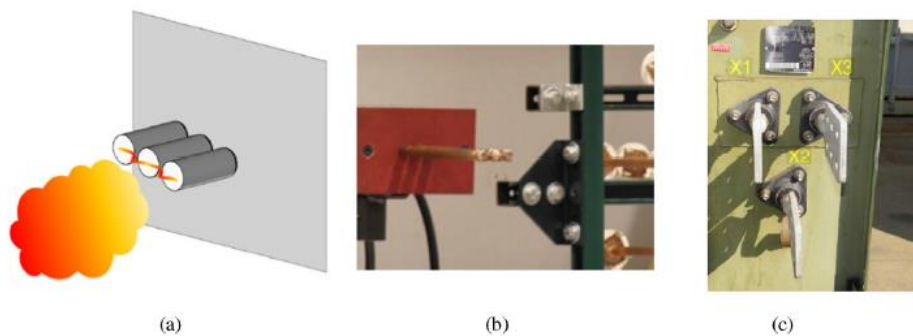


**Figura 4.3 - Configuração de teste VOA: a) Desenho esquemático, b) Configuração eletrodo laboratório e c) Equipamento correspondente**

Fonte: Adaptado Zhang, Wang e at all (2020)



**Figura 4. 4 - Configuração de teste HCB: a) Desenho esquemático, b) Configuração eletrodo laboratório e c) Equipamento correspondente**  
**Fonte: Adaptado Zhang, Wang e at all (2020)**



**Figura 4. 5 - Configuração de teste HOA: a) Desenho esquemático, b) Configuração eletrodo laboratório e c) Equipamento correspondente**  
**Fonte: Adaptado Zhang, Wang e at all (2020)**

A título de informação o guia (IEEE Std 1584, 2002) considera as configurações VCB e VOA.

## 4.2.2 Cálculo da corrente de arco

O modelo para cálculo da corrente de arco apresenta na primeira etapa equações para cálculo das correntes intermediárias em três níveis de tensão pré-estabelecidos (600, 2700 e 14.300 V) e em uma segunda etapa apresenta equações para o cálculo da corrente de arco final na tensão específica. As equações são divididas em duas faixas de tensão e utilizam coeficientes em função das configurações dos eletrodos apresentadas na seção 4.2.1 e pelo nível de tensão.

### 4.2.2.1 Tensão na faixa de: $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15.000 \text{ V}$

As correntes de arco intermediárias são calculadas conforme equação (4.1). Os coeficientes utilizados são apresentados na tabela 10.1 do Anexo 10.1, considerando as

configurações dos eletrodos citadas e os três níveis de tensão intermediários estabelecidos no guia.

$$I_{arc\_Voc} = 10^{(k_1 + k_2 * \log_{10} I_{bf} + k_3 * \log_{10} G)} * (k_4 * I_{bf}^6 + k_5 * I_{bf}^5 + k_6 * I_{bf}^4 + k_7 * I_{bf}^3 + k_8 * I_{bf}^2 + k_9 * I_{bf}^1 + k_{10}) \quad (4.1)$$

Onde:

$I_{bf}$  : é a corrente trifásica franca (valor RMS simétrico) (kA);

$I_{arc\_600}$  : é a corrente de arco RMS (kA), para  $V_{oc} = 600$  V;

$I_{arc\_2700}$  : é a corrente de arco RMS (kA), para  $V_{oc} = 2700$  V;

$I_{arc\_14300}$  : é a corrente de arco RMS (kA), para  $V_{oc} = 14.300$  V;

$G$ : é a distância entre os eletrodos (mm);

$k_1$  a  $k_{10}$ : são os coeficientes fornecidos conforme tabela 10.1 do Anexo 10.1.

Com os resultados dos valores médios intermediários da corrente de arco, conforme equação (4.1), os dados necessários para calcular os termos de interpolação da corrente de arco são obtidos conforme as equações (4.2), (4.3) e (4.4).

$$I_{arc\_1} = \frac{I_{arc\_2700} - I_{arc\_600}}{2,1} * (V_{oc} - 2,7) + I_{arc\_2700} \quad (4.2)$$

$$I_{arc\_2} = \frac{I_{arc\_14300} - I_{arc\_2700}}{11,6} * (V_{oc} - 14,3) + I_{arc\_14300} \quad (4.3)$$

$$I_{arc\_3} = \frac{I_{arc\_1} * (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{I_{arc\_2} * (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (4.4)$$

Onde:

$I_{arc\_1}$ : é o primeiro termo de interpolação da  $I_{arc}$  (kA), entre 600 V e 2700 V;

$I_{arc\_2}$ : é o segundo termo de interpolação da  $I_{arc}$  (kA), usado quando  $V_{oc}$  é maior que 2700 V;

$I_{arc\_3}$ : é o terceiro termo de interpolação da  $I_{arc}$  (kA), usado quando  $V_{oc}$  é menor que 2700 V;

$V_{oc}$ : é a tensão em circuito aberto (tensão do sistema) (kV).

A corrente final de arco é, portanto:

- Quando  $600 < V_{oc} \leq 2.700$  V:

$$I_{arc} = I_{arc\_3}$$



- Quando  $V_{oc} > 2.700 \text{ V}$ :

$$I_{arc} = I_{arc\_2}$$

#### 4.2.2.2 Tensão na faixa de: $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$

A corrente de arco intermediária é calculada conforme equação (4.1) considerando apenas a tensão 600 V. Os coeficientes utilizados na equação são também apresentados conforme tabela 10.1 do Anexo 10.1. Para essa faixa de tensão a corrente final de arco é calculada segundo a equação (4.5).

$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{0,6}{V_{oc}}\right)^2 * \left(\frac{1}{I_{arc\_600}^2} - \left(\frac{0,6^2 - V_{oc}^2}{0,6^2 * I_{bf}^2}\right)\right)}} \quad (4.5)$$

Onde:

$V_{oc}$  : é a tensão de circuito aberto (kV);

$I_{bf}$  : é a corrente de falta trifásica franca (RMS trifásicas) (kA);

$I_{arc}$  : é a corrente final de arco RMS (kA), no  $V_{oc}$  especificado;

$I_{arc\_600}$  : é a corrente de arco RMS no  $V_{oc} = 600 \text{ V}$  encontrada usando a Equação (4.1).

### 4.2.3 Correção do gabinete

A energia incidente calculada conforme o guia IEEE 1584 – 2018 considera duas etapas para determinar a energia incidente final. Na primeira etapa são calculados valores intermediários de energia incidente e por fim obtém-se o valor final. Para aplicar as equações fornecidas no guia IEEE 1584 – 2018 deve-se realizar uma correção para adequá-las ao tamanho real do gabinete em estudo, pois as equações (configurações de eletrodos VCB, VCBB e HCB) foram normalizadas para um gabinete de tamanho fixo (508 mm x 508 mm x 508 mm).

#### 4.2.3.1 Determinação do tipo de gabinete – Típico ou Raso

Para classificar o gabinete como Raso as três condições apresentadas a seguir devem ser satisfeitas, caso uma delas não seja atendida o gabinete é classificado como Típico.

- Tensão do sistema é inferior a 600 V AC;
- A altura e largura são inferiores a 508 mm;
- A profundidade do gabinete é menor ou igual a 203,2 mm.

#### 4.2.3.2 Determinação de altura e largura equivalentes

A tabela 4.2, adaptada do guia (IEEE Std 1584, 2018), apresenta as diretrizes para determinar as alturas e larguras equivalentes dos painéis. Observa-se nesta tabela que para alguns intervalos a largura e altura equivalentes são determinadas conforme as equações (4.6) e (4.7).

**Tabela 4. 2 - Diretrizes para determinar as alturas e larguras equivalentes do painéis**

Conf. Eletrodo	Faixa	< 508	≥508 e ≤660,4	>660,4 e ≤1244,6	> 1244,6
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
VCB	$Largura_1$	= 20 (se típico)	= 0,03937 x largura	Obtido da Equação (4.6) e largura atual	Obtido da Equação (4.6) com largura = 1244,6 mm
		=0,03937 x largura (se raso <sup>a</sup> )			
	$Altura_1$	= 20 (se típico)	= 0,03937 x altura	= 0,03937 x altura	=49
		=0,03937 x largura (se raso <sup>a</sup> )			
VCBB	$Largura_1$	= 20 (se típico)	= 0,03937 x largura	Obtido da Equação (4.6) e largura atual	Obtido da Equação (4.6) com largura = 1244,6 mm
		=0,03937 x largura (se raso <sup>a</sup> )			
	$Altura_1$	= 20 (se típico)	= 0,03937 x altura	Obtido da Equação (4.7) com altura atual	Obtido da Equação (4.7) com altura = 1244,6 mm
		=0,03937 x largura (se raso <sup>a</sup> )			
HCB	$Largura_1$	= 20 (se típico)	= 0,03937 x largura	Obtido da Equação (4.6) e largura atual	Obtido da Equação (4.6) com largura = 1244,6 mm
		=0,03937 x largura (se raso <sup>a</sup> )			
	$Altura_1$	= 20 (se típico)	= 0,03937 x altura	Obtido da Equação (4.7) com altura atual	Obtido da Equação (4.7) com altura = 1244,6 mm
		=0,03937 x largura (se raso <sup>a</sup> )			

<sup>a</sup> – Raso somente se  $V_{oc} < 600$  V CA e a profundidade do gabinete  $\leq 203,2$  mm, caso contrário, o gabinete é típico.

Fonte: Adaptado IEEE Std 1584 (2018)

$$Largura_1 = \left( 660,4 + (Largura - 660,4) * \left( \frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right) * 25,4^{-1} \quad (4.6)$$

$$Altura_1 = \left( 660,4 + (Altura - 660,4) * \left( \frac{V_{oc} + A}{B} \right) \right) * 25,4^{-1} \quad (4.7)$$

Onde:

$Largura_1$ : é a largura equivalente do gabinete;

$Altura_1$ : é a altura equivalente do gabinete;

$Largura$ : é a largura real do gabinete (mm);

$Altura$ : é a altura real do gabinete (mm);

$V_{oc}$ : é a tensão de circuito aberto (tensão do sistema) (kV);

$A$ : é uma constante igual a 4 para VCB e 10 para VCBB e HCB; e

$B$ : é uma constante igual a 20 para VCB, 24 para VCBB e 22 para HCB.

Portanto, o tamanho equivalente do gabinete é determinado usando os dois parâmetros equivalentes calculados ( $Largura_1$  e  $Altura_1$ ) e aplicado a Equação (4.8).

$$EES = \frac{Altura_1 + Largura_1}{2} \quad (4.8)$$

Onde:

$Largura_1$ : é a largura equivalente do gabinete;

$Altura_1$ : é a altura equivalente do gabinete; e

$EES$ : é o tamanho equivalente do gabinete (*equivalent enclosure size*).

#### 4.2.3.3 Determinação do fator de correção do tamanho do gabinete (CF)

Finalmente, os cálculos do tamanho equivalente do gabinete são realizados conforme Equações (4.9) e (4.10), utilizando tanto o tamanho equivalente do gabinete e como os coeficientes apresentados na tabela 4.3, levando em consideração o tipo de gabinete e as configurações dos eletrodos. A equação (4.9) é utilizada para gabinetes Rasos enquanto a equação (4.10) é usada para gabinetes Típicos.

$$CF = \frac{1}{b_1 * EES^2 + b_2 * EES + b_3} \quad (4.9)$$

$$CF = b_1 * EES^2 + b_2 * EES + b_3 \quad (4.10)$$

Onde:

$b_1$  a  $b_3$ : são coeficientes fornecidos na tabela 4.3; e

$CF$ : é o fator de correção do tamanho do gabinete usado nas equações de energia incidente e limite de arco elétrico.

Tabela 4. 3 - Coeficientes das Equações (4.9) e (4.10)

Tipo Gabinete	Configuração Eletrodo	$b_1$	$b_2$	$b_3$
Típico	VCB	-0,000302	0,03441	0,4325
	VCBB	-0,0002976	0,032	0,479
	HCB	-0,0001923	0,01935	0,6899
Raso	VCB	0,002222	-0,02556	0,6222
	VCBB	-0,002778	0,1194	-0,2778
	HCB	-0,0005556	0,03722	0,4778

Fonte: Adaptado IEEE Std 1584 (2018)

## 4.2.4 Cálculo da Energia Incidente

A energia incidente, assim como procedimento utilizado para obtenção da corrente de arco, é calculada em duas etapas: (1) são calculados três valores intermediários de energia incidente para três níveis de tensão pré-definidos (600, 2.700 e 14.300 V) e (2) cálculo da energia incidente para a tensão específica do sistema. As equações para cálculo da energia incidente são divididas em duas faixas de tensão,  $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15.000 \text{ V}$  e  $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$ , além de utilizar coeficientes em função das configurações dos eletrodos.

### 4.2.4.1 Energia Incidente para tensão na faixa de: $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15.000 \text{ V}$

As Equações (4.11), (4.12) e (4.13) são utilizadas para determinar os valores intermediários da energia incidente em níveis de tensão pré-definidos de 600 V, 2.700 V e 14.300 V respectivamente.

$$E_{600} = \frac{12,552}{50} * T * 10^{\left( k_1 + k_2 * \log_{10} G + \frac{k_3 * I_{arc\_600}}{k_4 * I_{bf}^7 + k_5 * I_{bf}^6 + k_6 * I_{bf}^5 + k_7 * I_{bf}^4 + k_8 * I_{bf}^3 + k_9 * I_{bf}^2 + k_{10} * I_{bf}} + a \right)} \quad (4.11)$$

$$a = \left( k_{11} * \log_{10} I_{bf} + k_{12} * \log_{10} D + k_{13} * \log_{10} I_{arc\_600} + \log_{10} \frac{1}{CF} \right)$$

$$E_{2.700} = \frac{12,552}{50} * T * 10^{\left( k_1 + k_2 * \log_{10} G + \frac{k_3 * I_{arc\_2.700}}{k_4 * I_{bf}^7 + k_5 * I_{bf}^6 + k_6 * I_{bf}^5 + k_7 * I_{bf}^4 + k_8 * I_{bf}^3 + k_9 * I_{bf}^2 + k_{10} * I_{bf}} + b \right)} \quad (4.12)$$

$$b = \left( k_{11} * \log_{10} I_{bf} + k_{12} * \log_{10} D + k_{13} * \log_{10} I_{arc\_2.700} + \log_{10} \frac{1}{CF} \right)$$

$$E_{14.300} = \frac{12,552}{50} * T * 10^{\left( k_1 + k_2 * \log_{10} G + \frac{k_3 * I_{arc\_14.300}}{k_4 * I_{bf}^7 + k_5 * I_{bf}^6 + k_6 * I_{bf}^5 + k_7 * I_{bf}^4 + k_8 * I_{bf}^3 + k_9 * I_{bf}^2 + k_{10} * I_{bf}} + c \right)} \quad (4.13)$$

$$c = \left( k_{11} * \log_{10} I_{bf} + k_{12} * \log_{10} D + k_{13} * \log_{10} I_{arc\_14.300} + \log_{10} \frac{1}{CF} \right)$$

Onde:

$E_{600}$ : é a energia incidente em  $V_{oc} = 600$  V (J/cm<sup>2</sup>);

$E_{2.700}$ : é a energia incidente em  $V_{oc} = 2.700$  V (J/cm<sup>2</sup>);

$E_{14.300}$ : é a energia incidente em  $V_{oc} = 14.300$  V (J/cm<sup>2</sup>);

$T$ : é a duração do arco;

$G$ : é a distância entre os condutores (eletrodos) (mm);

$I_{arc\_600}$ : é a corrente de arco RMS para  $V_{oc} = 600$  V (kA);

$I_{arc\_2.700}$ : é a corrente de arco RMS para  $V_{oc} = 2.700$  V (kA);

$I_{arc\_14.300}$ : é a corrente de arco RMS para  $V_{oc} = 14.300$  V (kA);

$I_{bf}$ : é a corrente de falta trifásica franca (valor RMS simétrico) (kA);

$D$ : é a distância entre eletrodos e calorímetros (distância de trabalho)(mm);

$CF$ : é o fator de correção para o tamanho do gabinete ( $CF = 1$  para configurações de eletrodos VOA e HOA).

$k_1$  a  $k_{13}$ : são os coeficientes fornecidos nas tabelas 10.2, 10.3 e 10.4 conforme Anexo 10.1.

Para determinar a energia incidente após os cálculos intermediários faz-se uso das Equações (4.14), (4.15) e (4.16).

$$E_1 = \frac{E_{2.700} - E_{600}}{2,1} * (V_{oc} - 2,7) + E_{2.700} \quad (4.14)$$

$$E_2 = \frac{E_{14.300} - E_{2.700}}{11,6} * (V_{oc} - 14,3) + E_{14.300} \quad (4.15)$$

$$E_3 = \frac{E_1 * (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{E_2 * (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (4.16)$$

Onde:

$E_1$ : é o primeiro termo de interpolação de E entre 600 V e 2.700 V (V/cm<sup>2</sup>);

$E_2$ : é o segundo termo de interpolação de E usado quando  $V_{oc}$  é maior que 2.700 V (V/cm<sup>2</sup>);

$E_3$ : é o terceiro termo de interpolação de E usado quando  $V_{oc}$  é menor que 2.700 V (V/cm<sup>2</sup>).

A energia incidente é, portanto:

- Quando  $600 < V_{oc} \leq 2.700$  V:

$$E = E_3$$

- Quando  $V_{oc} > 2.700$  V:

$$E = E_2$$

#### 4.2.4.2 Energia Incidente para tensão na faixa de: $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$

A energia incidente nesta faixa de tensão é calculada conforme equação (4.17). Os coeficientes utilizados na equação são apresentados na tabela 10.2 do Anexo 10.1 e estão em função das configurações dos eletrodos do sistema em estudo e para tensão de 600 V.

$$E_{\leq 600} = \frac{12,552}{50} * T * 10^{\left( k_1 + k_2 * \log_{10} G + \frac{k_3 * I_{arc\_600}}{k_4 * I_{bf}^7 + k_5 * I_{bf}^6 + k_6 * I_{bf}^5 + k_7 * I_{bf}^4 + k_8 * I_{bf}^3 + k_9 * I_{bf}^2 + k_{10} * I_{bf}} + d \right)} \quad (4.17)$$

$$d = \left( k_{11} * \log_{10} I_{bf} + k_{12} * \log_{10} D + k_{13} * \log_{10} I_{arc} + \log_{10} \frac{1}{CF} \right)$$

Onde:

$E_{\leq 600}$ : é a energia incidente para  $V_{oc} \leq 600$  V (J/cm<sup>2</sup>).

Portanto, a energia incidente final:

$$E = E_{\leq 600}$$

Onde:

$E$ : é a energia incidente final na  $V_{oc}$  especificada (J/cm<sup>2</sup>).

#### 4.2.5 Cálculo do Limite de Arco Elétrico

O último cálculo a ser feito após ser determinada a corrente de arco e energia incidente é o limite de arco elétrico que se corresponde à distância de uma fonte potencial de arco elétrico no qual a energia incidente calculada vale 5 (J/cm<sup>2</sup>) (1,2 (cal/cm<sup>2</sup>)).

##### 4.2.5.1 Limite de Arco Elétrico para tensão na faixa de: $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15.000 \text{ V}$

As equações (4.18), (4.19) e (4.20) determinam os valores intermediários do limite do arco elétrico para os níveis de tensão de 600 V, 2.700 V e 14.300 V.

$$AFB_{600} = 10 \left( \frac{k_1 + k_2 * \log_{10} G + \frac{k_3 * I_{arc_{600}}}{k_4 * I_{bf}^7 + k_5 * I_{bf}^6 + k_6 * I_{bf}^5 + k_7 * I_{bf}^4 + k_8 * I_{bf}^3 + k_9 * I_{bf}^2 + k_{10} * I_{bf}} + e}{-k_{12}} \right)$$

$$e = k_{11} * \log_{10} I_{bf} + k_{13} * \log_{10} I_{arc_{600}} + \log_{10} \left( \frac{1}{CF} \right) - \log_{10} \left( \frac{20}{T} \right) \quad (4.18)$$

$$AFB_{2.700} = 10 \left( \frac{k_1 + k_2 * \log_{10} G + \frac{k_3 * I_{arc_{2.700}}}{k_4 * I_{bf}^7 + k_5 * I_{bf}^6 + k_6 * I_{bf}^5 + k_7 * I_{bf}^4 + k_8 * I_{bf}^3 + k_9 * I_{bf}^2 + k_{10} * I_{bf}} + f}{-k_{12}} \right)$$

$$f = k_{11} * \log_{10} I_{bf} + k_{13} * \log_{10} I_{arc_{2.700}} + \log_{10} \left( \frac{1}{CF} \right) - \log_{10} \left( \frac{20}{T} \right) \quad (4.19)$$

$$AFB_{14.300} = 10 \left( \frac{k_1 + k_2 * \log_{10} G + \frac{k_3 * I_{arc_{14.300}}}{k_4 * I_{bf}^7 + k_5 * I_{bf}^6 + k_6 * I_{bf}^5 + k_7 * I_{bf}^4 + k_8 * I_{bf}^3 + k_9 * I_{bf}^2 + k_{10} * I_{bf}} + g}{-k_{12}} \right)$$

$$g = k_{11} * \log_{10} I_{bf} + k_{13} * \log_{10} I_{arc_{14.300}} + \log_{10} \left( \frac{1}{CF} \right) - \log_{10} \left( \frac{20}{T} \right) \quad (4.20)$$

Onde:

$AFB_{600}$ : é o limite do arco elétrico para  $V_{oc} = 600$  V (mm);

$AFB_{2.700}$ : é o limite do arco elétrico para  $V_{oc} = 2.700$  V (mm);

$AFB_{14.300}$ : é o limite do arco elétrico para  $V_{oc} = 14.300$  V (mm);

$G$ : é o espaço entre os eletrodos;

$I_{arc_{600}}$ : é a corrente de arco RMS (kA), para  $V_{oc} = 600$  V;

$I_{arc_{2700}}$ : é a corrente de arco RMS (kA), para  $V_{oc} = 2700$  V;

$I_{arc_{14300}}$ : é a corrente de arco RMS (kA), para  $V_{oc} = 14.300$  V;

$I_{bf}$ : é a corrente de falta trifásica franca (valor RMS simétrico) (kA);

$CF$ : é o fator de correção para o tamanho do gabinete ( $CF = 1$  para configurações de eletrodos VOA e HOA).

$T$ : é a duração do arco;

$k_1$  a  $k_{13}$ : são os coeficientes fornecidos conforme tabelas 10.2, 10.2 e 10.3 do Anexo 10.1.

Para determinar o limite de arco elétrico após os cálculos intermediários faz-se uso das Equações (4.21), (4.22) e (4.23).

$$AFB_1 = \frac{AFB_{2.700} - AFB_{600}}{2,1} * (V_{oc} - 2,7) + AFB_{2.700} \quad (4.21)$$

$$AFB_2 = \frac{AFB_{14.300} - AFB_{2.700}}{11,6} * (V_{oc} - 14,3) + AFB_{14.300} \quad (4.22)$$

$$AFB_3 = \frac{AFB_1 * (2,7 - V_{oc})}{2,1} + \frac{AFB_2 * (V_{oc} - 0,6)}{2,1} \quad (4.23)$$

Onde:

$AFB_1$ : é o primeiro termo de interpolação do AFB (mm), entre 600 V e 2.700 V;

$AFB_2$ : é o segundo termo de interpolação do AFB (mm), usado quando  $V_{oc}$  é maior que 2.700 V;

$AFB_3$ : é o terceiro termo de interpolação do AFB (mm), usado quando  $V_{oc}$  é menor que 2.700 V.

O limite de arco elétrico é, portanto:

- Quando  $600 < V_{oc} \leq 2.700$  V:

$$AFB = AFB_3$$

- Quando  $V_{oc} > 2.700$  V:

$$AFB = AFB_2$$

#### 4.2.5.2 Limite de arco elétrico para tensão na faixa de: $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$

O limite de arco elétrico nesta faixa de tensão é calculado conforme equação (4.24). Os coeficientes utilizados na equação são apresentados conforme tabela 10.2 do Anexo 10.1 e estão em função das configurações dos eletrodos do sistema em estudo e para tensão de 600 V.

$$AFB_{600} = 10^{\left( \frac{k_1 + k_2 * \log_{10} G + \frac{k_3 * I_{arc600}}{k_4 * I_{bf}^7 + k_5 * I_{bf}^6 + k_6 * I_{bf}^5 + k_7 * I_{bf}^4 + k_8 * I_{bf}^3 + k_9 * I_{bf}^2 + k_{10} * I_{bf}} + h}{-k_{12}} \right)}$$

$$h = k_{11} * \log_{10} I_{bf} + k_{13} * \log_{10} I_{arc} + \log_{10} \left( \frac{1}{CF} \right) - \log_{10} \left( \frac{20}{T} \right) \quad (4.24)$$



Onde:

$I_{arc}$  : é a corrente de arco eficaz para  $V_{oc} \leq 600$  V [obtida usando a equação (4.5)] (kA);

$k_1$  a  $k_{13}$ : são os coeficientes fornecidos na tabela 10.2 do Anexo 10.1.

Portanto, o limite de arco elétrico final é dado por:

$$AFB = AFB_{\leq 600}$$

Onde:

$AFB$ : é o limite do arco elétrico final no  $V_{oc}$  especificado (mm).

#### 4.2.6 Variação da corrente de arco

Um segundo conjunto de parâmetros é calculado reduzindo a corrente de arco calculada pelas equações anteriores. A intenção é verificar se com a alteração do tempo de atuação dos dispositivos de proteção acarretará uma variação na energia incidente. Esta corrente de arco mínimo é calculada conforme equação (4.25) e os coeficientes são exibidos na tabela 10.5 do Anexo 10.1.

$$I_{arc\_min} = I_{arc} * (1 - 0,5 * V_{arcf}) \quad (4.25)$$

$$V_{arcf} = k_1 * V_{oc}^6 + k_2 * V_{oc}^5 + k_3 * V_{oc}^4 + k_4 * V_{oc}^3 + k_5 * V_{oc}^2 + k_6 * V_{oc}^1 + k_7$$

Onde:

$V_{arcf}$ : é o fator de correção da variação da corrente de arco;

$I_{arc}$ : é(são) a(s) corrente(s) final(is) ou intermediária(s) de arco (kA) ;

$I_{arc\_min}$ : é uma segunda corrente de arco RMS reduzida com base no fator de correção da variação (kA);

$V_{oc}$ : é a tensão em circuito aberto entre 208 e 15.000 V;

$k_1$  a  $k_7$ : são os coeficientes fornecidos pela tabela 10.5 do Anexo 10.1.

Após a determinação do fator de correção da variação da corrente de arco, conforme equação (4.25), deve-se ajustar os valores intermediários da corrente de arco, utilizando o fator de correção, determinando assim a corrente de arco mínima final com interpolação por

tensão. As equações dos itens 4.2.4 e 4.2.5 devem ser aplicadas novamente com o objetivo de se determinar a energia incidente final e o valor final da distância de segurança para corrente de arco mínima calculada.

### **4.3 Análise comparativa entre IEEE STD 1584 – 2002 e 2018**

As mudanças trazidas pela versão 2018 do guia IEEE STD 1584 foram apresentadas após realização de mais de 1800 testes em laboratório, com objetivo de produzir resultados mais precisos e aumentar o número de configurações de eletrodos para avaliação do arco elétrico conforme trabalho (MOHLA, 2019).

Na sequência serão apresentadas as principais mudanças ocorridas com a publicação da nova versão do guia IEEE STD 1584 e também dois fluxogramas para sintetizar os passos para aplicação de ambas as versões do guia.

#### **4.3.1 Mudanças na aplicação da norma IEEE STD 1584**

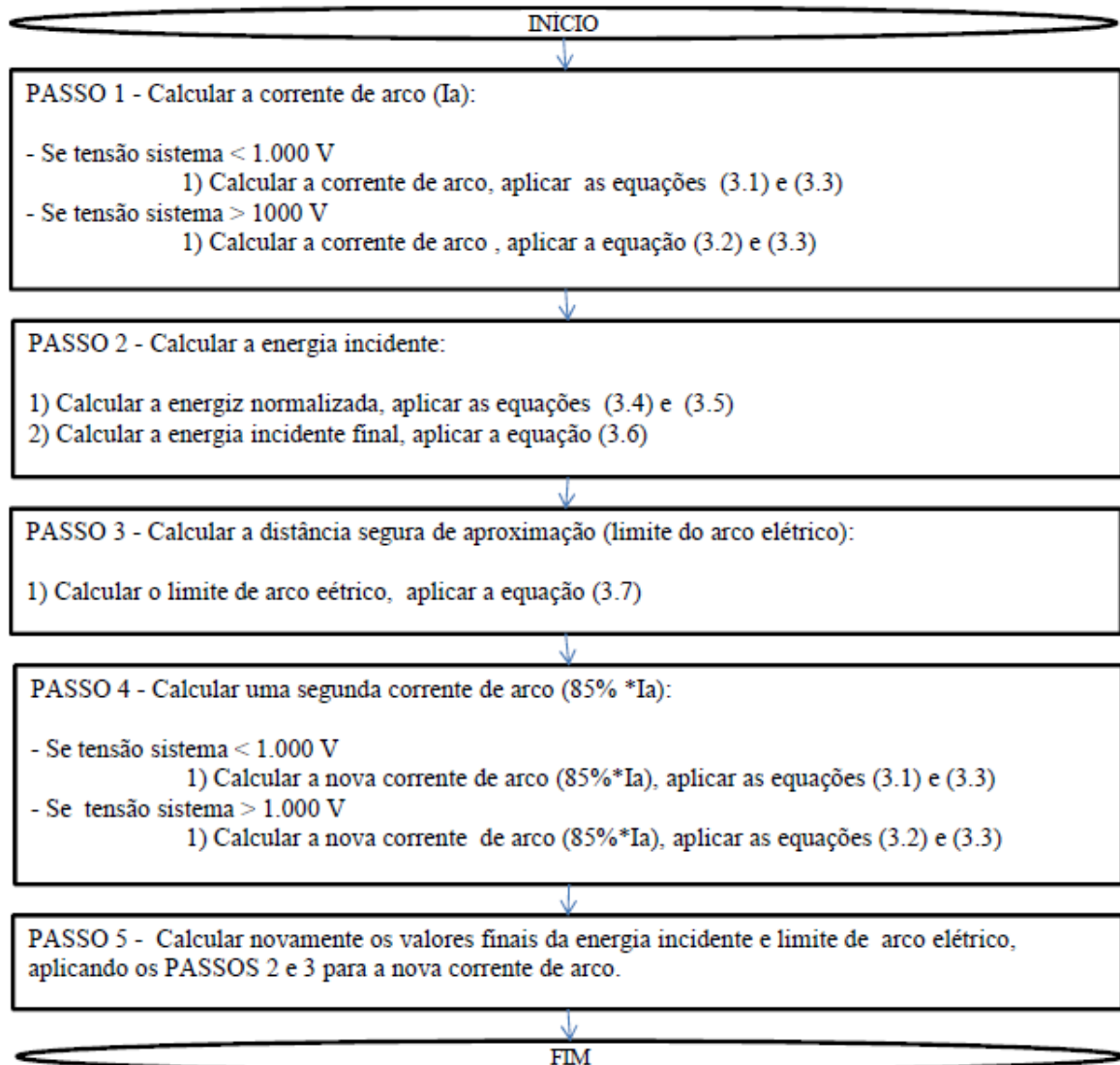
As principais mudanças trazidas pela versão 2018 do guia IEEE STD 1584 são apresentadas no trabalho (MCCONNELL, 2019) sendo elas:

- O método de cálculo é mais complexo e permite a análise do sistema baseado na disposição física dos componentes;
- Os cálculos são mais robustos e com maior número de variáveis;
- A faixa de tensão contemplada é de 208 a 15.000 V, dividida em dois níveis de tensão;
- Permite selecionar 5 (cinco) configurações de eletrodos adicionais no sistema;
- Permite realizar o ajuste ao tamanho do gabinete; e
- Apresenta equação para calcular o fator de ajuste para analisar a variação da corrente de arco.
- 

#### **4.3.2 Principais passos na aplicação dos guias IEEE STD 1584 2002 e 2018**

Para um melhor entendimento dos passos a serem seguidos nos cálculos do arco elétrico, são apresentados dois fluxogramas conforme figuras 4.6 e 4.7, apresentando os

principais passos a serem seguidos. A tabela 4.4 sintetiza as diferenças após a nova versão do guia 1584.



**Figura 4. 6 - Passos para aplicação do guia IEEE STD 1584 – 2002**  
**Fonte: Elaborado pelo autor**

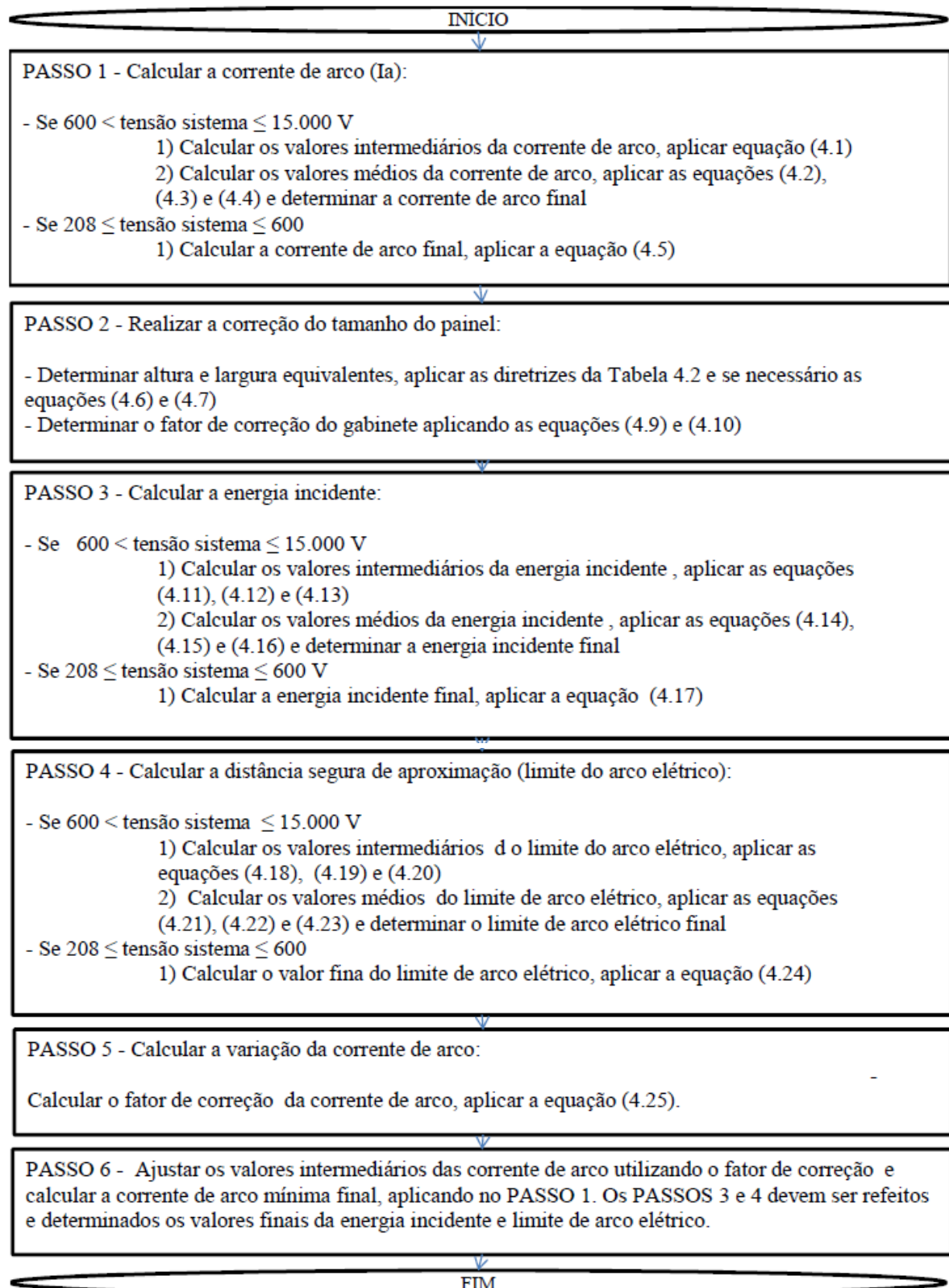


Figura 4. 7 - Passos para aplicação da norma IEEE STD 1584 – 2018

Fonte: Elaborado pelo autor

**Tabela 4. 4 - Mudanças de análise após a publicação da nova versão do Guia IEEE 1584**

<b>Intervalos do Modelo</b>	<b>Guia “IEEE Std 1584 – 2002”</b>		<b>Guia “IEEE Std 1584 – 2018”</b>	
Faixas de tensão fase-fase trifásica	208 a 1.000 V	1.000 a 15.000 V	208 a 600 V	601 a 15.000 V
Faixa de corrente de falta franca	700 a 106.000 A		500 a 106.000 A	200 a 65.000 A
Corrente de arco mínima	85% da corrente de arco		Aplica-se fator de variação na corrente de arco	
Gaps	13 a 152 mm		6,35 a 76,2 mm	19,05 a 254 mm
Configuração Eletrodos	VCB		VCB	
	-		VCBB	
	-		HCB	
	VOA		VOA	
	-		HOA	
Tempo de eliminação da falta	-		Sem limite	
Correção do painel	Fator de distância (tensão e tipo de equipamento)		Fator de correção (altura, largura e comprimento)	
Distância de trabalho	455 a 910 mm		≥ 305 mm	
Frequência	50 ou 60 Hz		50 ou 60 Hz	
Sistema aterramento	Todos os tipos ou não aterrados		Não considera	

**Fonte: Elaborado pelo autor**

## 4.4 Influências da configuração dos eletrodos nos resultados

A elaboração da versão 2002 da norma “IEEE STD 1584” foi baseada em testes de laboratório com configurações de eletrodos verticais em caixa de metal (VCB) ou ao ar livre (VOB). A versão 2018 apresenta cinco configurações de eletrodos diferentes e de acordo com testes realizados e apresentados no trabalho (MCCONNELL, 2019), pode-se concluir:

- A configuração HCB produz a energia incidente mais alta;
- As configurações VCBB e HOA são semelhantes em energia incidente e superiores aos valores VCB de 2002;
- Os resultados VCB de 2018 são menores do que VCB de 2022, especialmente à medida que a corrente de falha aumenta;
- A configuração VOA é a com energia incidente mais baixa, mas os valores de 2018 são ligeiramente mais altos à medida que a corrente de falha aumenta.

Ainda conforme (MCCONNELL, 2019), um equipamento que possui a classificação atual HCB é o que deve oferecer maiores riscos aos trabalhadores, sendo seguido pela configuração VCBB.

No trabalho de (JORNACION, 2020), também é feita uma comparação entre as versões 2002 e 2018 da norma “IEEE STD 1584”, para isso, foram calculadas para várias

correntes de falta e diferentes configurações de eletrodos as energias incidentes. Para um sistema de baixa tensão de 480 V, as figuras (4.8) e (4.9) apresentam os resultados das energias incidentes calculadas. A configuração HCB apresentou os maiores níveis de energia incidente para toda faixa de corrente de falta franca, assim como apresentado no trabalho de (MCCONNELL, 2019).

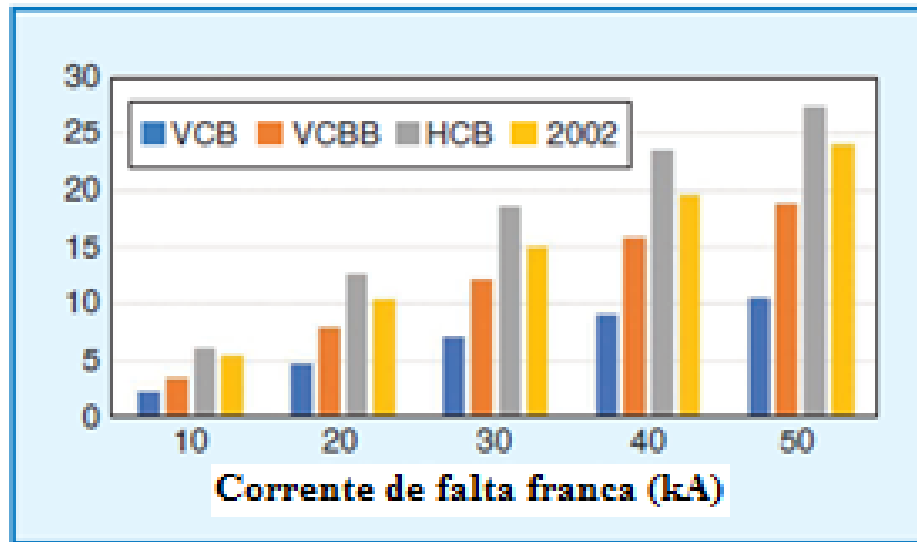


Figura 4. 8 - Energia Incidente em painel 480 V (modelo 2018 vs 2002)  
Fonte: Jornacion (2020)

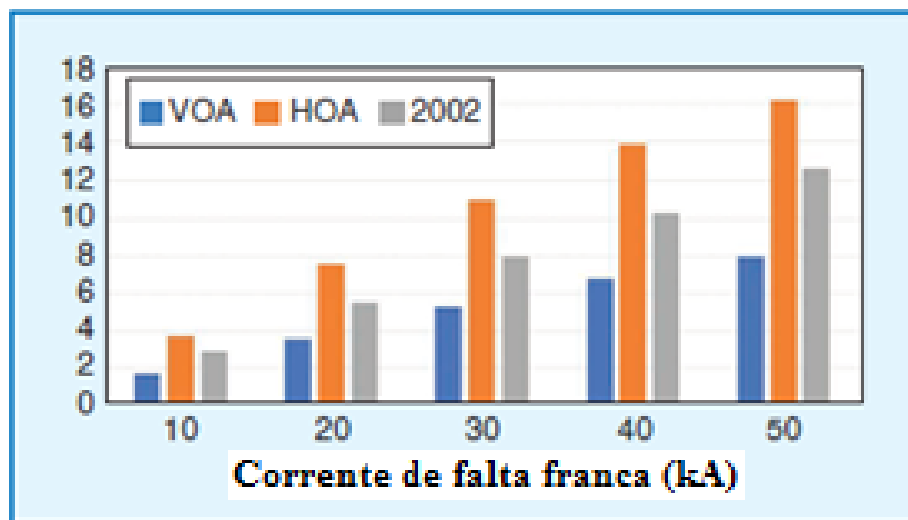


Figura 4. 9 - Energia Incidente ao ar livre 480 V (modelo 2018 vs 2002)  
Fonte: Jornacion (2020)

Os índices mais altos de energia incidente também foram obtidos para configuração HCB em painel de 13,8 kV, de acordo com as figuras (4.10) e (4.11). Em configurações ao ar livre, a energia incidente calculada pela versão 2002 na tensão de 13,8 kV, possui o menor valor, o que não se verifica para configurações ao ar livre em 480 V, cuja configuração VOA apresenta o menor dos valores de energia incidente em toda faixa de corrente de falta franca.

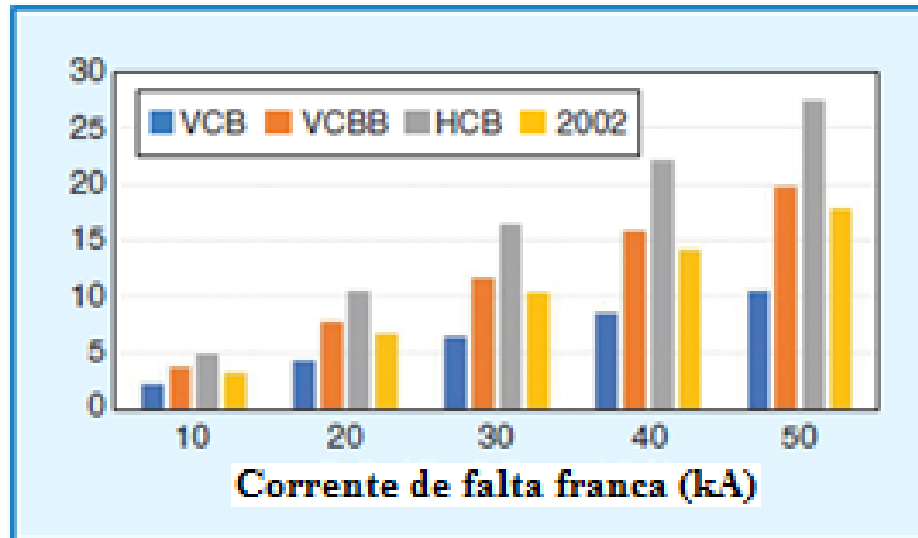


Figura 4. 10 - Energia Incidente em painel 13,8 kV (modelo 2018 vs 2002)  
Fonte: Jornacion (2020)

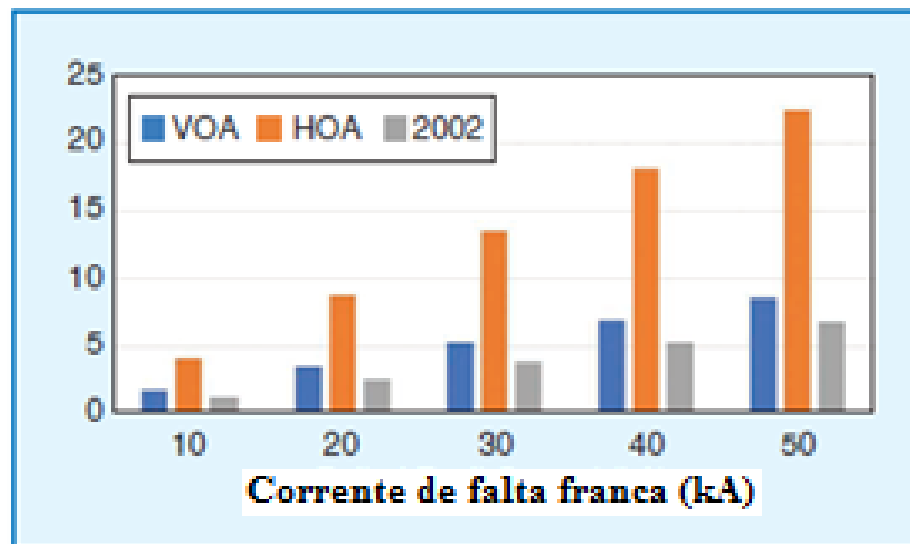


Figura 4. 11 - Energia Incidente ao ar livre 13,8 kV (modelo 2018 vs 2002)  
Fonte: Jornacion (2020)

## 4.5 Consideração final

O guia IEEE STD 1584 - 2018 visa fornecer, através de suas equações, os parâmetros relacionados ao arco elétrico e propiciar aos técnicos envolvidos nos estudos informações para delimitação de distâncias de segurança e escolha adequadas dos equipamentos de proteção dos trabalhadores envolvidos com as tarefas diárias da indústria. A definição de novas equações empíricas teve também como objetivo corrigir e melhorar os resultados obtidos da utilização da versão anterior do guia.

Com intuito de esclarecer possíveis dúvidas na aplicação das normas e das mudanças ocorridas na atualização do guia, foi realizada uma análise comparativa entre os modelos e apresentado fluxogramas referentes aos passos a serem seguidos para aplicação de ambas versões.

Conforme apresentado na seção 4.4, os níveis de energia calculados para várias correntes de falta e diferentes configurações de eletrodos em baixa tensão ( $< 600$  V), mostram que a energia incidente calculada para versão 2002 do guia é superada pela configuração HCB em sistemas fechados e HOA em sistemas ao ar livre. Já para sistemas acima de 600 V, as energias incidentes calculadas para as configurações VCBB e HCB em sistemas fechados, e configurações VOA e HOA para sistemas abertos, superam a energia calculada pela versão 2002. Sendo assim, pode-se concluir que os estudos de energia realizados anteriormente pela versão 2002 do guia pode estar defasado e comprometer a segurança dos trabalhadores.



## 5 MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DO ARCO ELÉTRICO E NFPA-70E

### 5.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem como objetivo apresentar os principais métodos de mitigação do arco elétrico, destacando as medidas passivas e ativas a serem adotadas nos ambientes industriais para minimizar os efeitos da ocorrência de um arco elétrico.

As medidas que tradicionalmente são empregadas na segurança industrial são uma combinação de procedimentos de travamento e etiquetagem de equipamentos, além do uso de luvas. Mas a análise de risco elétrico exige que os estudos sejam mais aprofundados e técnicos (GALINDO, 2015).

### 5.2 Medidas de mitigação passivas

As medidas de mitigação passivas de acordo com (GALINDO, 2015) são:

- Implementar boas práticas de projeto e aumentar as distâncias de trabalho ou fronteiras de aproximação;
- Implementar programas de manutenção baseados na recomendação “NFPA 70B - *Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance*” da NFPA (*National Fire Protection Association*) e da NETA (*International Electrical Testing Association*), responsável por credenciar e certificar técnicos e empresas terceirizadas na área de testes elétricos;
- Implantar um verdadeiro programa Segurança e Higiene Industrial, como práticas de etiquetagem e implantação do uso de equipamentos de proteção individual;
- Na medida do possível, executar o trabalho com barramento morto (desenergizado), ou desconexão do equipamento remotamente; e
- Aquisição e instalação de equipamentos com janelas de inspeção infravermelha, que não exponha o termógrafo a partes energizadas.

### 5.3 Medidas de mitigação ativas

As técnicas que resultem na especificação e instalação de equipamentos específicos são classificadas como medidas de mitigação ativas (GALINDO, 2015). Dentre elas podem se destacar:

- Instalar fusíveis limitadores;
- Instalar reatores de limitação de corrente;
- Instalar resistores de aterramento de alta ou baixa impedância;
- Especificar transformadores com alta impedância para substituir aqueles com impedância padrão;
- Especificar equipamentos resistentes a arco elétrico e barramentos isolados;
- Usar relés de proteção de falta a terra;
- Instalar equipamentos de proteção com ajustes eletrônicos, que também permitam obter seletividade com outros dispositivos.
- Fazer uso de meio óptico (fibra óptica) em combinação com relés de proteção diferencial. Esses dispositivos só podem ser instalados em equipamentos com gabinetes fechados.
- Uma vez determinada à categoria de risco/perigo (HRC - *Hazard Risk Category*), sugere-se o uso de um critério conservador na seleção do EPI, de forma que seja especificado com uma categoria superior,  $EPI + 1$ .

### 5.4 Métodos de mitigação

Com o intuito de reduzir a energia incidente durante um evento de arco elétrico, podem ser usadas diversas medidas passivas e ativas conforme mencionado anteriormente. Esta seção apresenta os recursos que vêm sendo usados para minimizar os efeitos do arco elétrico em equipamentos e principalmente para a equipe técnica envolvida com a operação e a manutenção de sistemas elétricos industriais.

### 5.4.1 Atuação nos ajustes dos dispositivos de proteção

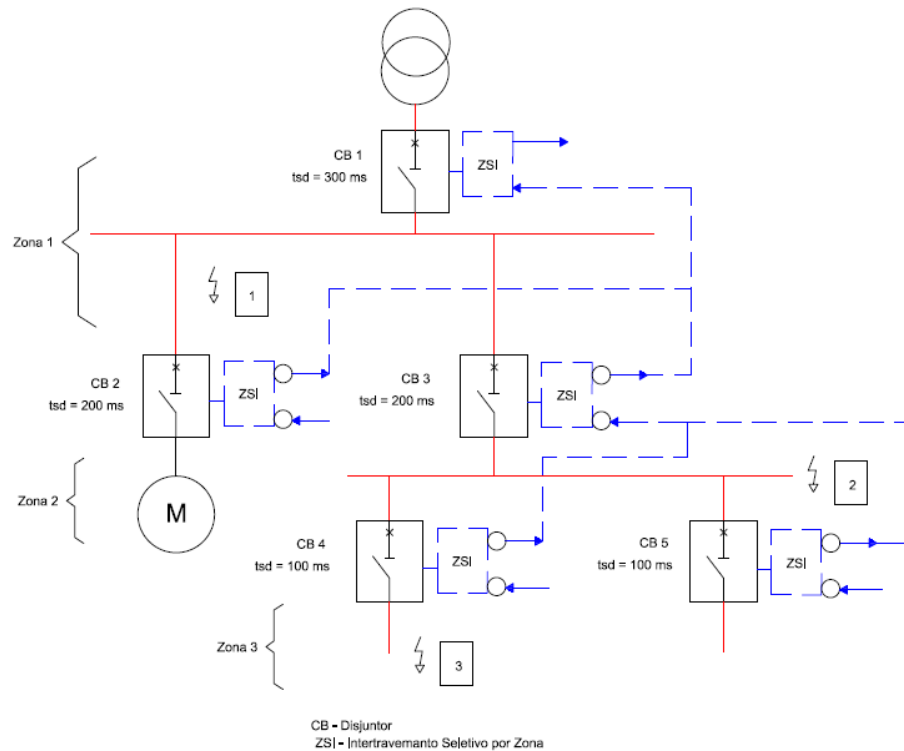
Atenção especial deve ser dada aos ajustes dos dispositivos de proteção e na seletividade entre eles, pois uma menor corrente de arco não implica necessariamente em redução de energia incidente, já que o tempo de atuação da proteção pode aumentar. Como resultado, tanto o nível de energia incidente como a categoria de risco/perigo (HCR) também podem aumentar.

### 5.4.2 Intertravamento seletivo de zona (ZSI)

O ZSI, também conhecido como seletividade lógica, tem princípio de funcionamento a comparação de correntes em zonas pré-estabelecidas no circuito elétrico, e seu modo de operação tem ideia semelhante da proteção diferencial de barramento que monitora 100% da corrente de entrada e saída e caso não sejam iguais é dado comando para disparar os disjuntores.

Para melhor entender o funcionamento do ZSI, a figura 5.1 adaptada de (VERSTRATEN, LUCHTENBERG, 2013) retrata parte de um sistema elétrico com duas barras e destaca 3 níveis de atuação. Considere a falta ocorrendo no barramento dos disjuntores alimentadores (CB4 e CB5), as unidades de disparo do disjuntor alimentador (CB3) e principal (CB1) detectam a falta, porém, um sinal de bloqueio é enviado ao disjuntor principal (CB1) e ele não atua, já que a falta está na zona de proteção do disjuntor alimentador (CB3). O disjuntor principal (CB1), após receber o sinal de bloqueio, irá atuar somente se o disjuntor do alimentador (CB3) fracassar e de acordo com seus ajustes de tempo previamente configurado.

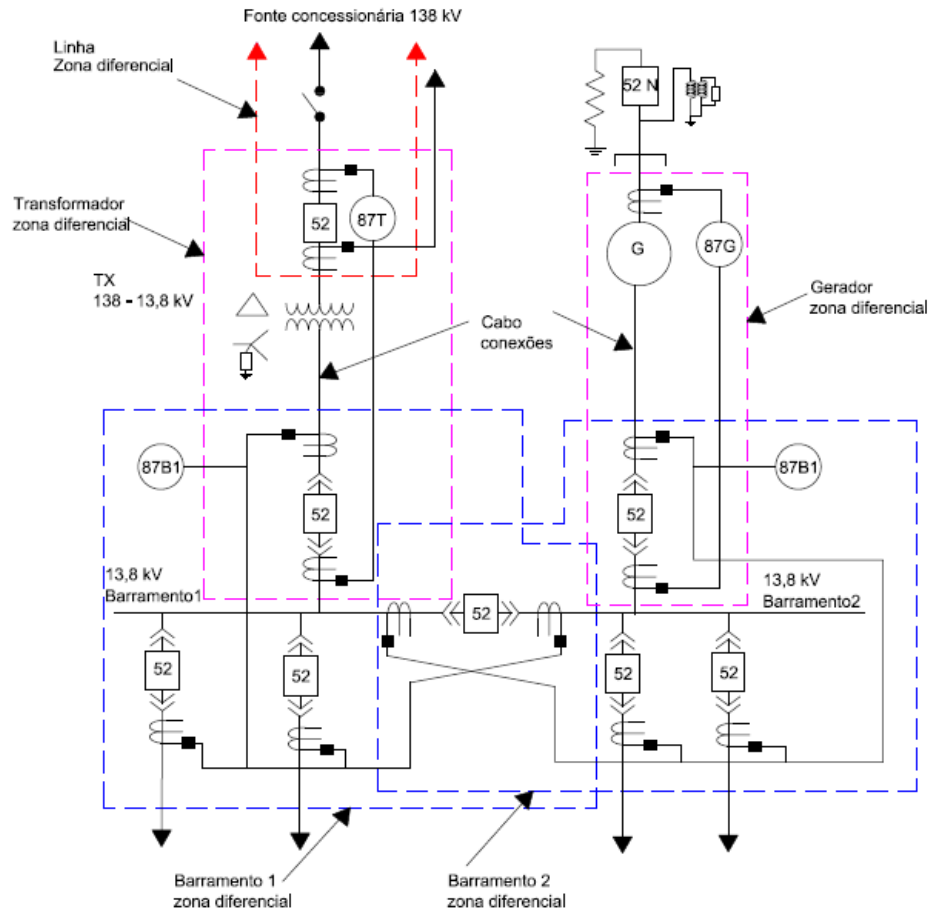
Ocorrendo a falta no quadro de manobra, por exemplo, durante a extração do disjuntor de alimentação (CB2 ou CB3), nenhum sinal de bloqueio será enviado ao disjuntor principal (CB1). Este disjuntor (CB1) detectando a falta e não recebendo nenhum sinal de bloqueio dos disjuntores alimentadores a jusante (CB2 ou CB3), seguindo a lógica de controle pré-estabelecida, atua instantaneamente. Nesse caso, os ajustes de tempo do disjuntor principal (CB1) são ignorados e a eliminação rápida da falta limita os efeitos associados ao arco elétrico.



**Figura 5.1 - Sistema elétrico utilizando ZSI**  
**Fonte: Adaptado Verstraten, Luchtenberg (2013)**

### 5.4.3 Relés diferenciais

Os relés diferenciais são importantes recursos de proteção utilizados na mitigação do arco elétrico e podem ser aplicados a equipamentos individuais ou um grupo de equipamentos, protegendo assim geradores, transformadores, motores, cabos, entre outros (DAS, 2012). A figura 5.2 mostra zona de proteção diferencial com proteção para transformador TX, gerador G, barramentos 1 e 2 de 13,8 kV e de linha, os cabos secundários do transformador TX e gerador G estão incluídos nas zonas diferenciais do transformador e gerador respectivamente. A localização dos transformadores de corrente (TC) determinam a zona de proteção diferencial e quais componentes e equipamentos estão sendo protegidos. Como exemplo, a zona de proteção diferencial do barramento 1, (87 B1) é delimitada pelo TC a montante do disjuntor secundário de transformador TX, dois TCs a jusante dos dois disjuntores dos alimentadores do barramento 1, e o TC instalado após disjuntor de interligação de barramentos.



**Figura 5. 2 - Zonas de proteção dos relés diferenciais**  
**Fonte: Adaptado Das (2012)**

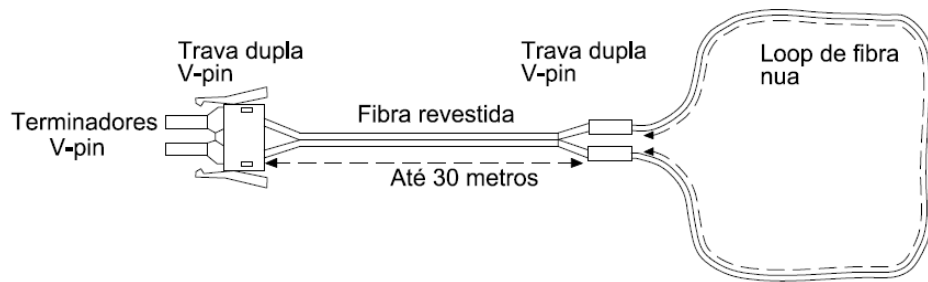
#### 5.4.4 Relés de Arco (AFD)

Os relés de detecção de arco captam a luz emitida durante o evento de arco elétrico e enviam o comando de disparo para os disjuntores para eliminar a falta. Os tempos de atuação dos AFDs são da ordem de  $\frac{1}{4}$  de ciclo com base na frequência de 60 Hz (DAS,2012).

Os sensores de luz mais comuns utilizados para captar a luz na ocorrência de um arco elétrico são os sensores de ponto e os *loops* de fibra ótica conforme ilustrações apresentadas nas figuras 5.3 e 5.4.



**Figura 5. 3 - Sensor de ponto**  
**Fonte: Adaptado Das (2012)**



**Figura 5. 4 - Sensor de fibra óptica**  
**Fonte: Adaptado Das (2012)**

Para realizar a proteção contra arco dos equipamentos, geralmente é utilizada uma combinação dos sensores de ponto e loops de fibra óptica. É de fundamental importância atentar para alocação dos sensores de modo que toda área do equipamento esteja adequadamente protegida. Conforme já citado, a exposição dos sensores ao evento de arco elétrico faz com que ele esteja sujeito a ondas de pressão, radiação intensa, alta temperatura, partículas ejetadas e plasma, e os sensores devem responder adequadamente e a informação enviada aos relés AFDs resultando no disparado imediato dos disjuntores (DAS, 2012).

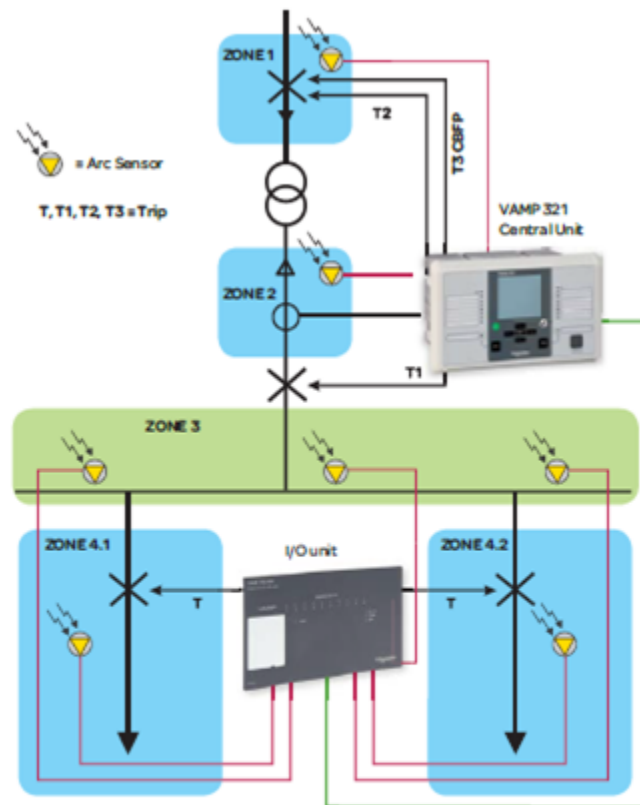
Alguns dos relés de proteção contra arco elétrico disponíveis no mercado e seus fabricantes são apresentados na sequência.

#### **5.4.4.1 Relés de Arco – Schneider Electric**

A Schneider Electric desenvolveu uma família de produtos com relés de proteção contra arco elétrico. São aparelhos que detectam arco elétrico em equipamentos de baixa e média tensão, isolam rapidamente a falta com arco e minimizam os riscos.

A família “VAMP” apresenta relés com proteção ultra-rápidos e flexíveis contra arco elétrico com unidades únicas de detecção ou sistemas multi-zona. Oferecem dispositivos rápidos e confiáveis para melhorar a segurança das instalações. Os modelos disponíveis são VAMP 120, VAMP 121, VAMP 221 e VAMP 321 com sistema de proteção que mede a corrente de falta e a luz através de sensores de arco (SCHNEIDER ELECTRIC, 2021).

A figura 5.5 apresenta a proteção de um barramento contra arco elétrico através de sensores instalados convenientemente e fazendo uso do modelo VAMP 321. São destacadas 4 zonas de proteção em que os sensores fazem o monitoramento do sistema.



Zona 1 - Compartimento de cabos do alimentador de entrada  
 Zona 2 - compartimento do disjuntor  
 Zona 3 - Compartimento de barramento  
 Zona 4 - Compartimentos do disjuntor e cabos terminais

**Figura 5. 5 - Relé de proteção contra arco elétrico, VAMP 321**

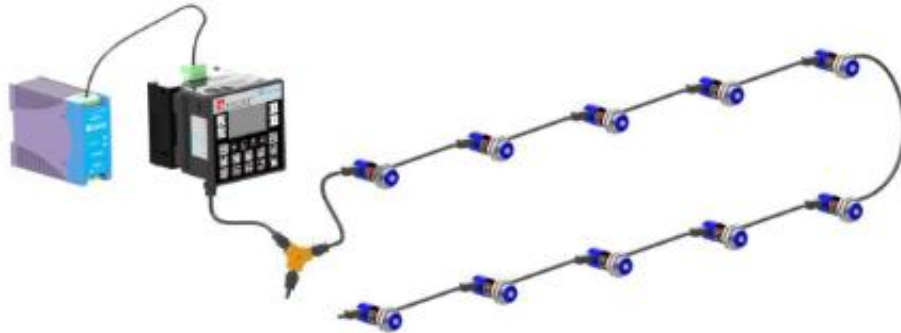
**Fonte: Adaptado Schneider Electric (2021)**

#### 5.4.4.2 Relés de Arco – Varixx

A Varixx desenvolveu o “ZYGGOT Arco” como sistema de proteção contra arco elétrico que faz uso de sensores inteligentes conectados em rede que detecta radiação ultravioleta para atuação e dispensa a leitura de corrente. As principais vantagens são (VARIXX, 2021):

- Mais rápido do mercado;
- Inovação tecnológica;
- Ângulo de detecção de 90°;
- Não atua com luz ambiente;
- Dispensa leitura de corrente; e
- Instalação simples e baixo custo.

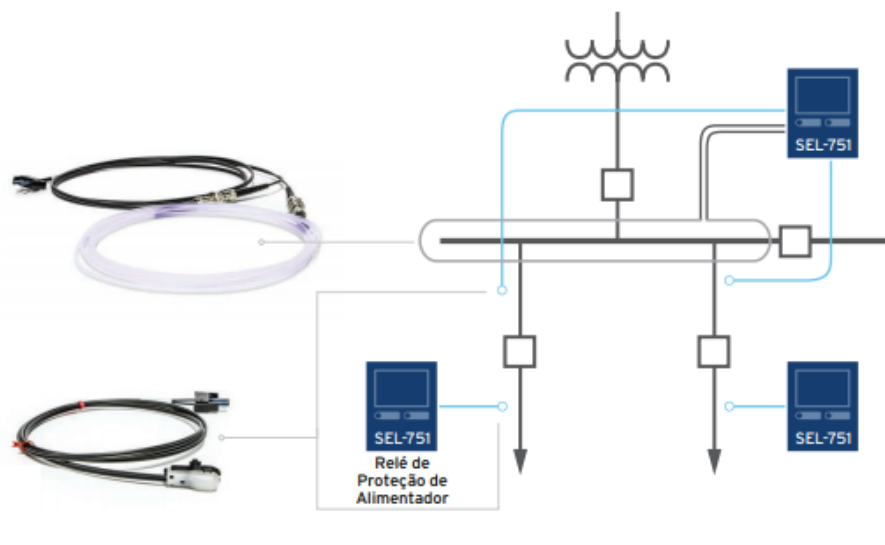
A figura 5.6 apresenta o modelo “ZYGGOT Arco” e mostra a conexão dos sensores em rede para proteção do sistema.



**Figura 5. 6 - Relé de proteção contra arco elétrico, ZYGGOT Arco**  
**Fonte: Adaptado Varixx (2021)**

#### 5.4.4.3 Relés de Arco – SEL

A SEL (*Schweitzer Engineering Laboratories*) apresenta um relé de proteção que combina a tecnologia de detecção de luz com uma proteção de sobrecorrente ultra-rápida para fornecer detecção de arco elétrico em alta velocidade. A figura 5.7 apresenta a proteção de um barramento com relés de proteção SEL instalados. O monitoramento é realizado por sensores de fibra ótica com revestimento transparente e sensores pontuais para detectar a luz proveniente do arco elétrico. Nesta configuração a proteção de sobre corrente assegura que o relé não desarme por outras fontes de luz, enquanto que os sensores de luz garante que o relé não desarme por uma falta externa (SEL, 2021).



**Figura 5. 7 - Relé de proteção contra arco elétrico, SEL-751**  
**Fonte: Adaptado SEL (2021)**



### 5.4.5 Configuração de Ajuste para Manutenção

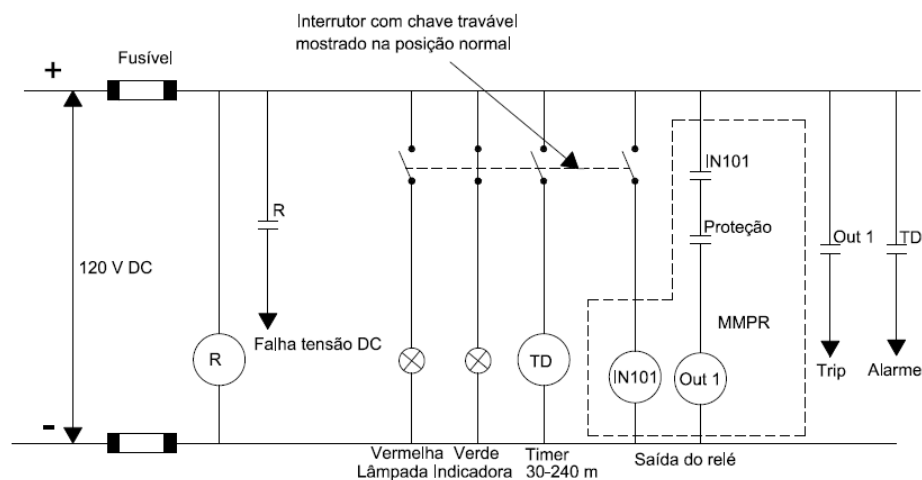
A configuração de ajuste para manutenção se baseia em reduzir tanto os ajustes das correntes de pick-up e como os tempos de eliminação de falta quando da realização de intervenções no sistema elétrico. Conforme descrito em (VERSTRATEN, LUCHTENBERG, 2013), uma chave externa aos painéis é utilizada para seleção do modo de operação de manutenção e os relés ou unidades de disparo passam a ter novas parametrizações. Após o acionamento da chave pelo técnico responsável pela manutenção, ela deve ser sinalizada com etiquetas e bloqueada para que a operação normal não venha a ser acionada de maneira equivocada. A conclusão do serviço de manutenção permite que o bloqueio seja removido e que a chave seja posicionada para operação normal, assim, os relés ou unidades de disparo tem suas parametrizações iniciais restabelecidas.

A figura 5.8, adaptada de (VERSTRATEN, LUCHTENBERG, 2013), destaca a etiquetagem do painel alertando o procedimento a ser realizado para serviços de manutenção, e também indicando o significado do posicionamento da chave nas posições 0 e 1, sendo operação normal e segurança habilitada respectivamente.

Um exemplo de diagrama de controle para conexão de uma chave seletora para o modo de manutenção e conectado a um MMPR (Relé Multifuncional Baseado em Microprocessador) é mostrado na figura 5.9. Ao colocar a chave na posição 1 o relé de entrada (IN101) é acionado, uma porta AND é formada pelo relé de entrada (IN101) e a proteção desejada, resultando numa saída direcionada para “Out 1”. O esquema conta também com um “*Timer*”, que tem a função de programar o tempo de operação de manutenção, caso a chave seletora não venha a ser posicionada em sua posição de operação normal, após o serviço de manutenção, um alarme é acionado de acordo com o tempo programado.



**Figura 5. 8 - Exemplo de chave de manutenção**  
**Fonte: Adaptado Verstraten, Luchtenberg (2013)**



**Figura 5. 9 - Diagrama de circuito de controle para conexões do interruptor no modo de manutenção**  
**Fonte: Adaptado Das (2012)**

A configuração de manutenção impõe ao sistema algumas alterações em relação ao seu funcionamento normal no tocante a seletividade, mas garante uma maior proteção aos operadores. Na sequência são apresentadas algumas observações de acordo com o exposto em (DAS, 2012).

- A seletividade é comprometida quando o modo de manutenção é acionado;

- O funcionamento de cargas e a partida de motores devem ser possíveis após a seleção do modo de manutenção;
- Executar a rotulagem do equipamento de acordo com o risco de arco elétrico. Neste caso dois cálculos são necessários, um para operação normal e outro para as configurações de manutenção, assim deve ser analisado qual rotulagem deve ser feita ou se as duas são necessárias.

#### 5.4.6 Afastamento das pessoas

As consequências do arco elétrico aos trabalhadores podem ser minimizadas com o afastamento das pessoas do local de operação ou manutenção dos equipamentos do sistema elétrico. Este afastamento é conseguido utilizando uma extensão na ferramenta, com o uso de robô ou dispositivo remoto. A figura 5.10, conforme (VERSTRATEN, LUCHTENBERG, 2013), destaca o modo de intervenção convencional em comparação com o uso de robô. Neste segundo caso não existe risco de trabalhadores serem expostos aos efeitos do arco elétrico já que operam o robô à distância.



**Figura 5. 10 - Operação utilizando robô e modo de operação convencional, direita e esquerda respectivamente**

**Fonte: Adaptado Verstraten, Luchtenberg (2013)**

#### 5.4.7 Práticas de segurança

Desenergizar o equipamento que sofrerá manutenção ou utilizar a intervenção remota são práticas de segurança eficazes para minimizar o risco de exposição ao arco elétrico. Caso a desenergização não seja possível, os trabalhadores devem estar vestidos com os

equipamentos de proteção individual adequados, que atendam a classificação de risco calculada pelo estudo de arco elétrico.

## **5.5 Equipamentos resistentes a arco**

Os equipamentos resistentes a arco são desenvolvidos e testados para garantir a segurança do trabalhador que venha a estar nas proximidades do equipamento. Mas isso não quer dizer que medidas de proteção suplementares não devam ser implementadas. Logo, proteções como relés AFDs e proteção diferencial complementam a proteção dos trabalhadores e equipamentos reduzindo em nível de energia incidente (DAS, 2012).

A especificação dos equipamentos resistentes a arco segue a norma ABNT NBR 62271-200, e são apresentados em (MARDEGAN, PARISE, 2018). Os equipamentos possuem uma mantissa e ela descreve as características do equipamento. A mantissa é composta por informações sobre a classe de continuidade do serviço, classe de compartimentação, se o equipamento é resistente a arco e a acessibilidade do painel.

### **5.5.1 Classe de continuidade de serviço (LSC – *Loss of Service Continuity*)**

A primeira parte da mantissa apresenta a classe de continuidade de serviço e a quantidade de compartimentos internos. A norma ABNT NBR 62271-200 prevê duas designações, a primeira sendo LSC2 (perda da continuidade de serviço tipo 2) e a segunda sendo LSC1 (perda de continuidade de serviço tipo 1). Painéis que possuem o compartimento de barramentos e outros compartimentos são do tipo LSC2. Já os que não possuem esta característica são do tipo LSC1.

### **5.5.2 Classe de compartimentação (PM)**

A segunda parte da mantissa apresenta a classe de compartimentação e dá informação sobre o tipo de material utilizado nas divisões, compartimentos internos e guilhotinas. Os tipos de compartimentos, divisões internas e guilhotinas podem ser PM (partições feitas de material metálico) e PI (partições feitas de material isolante).

### 5.5.3 Classe de arco interno

A terceira parte da mantissa apresenta a classe do arco interno e se aquele painel foi ou não ensaiado para suportar arco interno, assim, caso o painel tenha sido ensaiado é utilizado o termo IAC (*internal arc cubicle*).

### 5.5.4 Classe de acessibilidade do painel

A quarta parte da mantissa apresenta a acessibilidade ao painel e informa sobre a acessibilidade permitida ao redor do painel. Esta quarta classe apresenta primeiro se a acessibilidade é restrita a pessoas autorizadas ou se a acessibilidade é irrestrita, sendo classificadas com as letras A e B respectivamente. Após esse termo de acessibilidade é informado quais os lados as pessoas podem transitar, sendo as classificações R (*Rear* – traseira), L (*Lateral* – Lateral) e F (*Frontal* – Frontal).

Para exemplificar a codificação de uma mantissa, a análise de um painel que possua compartimentos de barramentos e disjuntores, material metálico entre partições, tenha sido ensaiado para suportar arco elétrico, possua acessibilidade irrestrita e permita o trânsito de pessoas pelas partes frontal e lateral do painel, resulta na mantissa: LSC2-PM-IAC-BFL.

## 5.6 Considerações sobre a Norma NFPA-70E

A norma NFPA 70E se divide em três capítulos e uma série de anexos que foram incluídos para fins informativos e que não fazem parte dos requisitos da norma. Os três capítulos contemplam segurança elétrica no local de trabalho e requisitos de manutenção relacionados à segurança (NFPA, 2012), conforme estrutura apresentada na tabela 5.1.

**Tabela 5. 1 - Disposições da Norma NFPA 70E**

<b>Capítulo 1</b> - Práticas de Trabalho Relacionadas à Segurança	Aplica-se geralmente à segurança elétrica no local de trabalho
<b>Capítulo 2</b> - Requisitos de manutenção relacionados à segurança	Requisitos de manutenção relacionados à segurança
<b>Capítulo 3</b> - Requisitos de segurança para equipamentos especiais	Requisitos de segurança para equipamentos especiais; complementa e / ou modifica o Capítulo 1
<b>Anexos</b>	Os anexos são incluídos para fins informativos

**Fonte: Adaptado NFPA (2012)**

Para evitar que trabalhadores sofram queimaduras de terceiro grau ou mais, as vestimentas de proteção são constituídas por tecidos especiais. O desempenho destes tecidos

contra arco elétrico é medido pelo indicador ATPV (*Arc Thermal Protection Value*). Este indicador é definido como a energia incidente sobre um material (ou sistema multicamadas) que resulta em uma probabilidade de 50% de transferência de calor por meio de um espécime testado e que pode causar uma queimadura de segundo grau na pele humana, baseado na curva de Stoll (curva utilizada para prever o aparecimento de uma queimadura de segundo grau) (QUEIROZ, SENGER, 2012).

Para auxiliar a proteção dos trabalhadores contra arcos elétricos, os equipamentos de proteção individual (EPI) devem estar adequadamente especificados sendo respeitados os cálculos referentes à energia incidente liberada quando da ocorrência do arco elétrico. Atenção especial deve ser dada ao armazenamento e limpeza dos EPIs para que as condições de armazenagem e limpeza não venham a comprometer a integridade dos equipamentos e colocar os trabalhadores em maior risco.

As roupas com classificação de arco devem permitir movimento e visibilidade para o trabalhador, além de proteger todas as roupas inflamáveis que estiver utilizando. A proteção fornecida pelos EPIs é para as áreas da cabeça (cabeça, rosto, pescoço e queixo), proteção para os olhos, proteção auditiva, proteção corporal, proteção para mãos e braços e proteção para os pés.

Como forma alternativa aos cálculos da energia incidente no sistema em análise, a NFPA 70E apresenta duas tabelas, Tabela 130.7(C)(a) e Tabela 130.7(C)(b) (NFPA 70E, 2012), que descrevem uma série de tarefas realizadas em equipamentos energizados. As tabelas determinam a categoria de perigo/risco, se a tarefa necessita do uso de luvas de borracha e se existe a necessidade de isolamento em ferramentas manuais. A Tabela 130.7(C)(a) apresenta as classificações de categoria de perigo/risco para equipamentos em corrente alternada e a Tabela 130.7(C)(b) trás as classificações de categoria de perigo/risco para equipamentos de corrente contínua. Ressalta-se que estas tabelas não são apresentadas neste trabalho.

### **5.6.1 Classificação da categoria de risco/perigo conforme “NFPA 70E – 2012” (NFPA 70E, 2012)**

A identificação da categoria de perigo/risco para a tarefa em análise permite que seja utilizada a Tabela 130.7(C)(16) conforme (NFPA 70E, 2012) e sejam determinados os EPIs necessários para realização da tarefa. A Tabela 5.2 apresenta as categorias de perigo/risco e as

roupas de proteção e os EPIs necessários para realização da tarefa, destacando a suportabilidade mínima das vestimentas dadas em (cal/cm<sup>2</sup>).

**Tabela 5. 2 - Vestimentas de Proteção e Equipamentos de Proteção Individual (EPI) conforme a categoria de risco**

<b>CATEGORIA DE RISCO</b>	<b>VESTIMENTA DE PROTEÇÃO</b>
<b>0</b>	<p><b>Vestimenta de proteção, fibra natural não tratada (por exemplo, algodão não tratado, lã, nylon, mistura desses materiais), com gramatura mínima de 0,0152 g/cm<sup>2</sup></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Camisas (manga comprida)</li> <li>• Calças (compridas)</li> </ul> <p><b>Equipamento de proteção</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Óculos de segurança</li> <li>• Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo)</li> <li>• Luvas de couro, quando necessário.</li> </ul>
<b>1</b>	<p><b>Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 4 cal/cm<sup>2</sup> (16,736 J/cm<sup>2</sup>)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Camisas e calças compridas resistentes a arco ou macacão resistente a arco</li> <li>• Protetor facial resistente a arco ou capuz carrasco resistente a arco</li> </ul> <p><b>Equipamento de proteção</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacete</li> <li>• Óculos de segurança</li> <li>• Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo)</li> <li>• Luvas de couro</li> <li>• Sapato de segurança em couro, quando necessário</li> </ul>
<b>2</b>	<p><b>Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 8 cal/cm<sup>2</sup> (33,472 J/cm<sup>2</sup>)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Camisas e calças compridas resistentes a arco ou macacão resistente a arco</li> <li>• Protetor facial resistente a arco ou capuz carrasco resistente a arco e balaclava resistente a arco</li> <li>• Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário</li> </ul> <p><b>Equipamento de proteção</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacete</li> <li>• Óculos de segurança</li> <li>• Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo)</li> <li>• Luvas de couro</li> <li>• Sapato de segurança em couro, quando necessário</li> </ul>
<b>3</b>	<p><b>Vestimenta resistente a arco elétrico selecionada, de modo que atenda a classificação de arco mínima de 25 cal/cm<sup>2</sup> (104,6 J/cm<sup>2</sup>)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Camisas de manga comprida resistente a arco, quando requerida</li> <li>• Calças compridas resistentes a arco, quando</li> </ul>

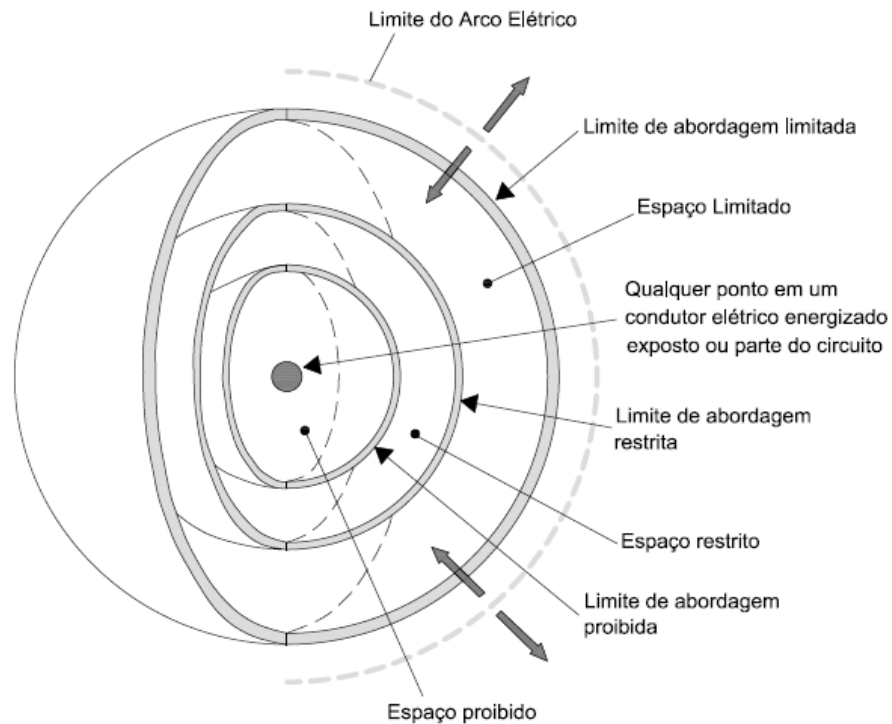
	<p>requerida</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Macacão resistente a arco, quando requerido</li> <li>• Jaqueta resistente a arco elétrico, quando requerida</li> <li>• Capuz carrasco resistente a arco</li> <li>• Luvas resistentes a arco</li> <li>• Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário</li> </ul> <p><b>Equipamento de proteção</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacete</li> <li>• Óculos de segurança</li> <li>• Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo)</li> <li>• Sapato de segurança em couro, quando necessário</li> </ul>
4	<p><b>Vestimenta resistente a arco elétrico selecionada, de modo que atenda a classificação de arco mínima de 40 cal/cm<sup>2</sup> (167,36 J/cm<sup>2</sup>)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Camisas de manga comprida resistente a arco, quando requerida</li> <li>• Calças compridas resistentes a arco, quando requerida</li> <li>• Macacão resistente a arco, quando requerido</li> <li>• Jaqueta resistente a arco elétrico, quando requerida</li> <li>• Capuz carrasco resistente a arco</li> <li>• Luvas resistentes a arco</li> <li>• Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário</li> </ul> <p><b>Equipamento de proteção</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacete</li> <li>• Óculos de segurança</li> <li>• Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo)</li> <li>• Sapato de segurança em couro, quando necessário</li> </ul>

Fonte: Adaptado NFPA (2012)

### 5.6.2 Distâncias limites de aproximação conforme NFPA 70E – 2012

A NFPA 70E disponibiliza em seu Anexo C um informativo sobre as distâncias a serem respeitadas, de condutores elétricos energizados ou partes do circuito, por pessoas qualificadas e não qualificadas e que tenham sua segurança garantida. O limite de proteção de arco elétrico é destacado na Figura 5.11 e deve ser determinado pelos cálculos dos parâmetros do arco elétrico. São destacados na figura os limites de abordagem limitada, restrita e proibida e também são destacados os espaços correspondentes a cada limite.





**Figura 5. 11 - Limites de aproximação**  
**Fonte: Adaptado NFPA (2012)**

Pessoas não qualificadas devem respeitar o limite de abordagem limitada para que estejam em segurança, e, além disso, respeitar o limite do arco elétrico calculado de acordo com os parâmetros do circuito. Somente podem cruzar o limite de arco elétrico se estiverem usando vestimentas adequadas e estejam sob a supervisão de uma pessoa qualificada.

Pessoas qualificadas ao ultrapassarem o limite de aproximação de arco elétrico devem utilizar equipamentos de proteção adequados para arco elétrico. Somente deve cruzar o limite de aproximação limitado os trabalhadores qualificados para realizar a tarefa. Para acesso ao espaço restrito os profissionais devem ter um plano documentado e aprovado pela gerência, usar equipamento de proteção individual apropriado, certificar que nenhuma parte do corpo entre no espaço proibido e minimizar o risco de movimento inadvertido mantendo o máximo possível do corpo fora do espaço restrito (NFPA 70E, 2012).

O acesso ao espaço proibido, com o trabalhador cruzando o limite de aproximação proibido, devem ser pessoas qualificadas e atender e cumprir alguns requisitos, conforme (NFPA 70E, 2012):

- (1) Ter treinamento específico para trabalhar em condutores energizados ou partes de circuito;

- (2) Ter um plano documentado justificando a necessidade de trabalhar perto de condutores energizados expostos ou partes do circuito;
- (3) Realizar uma análise de risco prévia;
- (4) Ter o plano e a análise de risco aprovados pela gerência; e
- (5) Usar equipamento de proteção individual apropriado para trabalhar em condutores energizados expostos ou peças do circuito e também classificado para o nível de tensão e energia envolvido.

### **5.6.3 Rotulagem de equipamentos conforme “NFPA 70E – 2012” (NFPA 70E, 2012)**

Os equipamentos elétricos tais como quadros de distribuição, painéis de distribuição, painéis de controle industrial, centros de controle de motores, etc..., e que sejam operados enquanto energizados, devem ser etiquetados e apresentar as seguintes informações.

#### **1. Pelo menos uma das seguintes**

- Energia incidente calculada e a correspondente distância de trabalho
- Avaliação mínima da roupa de proteção contra arco
- Nível necessário de EPI
- Mais alta categoria de perigo/risco para o equipamento

#### **2. Tensão nominal do sistema**

A figura 5.12 apresenta um exemplo de etiqueta alertando e informando ao trabalhador qual o risco/perigo ao qual ele está sujeito ao operar aquele equipamento energizado, conforme (SKM, 2019).

São apresentados na etiqueta o limite de arco elétrico, a energia incidente ao qual estará exposto, a categoria de risco e as vestimentas que devem ser utilizadas, tensão de operação e aos demais limites de aproximação conforme figura 5.11.



 <b>WARNING</b>					
<b>Arc Flash and Shock Hazard</b>					
<b>Appropriate PPE Required</b>					
<b>543 mm</b>		Flash Hazard Boundary			
<b>1.6 cal/cm<sup>2</sup></b>		Flash Hazard at <b>457 mm</b>			
<b>Category 1</b>		FR Shirt & Pants			
<b>480 VAC</b>		Shock Hazard when cover is removed			
<b>00</b>		Glove Class			
<b>1067 mm</b>		Limited Approach			
<b>305 mm</b>		Restricted Approach			
<b>25 mm</b>		Prohibited Approach			
<b>Location:</b>		<b>MCC 1A</b>			
		<b>SKM Systems Analysis, Inc.</b> 1040 Manhattan Beach Blvd., Manhattan Beach, CA 90266 (800) 232-6789			
<b>Job#:</b>	<b>232874</b>	<b>Prepared on:</b>	<b>12/09/07</b>	<b>By:</b>	<b>Engineer</b>
Warning: Changes in equipment settings or system configuration will invalidate the calculated values and PPE requirements					

Figura 5. 12 - Etiquetagem após realização do estudo de arco elétrico  
Fonte: SKM (2019)

## 5.7 Considerações finais

Embora o estudo de arco elétrico tenha o intuito de determinar a energia incidente nos painéis do sistema, este não é o seu objetivo principal, mas sim, a identificação das causas que dão origem ao nível de energia incidente nos pontos estudados e quais medidas mitigam os riscos por arco elétrico (GALINDO, 2015).

Neste contexto, as medidas apresentadas nesse capítulo visam fornecer uma visão completa dos aspectos importantes a serem avaliados e implementados nos sistemas elétricos industriais com objetivo de mitigar os efeitos do arco elétrico.

## **6 PROPOSTA DE CÁLCULO DO ARCO ELÉTRICO CONSIDERANDO DECAIMENTO AC**

### **6.1 Considerações iniciais**

De modo geral, os softwares disponíveis comercialmente realizam os cálculos do arco elétrico baseados na análise de curto-circuito de duas maneiras: (1) sem considerar o decaimento AC das correntes de contribuição de motores e geradores, e (2) considerando tal decaimento de forma simplificada, selecionando previamente o tempo de contribuição de tais equipamentos (DAS, 2012). Os softwares disponíveis comercialmente geralmente permitem a seleção entre as metodologias ANSI/IEEE ou IEC para cálculo das correntes de curto-circuito, e posteriormente aplicação do método para determinar a energia incidente.

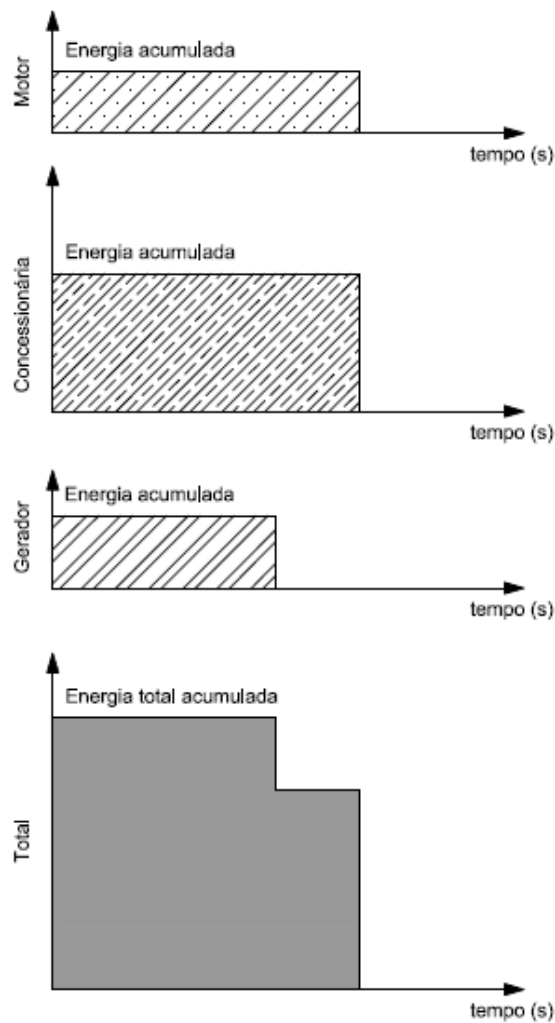
Para uma avaliação mais precisa do arco elétrico, um terceiro método de análise é apresentado em (DAS, 2012), cujo objetivo é buscar aproximar os resultados obtidos na análise a uma situação mais próxima da real.

Neste contexto, o objetivo deste capítulo é propor e desenvolver um *script* em Matlab de modo considerar de forma mais precisa no cálculo da energia incidente tanto o decaimento do módulo da corrente de curto como a sua influência no tempo de atuação da proteção tempo dependente.

### **6.2 Métodos de cálculo para corrente de curto-circuito e arco elétrico**

#### **6.2.1 Método 1 – Não considera o Decaimento AC**

Este método de cálculo considera como sendo constante a contribuição de corrente de falta franca de motores e geradores. O perfil da energia incidente acumulada proveniente de motores, geradores e concessionária é mostrado conforme figura 6.1. A energia incidente é calculada até o momento de atuação dos dispositivos de proteção.



**Figura 6. 1 – Cálculo da energia incidente sem considerar o decaimento AC das correntes de curto-circuito**

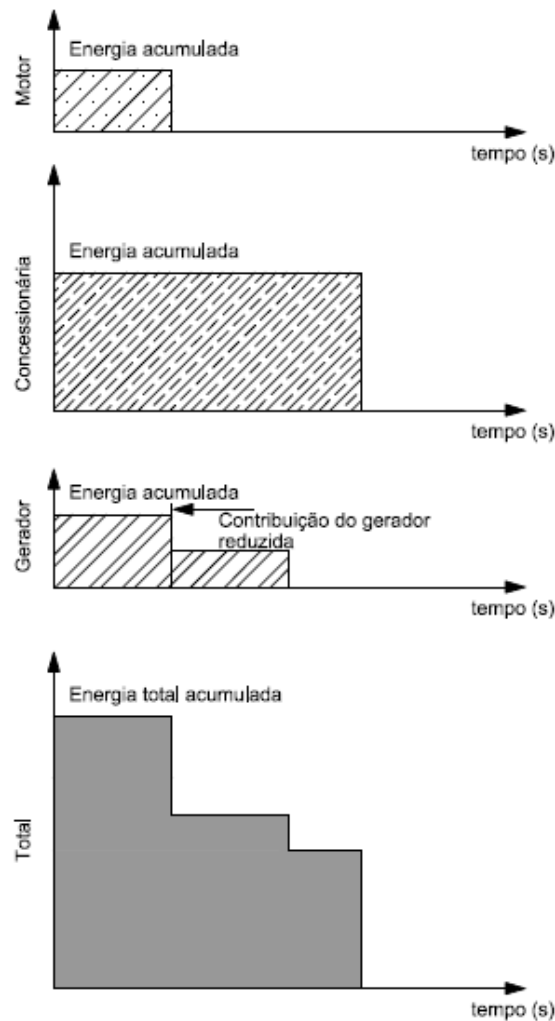
**Fonte: Adaptado DAS (2012)**

A energia total acumulada corresponde à soma das contribuições de energias incidentes geradas por motores, geradores e concessionária, conforme mostrado na figura 6.1. O resultado deste método de cálculo da energia incidente total liberada é conservador e reflete na escolha de dispositivos de proteção individual dos trabalhadores com maior grau de proteção. Embora, tal escolha venha a trazer maior proteção aos trabalhadores, roupas mais pesadas podem dificultar o trabalho de operação e manutenção do sistema.

### **6.2.2 Método 2 – Considera o Decaimento AC de Forma Simplificada**

Este método possibilita considerar de forma simplificada o decaimento AC das correntes de curto-circuito reduzindo as contribuições de geradores e motores, selecionando o tempo de contribuição de cada um destes equipamentos e com a redução na intensidade da

corrente de curto-circuito do gerador. Este artifício representa uma tentativa de considerar o decaimento AC das correntes de curto-circuito e aproximar o resultado dos cálculos da energia incidente total liberada para situação real. Como pode-se observar, a figura 6.2 considera menor tempo de contribuição do motor em relação à figura 6.1, além de considerar a contribuição da corrente de curto-circuito do gerador em dois patamares.



**Figura 6. 2 - Cálculo da energia incidente considerando de forma simplificada o decaimento AC das contribuições de correntes de curto-circuito**

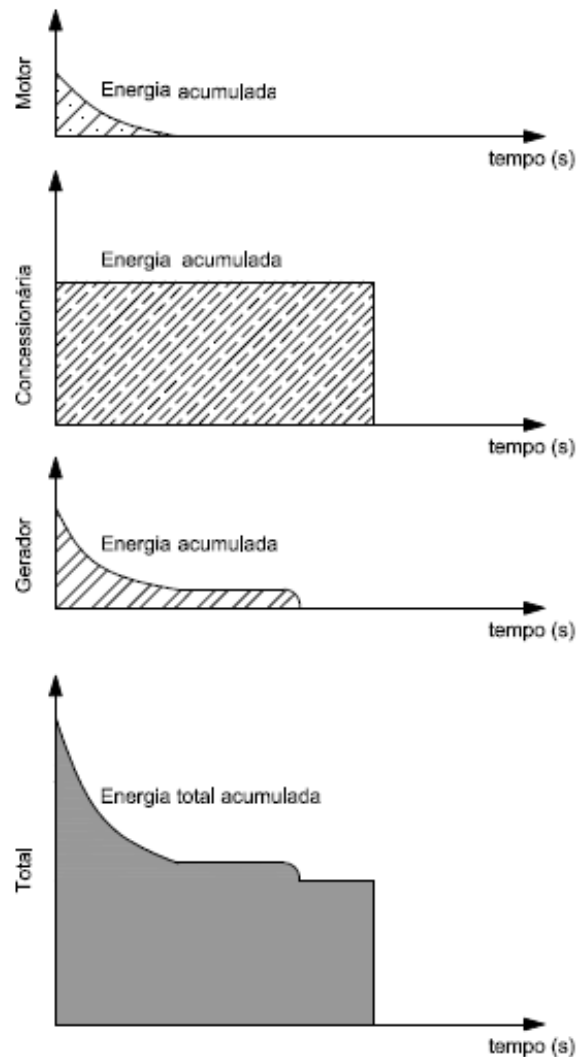
**Fonte: Adaptado DAS (2012)**

O perfil da energia incidente total mostrado na figura 6.2 apresenta uma melhor representação da energia incidente real, mas ainda apresenta um resultado conservador.

### 6.2.3 Método 3 – Considera o Decaimento AC de Forma Detalhada

Neste método os perfis das curvas de energia incidente provenientes do gerador, motor e concessionária são apresentados na figura 6.3, assim como o perfil da energia incidente total

considerando a contribuição de todas as fontes. Esta energia acumulada apresenta uma melhor representação da energia incidente real liberada quando da ocorrência de um arco elétrico.



**Figura 6.3 - Cálculo da energia incidente considerando de forma detalhada o decaimento AC das correntes de curto-circuito**  
**Fonte: Adaptado DAS (2012)**

### **6.3 Proposta Cálculo do Arco Elétrico considerando o Decaimento AC**

Conforme já citado, inicialmente este método considera o decaimento AC das contribuições de corrente de geradores e motores na obtenção da corrente de curto-circuito total. Uma vez obtida a corrente total, calcula-se a corrente de arco e a energia incidente conforme proposta apresentada em (DAS, 2012). Os seguintes passos devem ser seguidos:

- Obter as contribuições de corrente de curto-circuito dos geradores e motores considerando o decaimento AC em cada ponto de falta;

- Obter a corrente total de falta em cada barramento de interesse, somando-se no tempo todas as contribuições de corrente, incluindo a da concessionária;
- Dividir a curva da corrente de curto-circuito em segmentos apropriados para melhor retratar o decaimento da corrente;
- Obter a corrente de curto-média em cada segmento;
- Calcular a energia liberada em cada segmento considerando as equações dos guias IEEE 1584;
- Realizar a soma da energia em cada intervalo para obter a energia incidente total.

Os passos descritos anteriormente foram implementados em *scripts* no software MATLAB considerando as versões 2002 e 2018 do guia IEEE Std 1584.

### 6.3.1 Obtenção das Correntes de Decaimento de Geradores e Motores

As equações utilizadas para calcular as correntes de curto-circuito de geradores e motores são apresentadas nos tópicos a seguir e consideram o decaimento.

#### 6.3.1.1 Gerador Síncrono

A máquina síncrona pode ser representada por um circuito equivalente, e são avaliados os períodos subtransitório, transitório e de estado estacionário logo após a ocorrência de um curto-circuito. A corrente de curto-circuito nos terminais de um gerador síncrono pode ser obtida a partir da equação (6.1).

$$i_a = \sqrt{2} * E \left[ \left( \frac{1}{x_d} \right) * \sin(Wt + \delta) + \left( \frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) * e^{\left( \frac{-t}{T'_d} \right)} * \sin(Wt + \delta) + \left( \frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) * e^{\left( \frac{-t}{T''_d} \right)} * \sin(Wt + \delta) - \frac{(x''_d - x_q'')}{2 * x_d'' * x_q''} * e^{\left( \frac{-t}{T_a} \right)} * \sin(\delta) - \frac{(x''_d - x_q'')}{2 * x_d'' * x_q''} * e^{\left( \frac{-t}{T_a} \right)} * \sin(2Wt + \delta) \right] \quad (6.1)$$

Os termos da equação (6.1) representam a corrente de curto circuito de estado estacionário final, corrente transitória e subtransitória decaindo com frequência nominal, corrente DC decrescente e corrente decaindo com frequência dupla da fundamental, respectivamente.



Ignorando os termos no eixo em quadratura, a corrente de curto-circuito do gerador síncrono pode ser modelada conforme equação (6.2) (DAS, 2012).

$i_{AC}$  = Decaimento da componente subtransitória + Decaimento da componente transitória + componente de estado estacionário

$$i_{AC} = \left( \frac{E''}{X_d''} - \frac{E'}{X_d'} \right) * e^{\left( -t/T_d'' \right)} + \left( \frac{E'}{X_d'} - \frac{V_a}{X_d} * \left( \frac{i_F}{i_{Fg}} \right) \right) * e^{\left( -t/T_d' \right)} + \frac{V_a}{X_d} * \left( \frac{i_F}{i_{Fg}} \right) \quad (6.2)$$

Onde:

$E''$ : tensão interna do gerador atrás da reatância subtransitória;

$E'$ : tensão interna do gerador atrás da reatância transitória;

$V_a$ : é a tensão terminal do gerador;

$i_F$ : é a corrente de campo em dadas condições de carga (quando a ação do regulador é levada em consideração);

$i_{Fg}$ : é a corrente de campo em tensão nominal sem carga.

$X_d''$ : é a reatância subtransitória de eixo direto;

$X_d'$ : é a reatância transitória de eixo direto;

$T_d''$ : constante de tempo do período subtransitório;

$T_d'$ : constante de tempo do período transitório;

### 6.3.1.2 Motor de Indução

O decaimento AC das correntes de curto circuito nos motores de indução pode ser representado conforme equação (6.3) (DAS, 2012).

$$i_{AC} = \frac{E}{X''} * e^{\left( -t/T'' \right)} \quad (6.3)$$

Onde:

$E$ : é a tensão pré-falta atrás da reatância subtransitória  $X''$ ;

$X''$ : é reatância subtransitória do motor;

$T''$ : é a constante de tempo subtransitória.

### 6.3.2 Obtenção do tempo de atuação da proteção

Para determinar o tempo de atuação da proteção, é utilizada a metodologia proposta em (SILVEIRA, 1991).

A determinação do tempo de atuação dos relés de proteção, parte da escolha da curva característica Múltiplo de Corrente de “Tape” x Tempo (Mxt). Estas curvas podem ser Normalmente Inversa (NI), Muito Inversa (MI), Extremamente Inversa (EI) e de Tempo Longo (TL), conforme equação (6.4) (SILVEIRA, 1991).

$$t = \frac{K_d * K_1}{M^{n-1}} = \frac{K}{M^{n-1}} \quad (6.4)$$

Onde:

$t$ : Tempo de operação;

$K_d$ : Constante definida pelo dial de tempo (0,1 a 1,0);

$K_1$ : Constante dependente da curva;

$M$ : Múltiplo da corrente de “tape” (“pick up”);

$n$ : Constante dependente da curva;

$K$ : Constante =  $K_d * K_1$ .

As constantes “ $K_1$ ” e “ $n$ ” são atribuídas à equação (6.4) assim que a curva característica de atuação do relé é selecionada. Estes valores são apresentados na Tabela 6.1.

**Tabela 6. 1 - Constantes características Mxt (SILVEIRA, 1991)**

Curva	$K_1$	$n$
NI	0,14	0,02
MI	13,5	1,0
EI	80,0	2,0
TL	120,0	1,0

**Fonte: Adaptado Silveira (1991)**

O múltiplo “ $M$ ” da corrente de tape conforme apresentado na equação é dado pela equação (6.5).

$$M = \frac{I_{ef}}{I_{pk}} \quad (6.5)$$

Onde:

$I_{ef}$ : Valor eficaz da corrente de falta;

$I_{pk}$ : Corrente de “pick up” ajustada para o relé;

A equação (6.4) deve ser adaptada para determinar o instante em que o relé dará o comando de disparo para o disjuntor, pois na ocorrência de um defeito à variação da corrente de falta implica na variação do múltiplo “M” conforme demonstrado em (SILVEIRA, 1991). Assim, é necessário realizar uma integração para determinar o instante “t” que o dispositivo efetivamente atuará.

O desenvolvimento matemático e as considerações necessárias para determinar o instante “t” de atuação dos dispositivos de proteção são detalhados em (SILVEIRA, 1991), mas não são reproduzidos aqui. Uma técnica de integração numérica e uso do método trapezoidal foram usados para o desenvolvimento mencionado, resultando na condição apresentada na equação (6.6) e que deve ser satisfeita para determinar o tempo de disparo do dispositivo de proteção.

$$[M^n(t_1) - 1] + [M^n(t_2) - 1] + \dots + [M^n(t_p) - 1] \geq kk \quad (6.6)$$

$$kk = \frac{K_1 * K_d}{\Delta t} \quad (6.7)$$

Onde:

- $\Delta t$ : Intervalo de amostragem.

O intervalo de amostragem considerado neste trabalho é de 1 ciclo da frequência da rede elétrica (60 Hz), logo, a equação (6.7) pode ser reescrita conforme equação (6.8).

$$kk = K_1 * K_d * f \quad (6.8)$$

Portanto, o somatório da equação (6.6) deve ser realizado, e, a cada intervalo de amostragem a parcela  $(M^n - 1)$  é acumulada e comparada à constante “kk”, assim, o sinal de disparo será enviado ao disjuntor quando o somatório exceder o valor de “kk”.

O número de amostragens necessárias para o relé enviar o sinal de disparo, é obtido através de um contador implementado em script desenvolvido em MATLAB, permitindo a determinação da corrente de arco e energia incidente no barramento em estudo.

Para exemplificar o que foi exposto anteriormente, considere o fluxograma apresentado na figura 6.4. Nele, primeiro é definida a curva característica de atuação do relé, o tempo de amostragem e calculada a constante de comparação (“kk”). Na sequência, é calculado o tempo de atuação dos dispositivos de proteção através do contador (“cont”) e aplicação da equação (6.6).

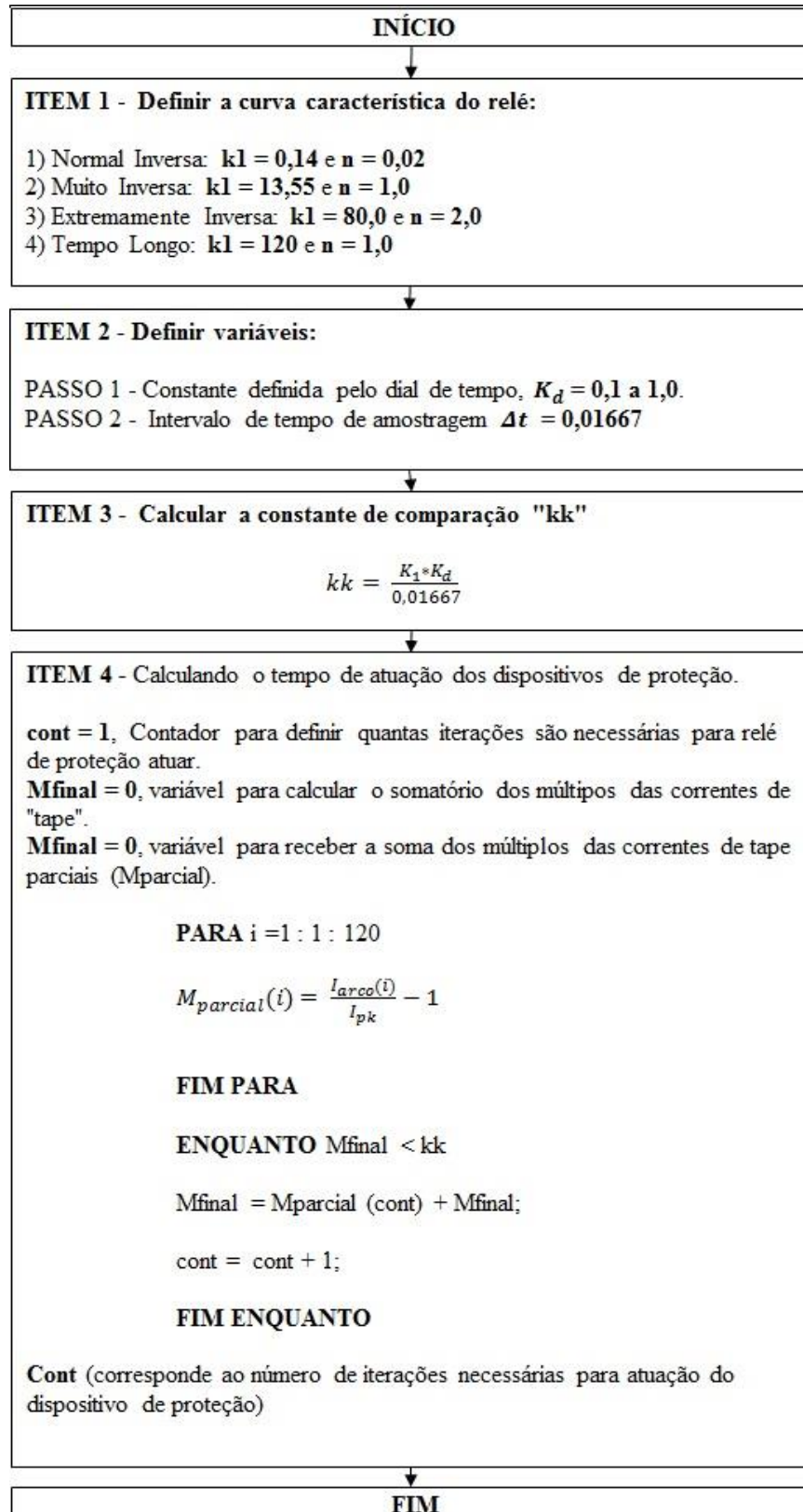


Figura 6. 4 - Fluxograma para determinar o tempo de atuação dos dispositivos de proteção  
Fonte: Elaborado pelo autor

O intervalo de amostragem ( $\Delta t$ ) considerado é de 0,01667 s, correspondendo ao período de 1 ciclo da frequência da rede elétrica (60 Hz). O tempo máximo de atuação do dispositivo de proteção considerado em algoritmos para cálculo do arco elétrico é de 2s. Quando utilizado o intervalo de amostragem ( $\Delta t = 0,01667$  s) como passo para discretização no tempo, um vetor de tempo de 121 posições é gerado.

$$t = [0 \ 0,01667 \ 0,03333 \ \dots \ 1,98333 \ 2].$$

De posse do número de amostras (“cont”) necessárias para que o dispositivo de proteção forneça o sinal de disparo para o disjuntor, o tempo de atuação é conhecido e a energia incidente liberada no barramento com falta pode ser determinada.

Vale ressaltar que, este procedimento para determinar o tempo de disparo do dispositivo de proteção, é realizado para cada dispositivo de proteção em que a corrente flua e que contribua para a falta no barramento em estudo.

### **6.3.3 Obtenção da corrente em cada intervalo**

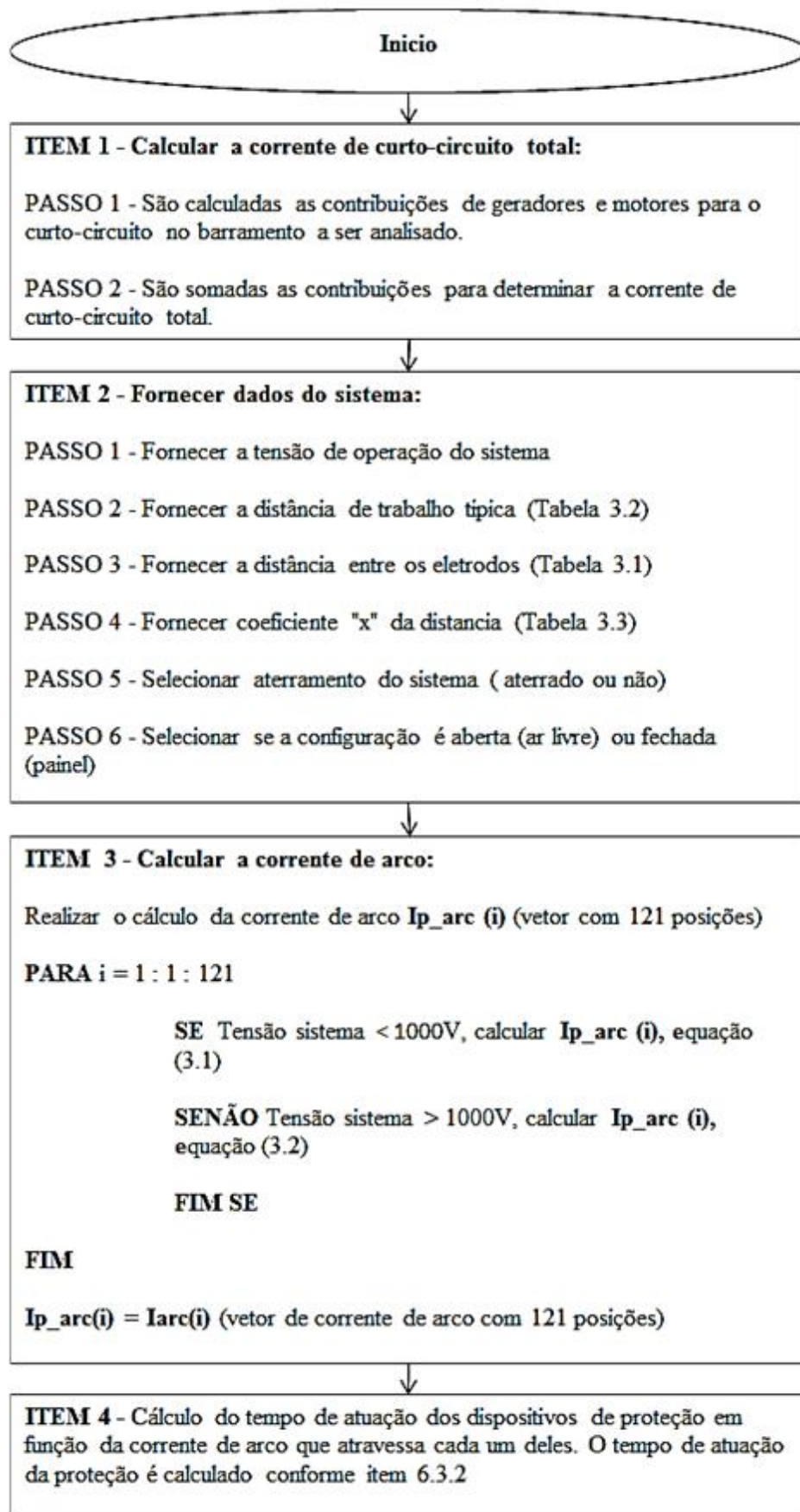
A corrente de curto-circuito utilizada para realizar os cálculos necessários é obtida para cada célula do vetor de tempo “t” gerado e apresentado na seção anterior. Esta corrente é mantida constante até que nova corrente seja calculada.

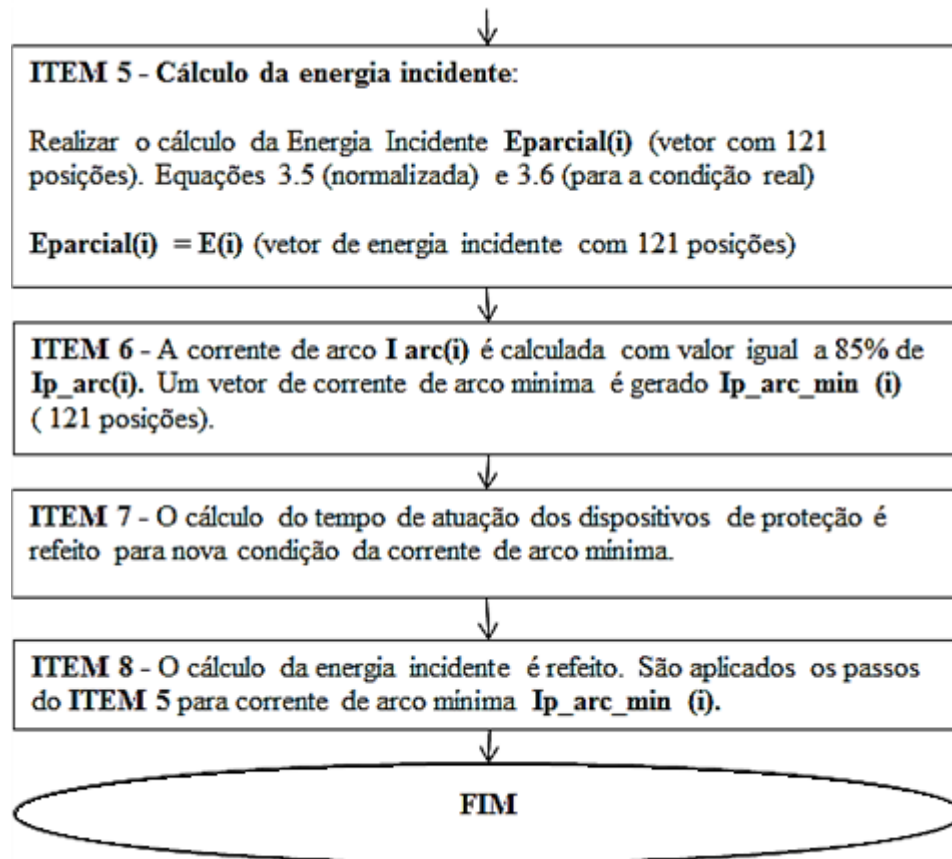
### **6.3.4 Cálculo da energia liberada em cada segmento e energia incidente total**

O cálculo da energia incidente liberada a cada intervalo é realizado através das equações dos guias IEEE 1584 Std 2002 e 2018 (DAS, 2012). O cálculo da energia incidente para cada segmento (Energia Incidente Parcial) é realizado por intermédio dos *scripts* desenvolvidos no software Matlab.

#### **6.3.4.1 Fluxograma do script para aplicação do guia IEEE Std 1584 – 2002**

Os passos seguidos para aplicação das equações são apresentados no fluxograma da figura 6.5.





**Figura 6. 5 - Fluxograma de aplicação do guia IEEE Std 1584 - 2002 para cálculo da energia incidente**  
**Fonte: Elaborado pelo autor**

Conforme ITEM 1, figura 6.5, o programa inicia com o cálculo da corrente de curto-circuito total determinando as contribuições de geradores e motores. A curva de corrente de curto-circuito total é obtida pela soma das contribuições de motores, gerador e concessionária, e segmentada conforme o vetor tempo "t" gerado e apresentado na seção 6.3.2. No ITEM 2 são fornecidos os dados do sistema e que possibilitam o cálculo da corrente de arco, conforme ITEM 3.

O vetor de corrente de arco gerado no ITEM 3, possibilita o cálculo do tempo de atuação dos dispositivos de proteção em função da corrente de arco que flui por cada um deles, conforme ITEM 4. A energia incidente parcial calculada para cada intervalo, ITEM 5, possibilita o cálculo da energia incidente total liberada somando-se as diversas contribuições.

Devido a possível variação existente na corrente de arco, conforme recomendado do IEEE 1584, uma segunda energia incidente é calculada considerando o valor de 85% da corrente de arco calculada no ITEM 3, essa sequência de cálculos é mostrada nos ITENS 6, 7 e 8 do fluxograma da figura 6.5.

#### **6.3.4.2 Fluxograma do script para aplicação do guia IEEE Std 1584 – 2018**

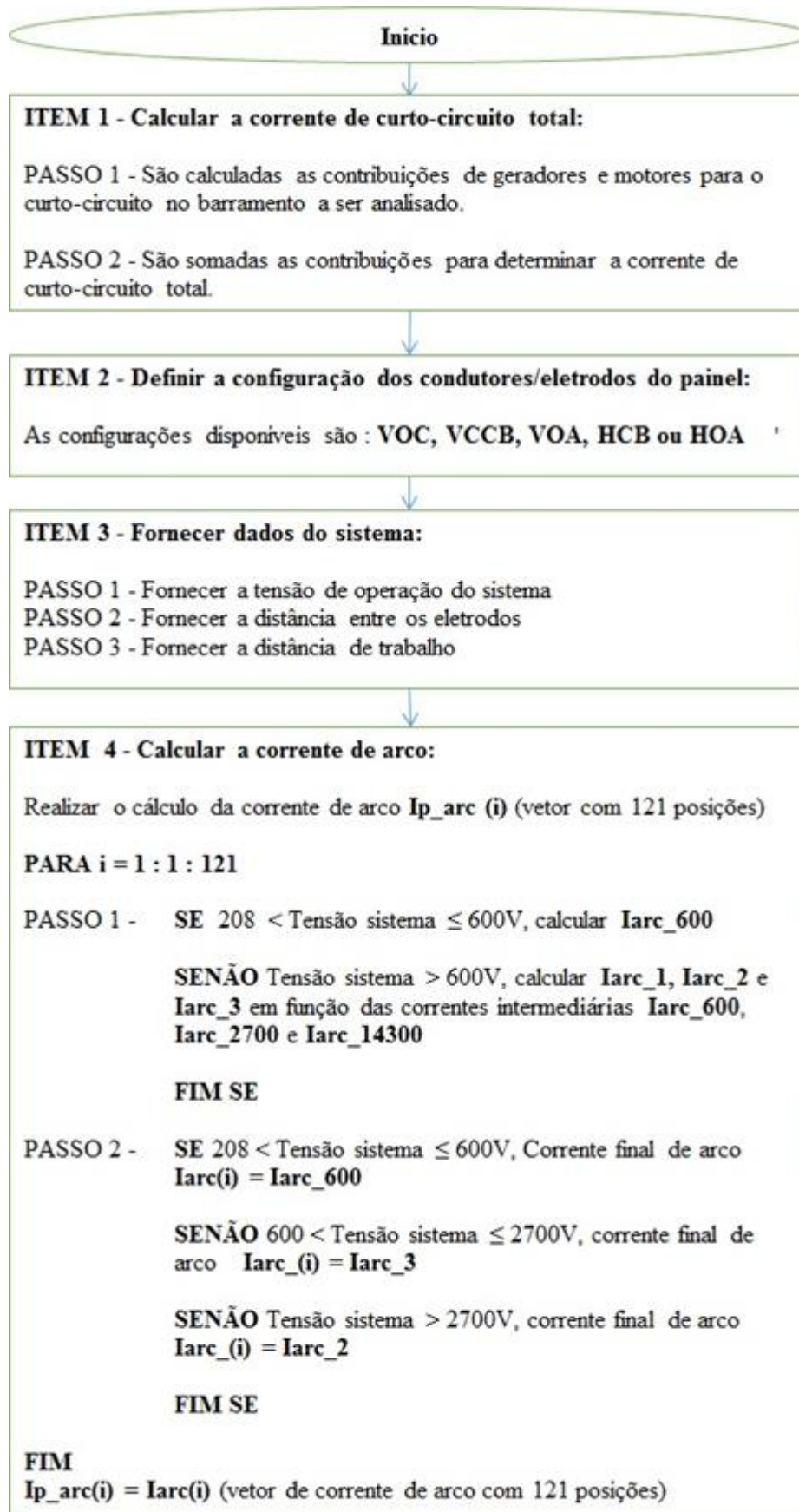
Os passos seguidos para aplicação das equações correspondentes são apresentados no fluxograma da figura 6.6.

No ITEM 1, o programa inicia-se com o cálculo das contribuições dos diversos ramos e o somatório dessas contribuições gera a corrente de curto-circuito total. A configuração dos eletrodos e os dados do sistema são fornecidos nos ITENS 2 e 3, respectivamente.

O vetor de corrente de arco gerado no ITEM 4, possibilita o cálculo do tempo de atuação dos dispositivos de proteção em função da corrente de arco que flui através de cada um deles, ITEM 5. As energias incidentes parciais são calculadas, e a soma delas permite calcular a energia incidente total liberada conforme ITEM6.

O cálculo do fator de variação da corrente de arco é usado para determinar a nova corrente de arco, possibilitando determinar o novo tempo de atuação dos dispositivos de proteção e o cálculo da nova energia incidente total. Estes passos são apresentados nos ITENS 7, 8 e 9, respectivamente.





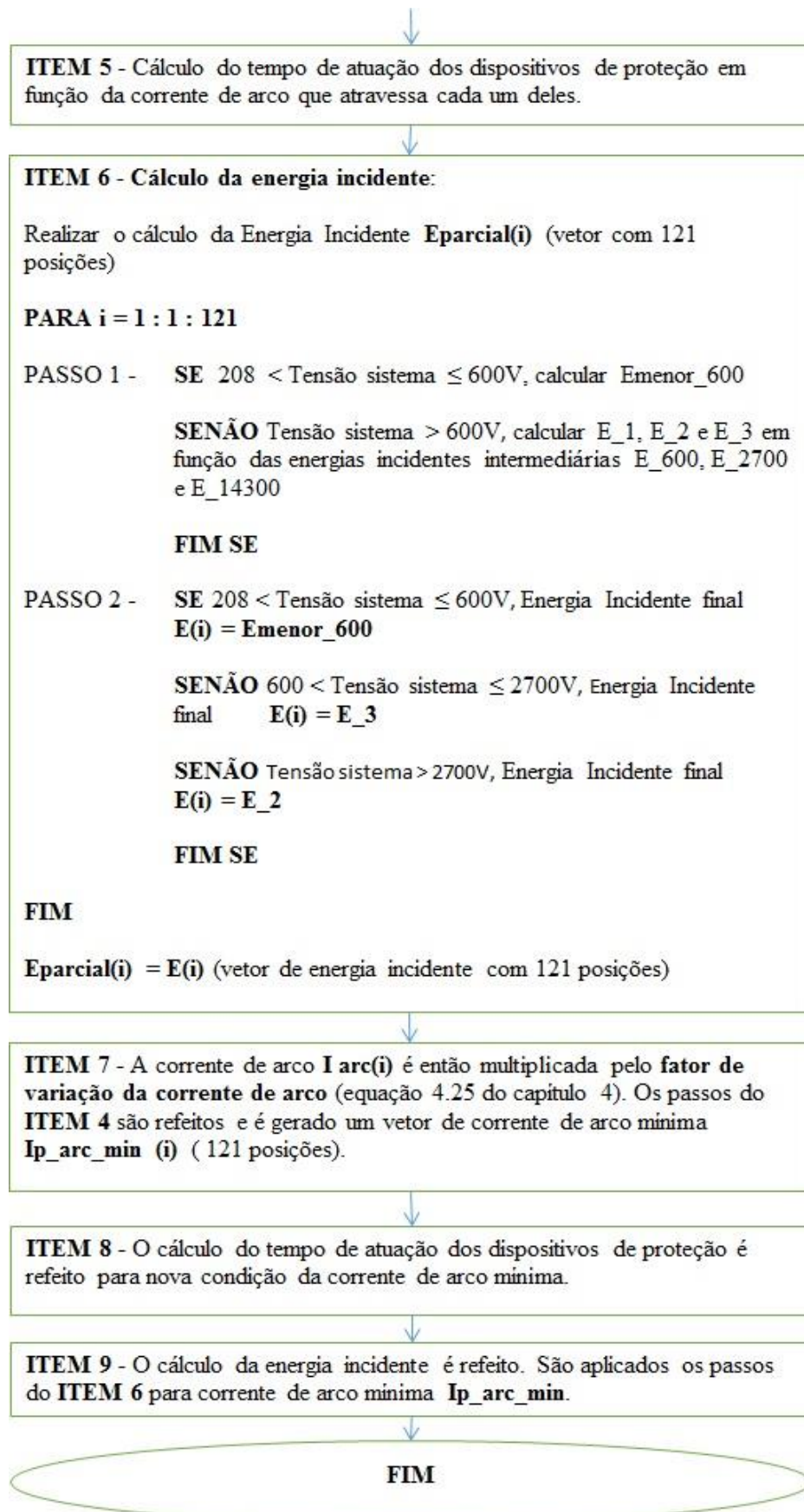
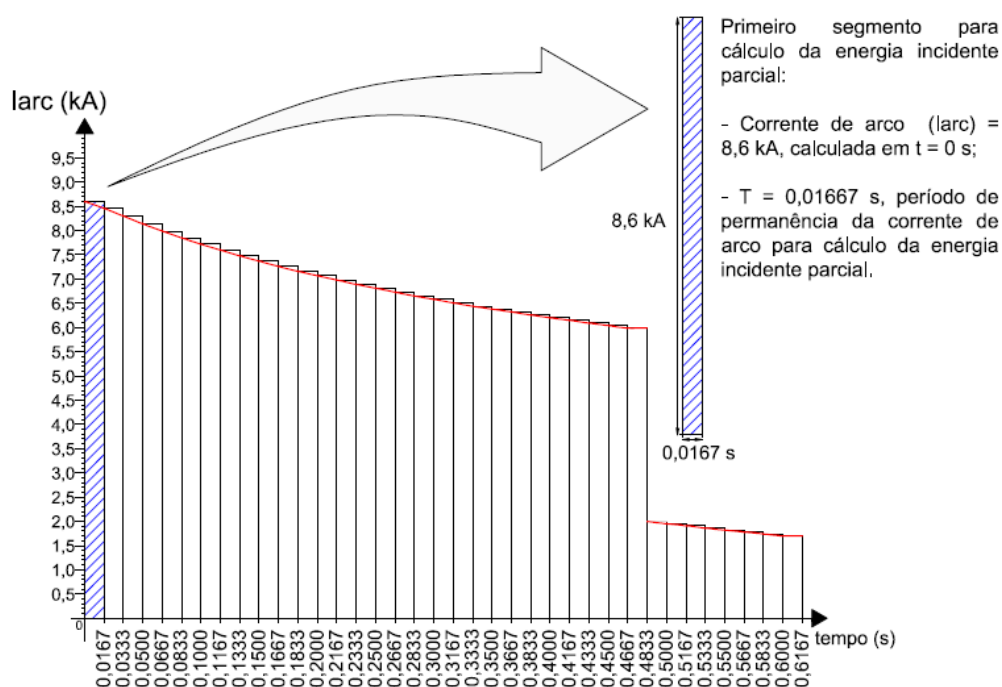


Figura 6. 6 - Fluxograma de aplicação do guia IEEE Std 1584 - 2018 para cálculo da energia incidente  
Fonte: Elaborado pelo autor

Para melhor entender o cálculo das energias incidentes parciais e final apresentado nos fluxogramas das figuras 6.5 e 6.6, as figuras 6.7 e 6.8 ilustram um exemplo do cálculo realizado.

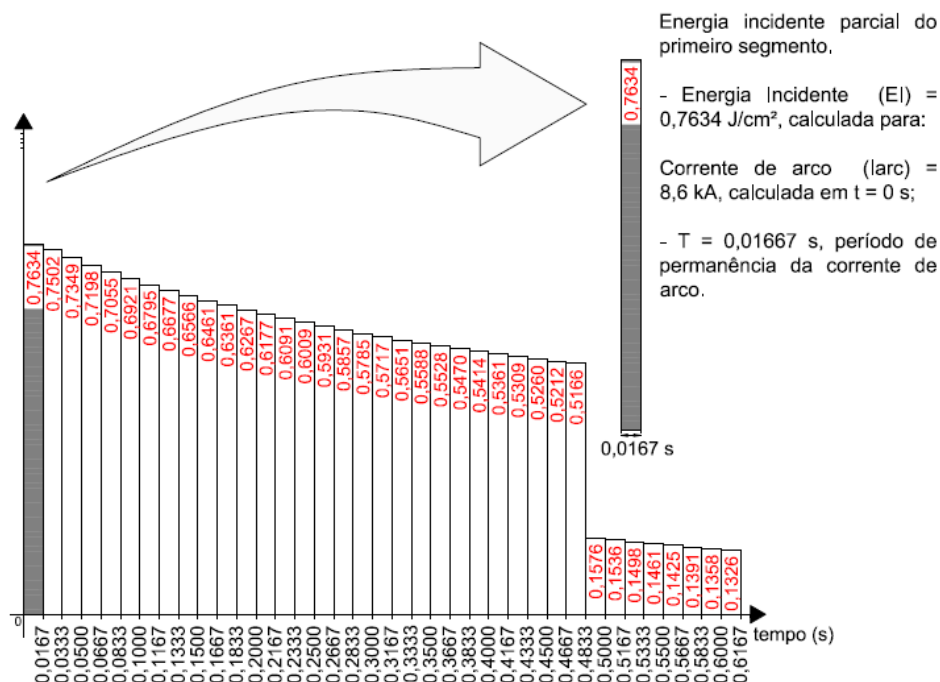
A figura 6.7 apresenta uma curva de corrente de arco (vermelho) variando ao longo do tempo. A discretização da curva foi realizada, em segmentos com intervalo fixo de amostragem ( $\Delta t$ ) com valor de 0,01667 s. Para o primeiro segmento, a corrente de arco calculada em  $t = 0$  segundo foi de 8,6 kA, destacado (hachura azul). Esta corrente é mantida constante até que nova corrente de arco seja calculada no próximo intervalo.



**Figura 6.7 - Primeiro segmento (corrente arco x tempo) para cálculo da energia incidente parcial**  
**Fonte: Elaborado pelo autor**

A corrente de arco calculado para instante  $t = 0$  (8,6 kA), é utilizada para calcular a energia incidente parcial do primeiro segmento. As equações dos guias IEEE Std 1584 – 2002 ou 2018 são utilizados para determinar a energia incidente parcial.

A figura 6.8 apresenta para o primeiro segmento de corrente de arco da figura 6.7 o valor calculado da energia incidente parcial, cujo valor é de 0,7634 J/cm<sup>2</sup>.



**Figura 6. 8 - Exemplo de cálculo da energia incidente parcial**  
**Fonte: Elaborado pelo autor**

Este processo é repetido até que os dispositivos de proteção eliminem toda corrente de arco que fluem através deles. Finalmente, a energia incidente total liberada é calculada realizando a soma de todas as energias parciais calculadas.

## 6.4 Consideração final

Inicialmente este capítulo apresentou três metodologias utilizadas para avaliação do arco elétrico tendo como base de cálculo a aplicação das equações dos guias IEEE STD 1584 2002 e 2018.

Finalmente, foi apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento de *scripts* em Matlab de modo a considerar no cálculo da energia incidente o decaimento do módulo da corrente de curto-circuito e o aumento do tempo de atuação da proteção tempo dependente.

## 7 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE CÁLCULO DO ARCO ELÉTRICO

### 7.1 Considerações iniciais

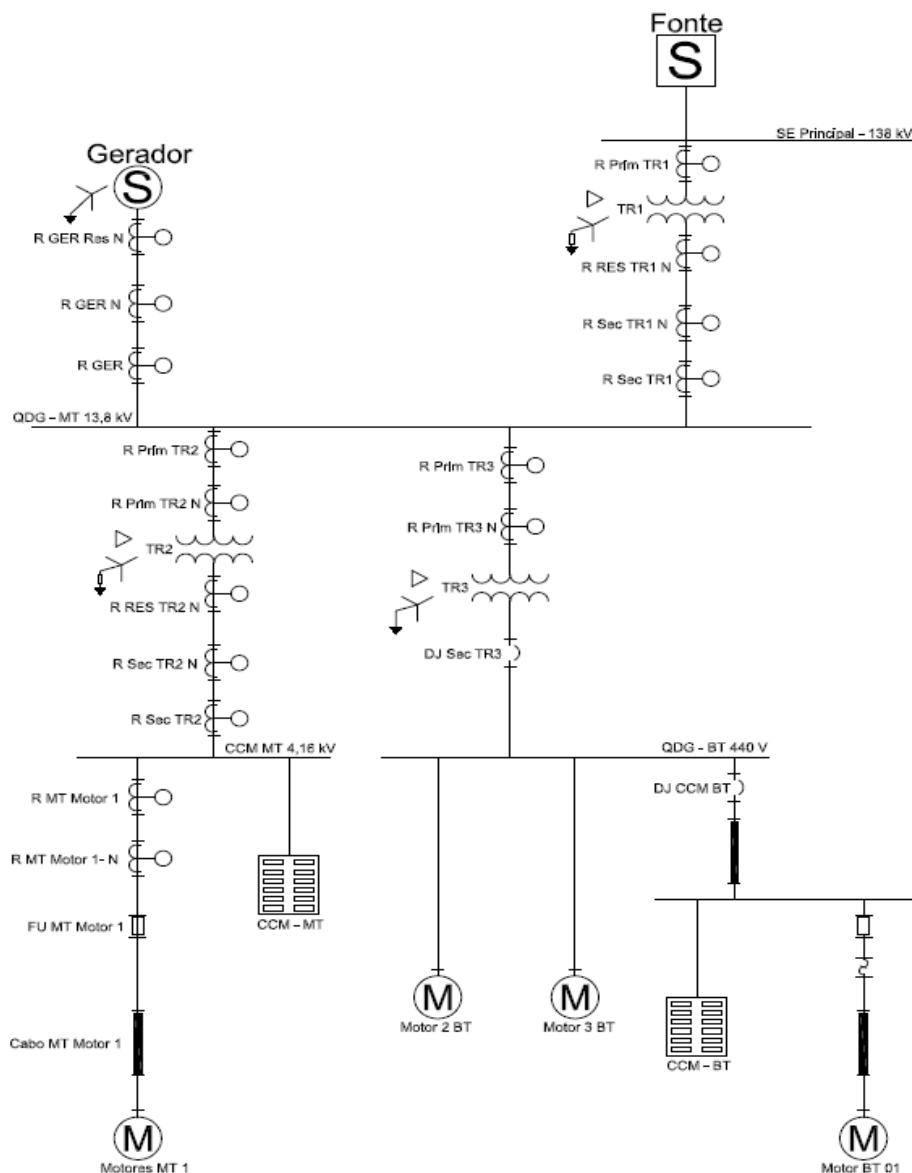
Este capítulo apresentará uma análise comparativa de dois métodos para avaliação da energia incidente na ocorrência do arco elétrico a partir de um caso.

O primeiro método utiliza o *software* PTW (SKM, 2019) para aplicação das diretrizes dos guias IEEE 1584 2002 e 2018, desconsiderando o decaimento AC das correntes. O segundo método utiliza *scripts* desenvolvidos em Matlab para aplicação das equações dos guias IEEE 1584 2002 e 2018, porém, considerando os efeitos associados ao decaimento AC das correntes de contribuição de curto-circuito de geradores e motores de indução.

O sistema utilizado como estudo de caso corresponde a um sistema elétrico industrial típico representado de forma simplificada. Salienta-se que, para fins didáticos e, com o propósito de determinar a energia incidente, não se faz necessário utilizar um sistema complexo, tendo vista que só aumentaria a quantidade de cálculos envolvidos sem obter maiores ganhos para as análises pretendidas.

### 7.2 Caso teste

O diagrama unifilar do sistema elétrico utilizado como caso teste é apresentado na figura 7.1. O sistema é composto por dois centros de controle de motores (CCM-BT e CCM-MT), motores de baixa tensão (Motores 1, 2 e 3 e Motor Equivalente), motores de média tensão (motor MT – 1 e Motor Equivalente), transformadores (TR1, TR2 e TR3), gerador síncrono (GER) e concessionária (Fonte). Os dados da concessionária, dos equipamentos e dos cabos são fornecidos no Anexo 10.2, tabelas 10.6 a 10.10. Os dispositivos de proteção dos barramentos (relés e disjuntores) também são identificados na figura 7.1.



**Figura 7. 1 - Diagrama unifilar do sistema elétrico industrial do caso teste**  
**Fonte: Carvalho Filho (2019)**

Os ajustes dos dispositivos de proteção foram definidos a partir do estudo de seletividade, realizado por (CAVALHO FILHO, 2019), e são apresentados nas tabelas 7.1 a 7.5. As folhas de verificação gráfica da seletividade correspondentes são apresentadas no Anexo 10, seção 10.4.4.

**Tabela 7. 1 - Ajuste do relé R Sec TR1**

TC = 600/5 A e I <sub>N</sub> = 600A		
Parâmetro	Faixa	Ajuste
Tape (I <sub>pk</sub> )	(0,1 a 5)*I <sub>N</sub>	1,1 (660A)
Dial de tempo (DT)(s)	0,05 a 1	0,1 (s)
Tipo de curva	Tempo longo, NI, VI, EI	NI (Normal Inversa)
Função Instantânea	-	Bloqueado

**Fonte: Carvalho Filho (2019)**

**Tabela 7. 2 - Ajuste do relé R GER para corrente de arco**

TC = 1000/5 A e $I_N = 5A$		
Parâmetro	Faixa	Ajuste
Tape ( $I_{pk}$ )	$(0,1 \text{ a } 25) * I_N$	1,1 (1.100A)
Tempo definido	0 a 60 (s)	1,6 (s)

Fonte: Carvalho Filho (2019)

**Tabela 7. 3 - Ajuste do relé R Sec TR2**

TC = 500/5 A e $I_N = 500A$		
Parâmetro	Faixa	Ajuste
Tape ( $I_{pk}$ )	$(0,1 \text{ a } 5) * I_N$	1,8 (900 A)
Dial de tempo (DT)(s)	0,05 a 1	0,1 (s)
Tipo de curva	Tempo longo, NI, VI, EI	EI (Extremamente Inversa)
Função Instantânea	$(0,1 \text{ a } 40) * I_N$	Bloqueado

Fonte: Carvalho Filho (2019)

**Tabela 7. 4 - Ajuste do disjuntor DJ Sec TR3**

$I_N = 3200 A$		
Parâmetro	Faixa	Ajuste
Corrente Longo retardo ( $I_L$ )	$(0,4 \text{ a } 1) * I_N$	1 (3200 A)
Tempo Longo Retardo ( $t_L$ )	(3 a 144)	3 (s)
Corrente de Curto Retardo ( $I_S$ )	$(0,6 \text{ a } 10) * I_N$	1 (3200 A)
Tempo de Curto Retardo ( $t_S$ )	(0,05 a 0,8)	0,3 (s) ( $I^2T$ off)
Corrente Instantânea ( $I_{Inst}$ )	$(1,5 \text{ a } 15) * I_N$	Bloqueado

Fonte: Carvalho Filho (2019)

**Tabela 7. 5 - Ajuste do disjuntor DJ CCM BT**

$I_N = 800 A$		
Parâmetro	Faixa	Ajuste
Corrente Longo retardo ( $I_L$ )	$(0,4 \text{ a } 1) * I_N$	0,5 (400 A)
Tempo Longo Retardo ( $t_L$ )	(3 a 144)	3 (s)
Corrente de Curto Retardo ( $I_S$ )	$(0,6 \text{ a } 10) * I_N$	2 (1600 A)
Tempo de Curto Retardo ( $t_S$ )	(0,05 a 0,8)	0,1 (s) ( $I^2T$ off)
Corrente Instantânea ( $I_{Inst}$ )	$(1,5 \text{ a } 15) * I_N$	Bloqueado

Fonte: Carvalho Filho (2019)

## 7.3 Software Utilizado

Os estudos de curto-circuito e arco elétrico foram realizados utilizando o *software* PTW (SKM, 2019) seguindo as diretrizes dos guias IEEE 1584-2002 / 2004a e IEEE 1584-2018.

### 7.3.1 Procedimentos utilizados

Na sequência são listados os principais passos que devem ser utilizados para realização do estudo de arco elétrico utilizando o PTW:

1. Coletar os dados necessários para realizar um estudo de curto-circuito e seletividade;
2. Identificar as possíveis configurações operacionais do sistema;
3. Calcular a corrente de falta trifásica franca em cada barramento de interesse;
4. Calcular a corrente de falta com arco que flui através de cada ramo para o barramento sob falta;
5. Determinar o tempo de eliminação da corrente de falta com arco tomando como base os ajustes estabelecidos no estudo de seletividade;
6. Selecionar as distâncias de trabalho com base na tensão do sistema e no tipo de painel;
7. Calcular a energia incidente em cada barramento sob falta;
8. Calcular a distância segura de aproximação em cada local de falta.

Vale ressaltar que o resultado do estudo tem dependência direta da fiel modelagem do sistema com a instalação real.

### **7.3.2 Premissas Adotadas pelo Software PTW**

O módulo arco elétrico do “PTW” adota diversas premissas para a realização dos cálculos, sendo elas:

- O PTW pesquisa o primeiro dispositivo de proteção de sobrecorrente, a partir do barramento sob falta. Um dispositivo de proteção é localizado para cada ramo de contribuição de curto ao barramento sob falta;
- O dispositivo de proteção mais rápido é selecionado, e o tempo de eliminação de falta é determinado. Este procedimento é realizado para cada ramo que contribua para falta no barramento analisado;
- Considera-se que o trabalhador está parado durante todo o evento, ou seja, a distância de trabalho é considerada constante;
- Os motores de indução contribuem com corrente subtransitória até serem removidos no tempo especificado pelo usuário. O usuário deve fornecer o número de ciclos para esta contribuição;
- Os geradores e motores síncronos não contribuem com a mesma corrente de falta após certo número de ciclos. O usuário define o número de ciclos ao qual a corrente inicial de falta será reduzida. Por exemplo, a corrente de falta pode ser reduzida de 10 p.u. para 3 p.u. após 10 ciclos;



- Os dispositivos de proteção de falta à terra não são considerados;
- Para dispositivos de proteção multifuncionais, apenas a função que atuar primeiro é usada para determinar o tempo de disparo;
- Apenas a energia incidente de maior valor calculada é exibida;
- Quando nenhum dispositivo de proteção for encontrado para eliminação da falta, o barramento é rotulado como perigoso, e tanto a energia incidente como a distância segura de aproximação não são calculados; e
- Se o tempo de atuação obtido a partir da curva de tempo-corrente for maior que 2 segundos, o tempo de 2 segundos será usado.

## 7.4 Resultados Obtidos - Método IEEE Std 1584 – 2002 utilizando o *software* PTW

A tabela 7.6 apresenta os resultados dos cálculos referentes ao arco elétrico para o caso teste da figura 7.1. Os dados do sistema são fornecidos nas tabelas 10.6 a 10.10 e também na tabela 10.11 do Anexo 10.2.

**Tabela 7. 6 - Resultados da análise de arco elétrico - Método IEEE Std 1584 – 2002 (PTW)**

Nome do Barramento	Nome do Dispositivo de Proteção	Corrente de Falta Franca (kA)	Corrente de Arco (kA)	Limite de Proteção Contra Arco Elétrico (mm)	Energia Incidente (J/cm <sup>2</sup> )
CCM BT 440 V	DJ CCM BT	40,77	18,52	1.565	20
CCM MT 4,16 kV	R Sec TR2	8,11	7,90	1.997	10,7
QDG-BT 440 V	DJ Sec TR3	40,84	18,55	3.151	56,1
QDG-MT 13,8 kV	R GER	8,84	8,59	8.729	45,1

Fonte: SKM (2019)

## 7.5 Resultados dos cálculos segundo Método IEEE Std 1584 – 2018 utilizando o *software* PTW

A tabela 7.7 apresenta os resultados dos cálculos referentes ao arco elétrico para o caso teste da figura 7.1. Os dados do sistema são fornecidos conforme tabelas 10.6 a 10.10 e também na tabela 10.12 do Anexo 10.2.

**Tabela 7. 7 - Resultado da análise de arco elétrico - Método IEEE Std 1584 – 2018 (PTW)**

<b>Nome do Barramento</b>	<b>Nome do Dispositivo de Proteção</b>	<b>Corrente de Falta Franca (kA)</b>	<b>Corrente de Arco (kA)</b>	<b>Limite de Proteção Contra Arco Elétrico (mm)</b>	<b>Energia Incidente (J/cm<sup>2</sup>)</b>
CCM BT 440 V	DJ CCM BT	40,77	25,70	1.507	21,3
CCM MT 4,16 kV	R Sec TR2	8,11	6,93	1.339	9,14
QDG-BT 440 V	DJ Sec TR3	40,84	25,73	2.882	60,1
QDG-MT 13,8 kV	R GER	8,84	8,28	3.655	44,09

Fonte: SKM (2019)

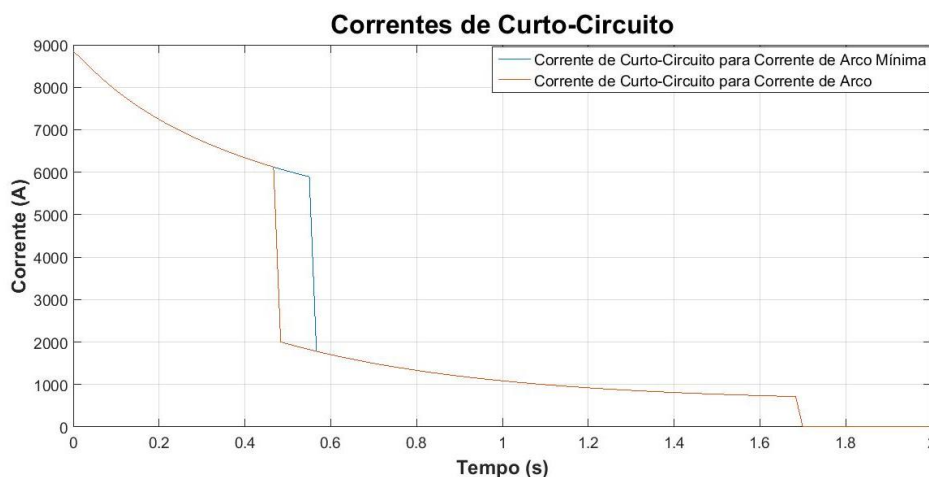
## **7.6 Resultados dos cálculos segundo Método IEEE STD 1584 – 2002 utilizando o programa desenvolvido em Matlab e considerando o decaimento AC**

Para a realização do cálculo do arco elétrico foi utilizado o script desenvolvido em Matlab. Os passos para realizar os cálculos foram apresentados no fluxograma da figura 6.5 e os resultados para cada barramento serão apresentados na sequência.

- **Falta no barramento QDG-MT 13,8 kV**

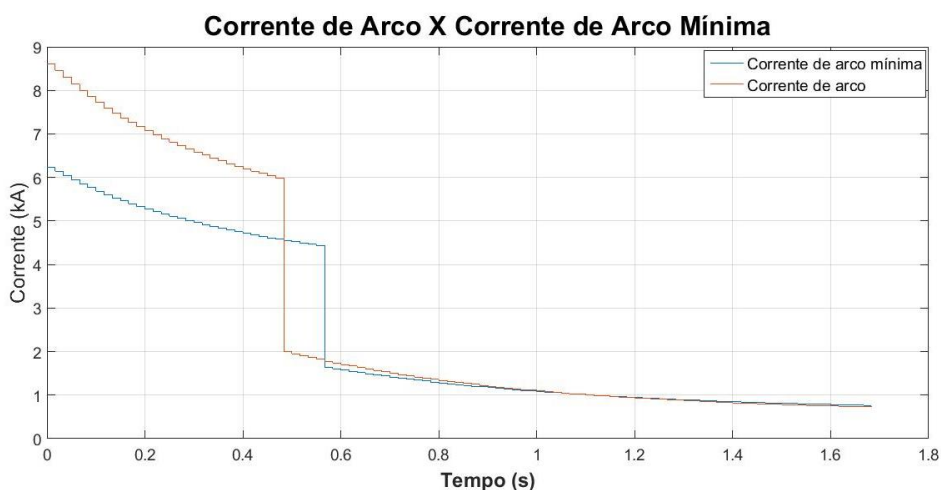
Os dispositivos de proteção do barramento QDG-MT 13,8 kV são os relés R Sec TR1 e R GER, conforme figura 7.1. A contribuição do gerador, concessionária e motores são calculados segundo os scripts desenvolvidos em Matlab.

A figura 7.2 apresenta as correntes de curto-circuito total segmentada para os cálculos da corrente de arco e corrente de arco mínimo. A curva de corrente de curto-circuito para cálculo da corrente de arco mínima, no intervalo de tempo de 0,50 a 0,57 segundos, apresenta valores maiores. Isto acontece porque a corrente de arco mínima possui valor eficaz menor fazendo com que a proteção R Sec TR1 fique mais lenta prolongando a contribuição de corrente de curto-circuito do secundário do transformador TR1. Os valores da corrente de curto-circuito ao longo do tempo são apresentados conforme tabela 10.13 do Anexo 10.3.



**Figura 7. 2 - Correntes de curto-circuito total: (vermelho) para cálculo da corrente de arco e (azul) para cálculo da corrente de arco mínima**  
**Fonte: Elaborado pelo autor**

As correntes de arco e de arco mínima são apresentadas na figura 7.3. No intervalo de 0 a 0,5 segundos, a corrente de arco possui maior valor eficaz, acarretando atuação mais rápida do relé R Sec TR1. Em contrapartida, no intervalo de 0,50 a 0,57 segundos, a corrente de arco mínima é maior que a corrente de arco. Este comportamento influencia diretamente no cálculo da energia incidente do barramento. Os valores da corrente de arco e corrente de arco mínima são apresentados na tabela 10.13 do Anexo 10.3.



**Figura 7. 3 - Corrente de arco calculada para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) corrente de arco e (azul) corrente de arco mínima.**  
**Fonte: Elaborado pelo autor**

Os tempos de atuação do relé R Sec TR1, de abertura do disjuntor e o tempo total de eliminação de falta são fornecidos na tabela 7.8. Vale salientar que a determinação do tempo de atuação do relé R Sec TR1 utiliza o método descrito na seção 6.3.2.

**Tabela 7. 8 - Tempo de atuação do relé R Sec TR1 para a Corrente de Arco**

<b>Dispositivo</b>	<b>Tempo de atuação ou disparo</b>
R Sec TR1	0,3833 s (24 amostras)
Disjuntor	0,0833 s (5 ciclos)
<b>Tempo total</b>	0,4666 (s) (29 amostras)

Fonte: Elaborado pelo autor

Os tempos de atuação da proteção do gerador R GER, de abertura do disjuntor e o tempo total de eliminação de falta são fornecidos na tabela 7.9. O relé R GER é ajustado para um tempo de atuação fixo e não se faz necessário o uso do procedimento apresentado na seção 6.3.2.

**Tabela 7. 9 - Tempo de atuação do relé R GER**

<b>Dispositivo</b>	<b>Tempo de atuação ou disparo</b>
R GER (Tempo Definido)	1,6 s (97 amostras)
Disjuntor	0,0833 s (5 ciclos)
<b>Tempo total</b>	1,6833 (s) (102 amostras)

Fonte: Elaborado pelo autor

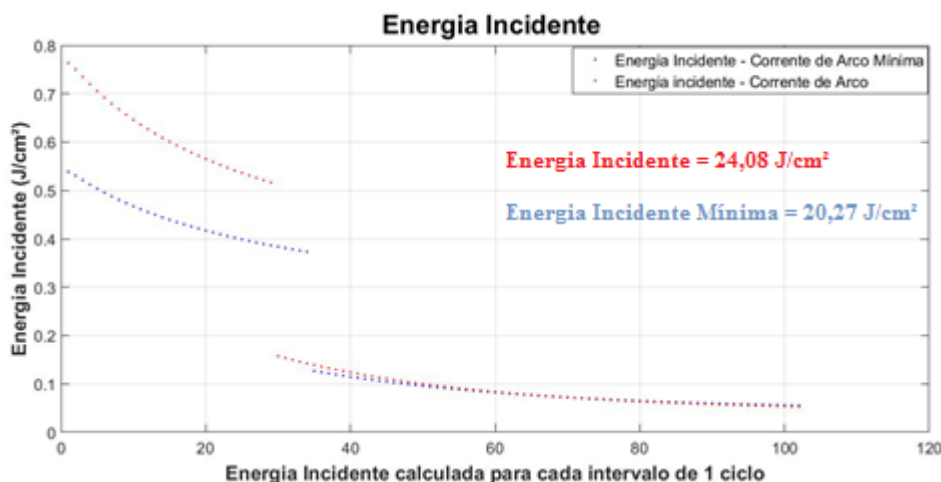
Para os valores calculados da corrente de arco mínimo, são verificados novamente os tempos de atuação dos dispositivos de proteção R Sec TR1 e R GER. O tempo de atuação do relé R Sec TR1 é apresentado na tabela 7.10. Os tempos de atuação do relé R GER são os mesmos e já foram apresentados na tabela 7.9.

**Tabela 7. 10 - Tempo de atuação do relé R Sec TR1 para Corrente de Arco Mínima**

<b>Dispositivo</b>	<b>Tempo de atuação ou disparo</b>
R Sec TR1	0,4667 s (29 amostras)
Disjuntor	0,0833 s (5 ciclos)
<b>Tempo total</b>	0,5500 (s) (34 amostras)

Fonte: Elaborado pelo autor

A energia incidente é então calculada para as correntes de arco e arco mínimo conforme apresentado na figura 7.3. Para o cálculo da energia incidente total, são somadas as contribuições parciais. A energia incidente parcial para as correntes de arco e arco mínimo podem ser visualizadas na figura em 7.4. Os valores das energias incidentes parciais também são apresentados na tabela 10.13 do Anexo 10.3.



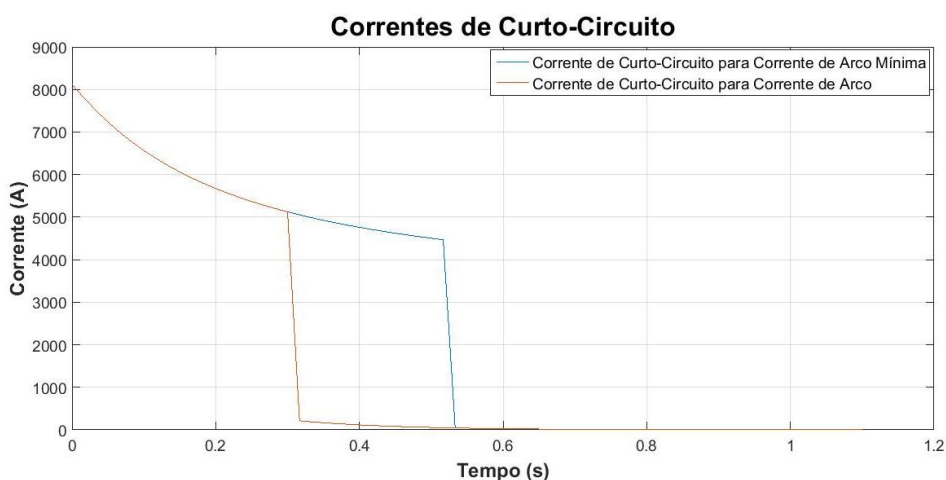
**Figura 7. 4 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima**

**Fonte: Elaborado pelo autor**

- Falta no barramento CCM-MT 4,16 kV**

O dispositivo de proteção do barramento CCM-MT 4,16 kV é o relé R Sec TR2, conforme figura 7.1. A contribuição do gerador, concessionária e motores são calculados segundo os scripts desenvolvidos em Matlab.

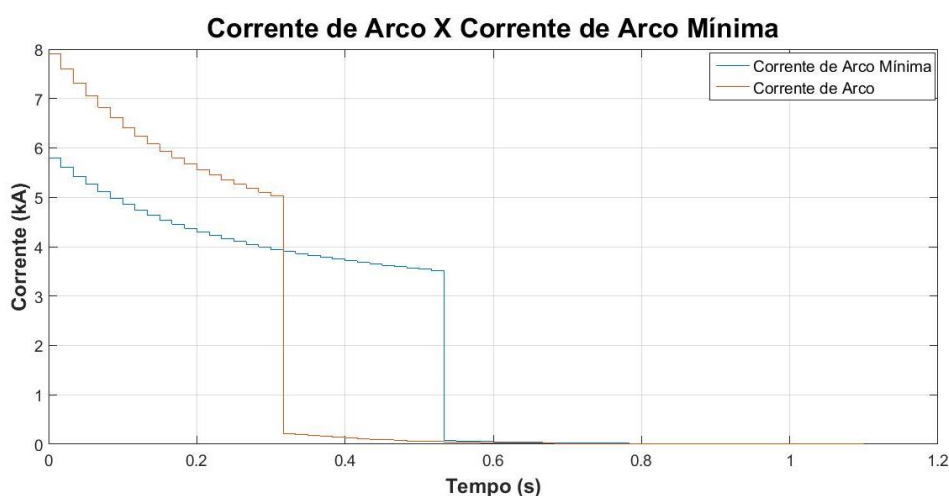
A figura 7.5 apresenta as correntes de curto-circuito total para os cálculos da corrente de arco e corrente de arco mínima. A curva de corrente de curto-circuito para cálculo da corrente de arco mínima, no intervalo de tempo de 0,33 a 0,45 segundos, apresenta valores maiores. Isto acontece porque a corrente de arco mínima possui valor eficaz menor e prolonga a contribuição da corrente de arco através do relé R Sec TR2. Os valores da corrente de curto-circuito ao longo do tempo são apresentados na tabela 10.14 do Anexo 10.3.



**Figura 7. 5 - Correntes de curto-circuito total: (vermelho) para cálculo da corrente de arco e (azul) para cálculo da corrente de arco mínima**

**Fonte: Elaborado pelo autor**

As correntes de arco e de arco mínimo são apresentadas conforme figura 7.6. No intervalo de 0 a 0,33 segundos a corrente de arco possui maior valor eficaz, acarretando na atuação mais rápida do relé R Sec TR2. Em contrapartida, a partir de 0,33 segundos, a corrente de arco mínima é maior que a corrente de arco. Conforme já comentado este comportamento influencia diretamente no cálculo da energia incidente do barramento. Os valores das correntes de arco e corrente de arco mínima são apresentados na tabela 10.14 do Anexo 10.3.



**Figura 7. 6 - Corrente de arco calculada para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) corrente de arco e (azul) corrente de arco mínima**  
**Fonte: Elaborado pelo autor**

Os tempos de atuação do relé R Sec TR2, de abertura do disjuntor e o tempo total de eliminação de falta são fornecidos na tabela 7.11. Vale salientar que a determinação do tempo de atuação do relé R Sec TR2 utiliza o método descrito na seção 6.3.2.

**Tabela 7. 11 - Tempo de atuação do relé R Sec TR2 para a Corrente de Arco**

<b>Dispositivo</b>	<b>Tempo de atuação ou disparo</b>
R Sec TR2	0,2167 s (14 amostras)
Disjuntor	0,0833 s (5 ciclos)
<b>Tempo total</b>	<b>0,3000 (s) (19 amostras)</b>

**Fonte: Elaborado pelo autor**

Para os valores calculados da corrente de arco mínimo, é verificado novamente o tempo de atuação do dispositivo de proteção R Sec TR2. O tempo de atuação do relé R Sec TR2 é apresentado na tabela 7.12.

Tabela 7. 12 - Tempo de atuação do relé R Sec TR2 para a corrente de arco mínima

Dispositivo	Tempo de atuação ou disparo
R Sec TR2	0,4333 s (27 amostras)
Disjuntor	0,0833 s (5 ciclos)
<b>Tempo total</b>	<b>0,5167 (s) (32 amostras)</b>

Fonte: Elaborado pelo autor

A energia incidente é então calculada para as correntes de arco e arco mínimo conforme apresentado na figura 7.6. Para o cálculo da energia incidente total, são somadas as contribuições parciais de energia incidente. A energia incidente parcial para as correntes de arco e arco mínimo podem ser visualizadas na figura em 7.7. Os valores das energias incidentes parciais ao longo do tempo são apresentados conforme tabela 10.14 do Anexo 10.3.

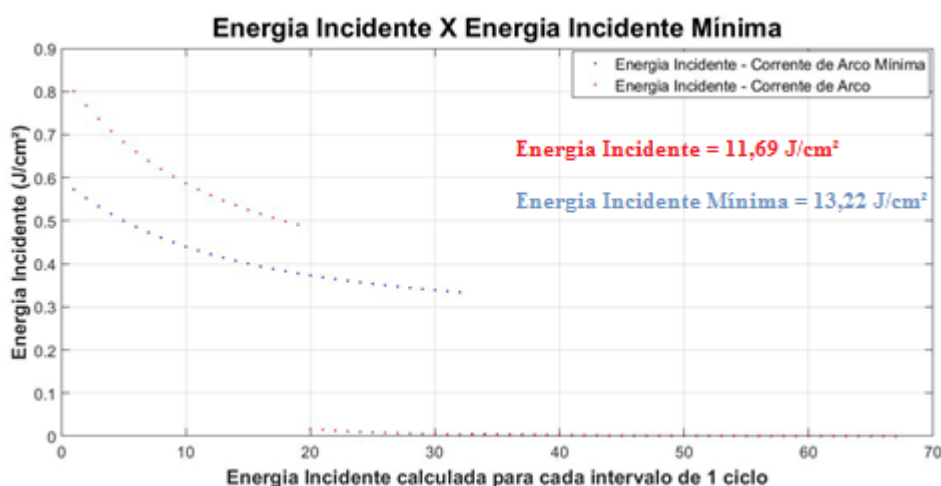


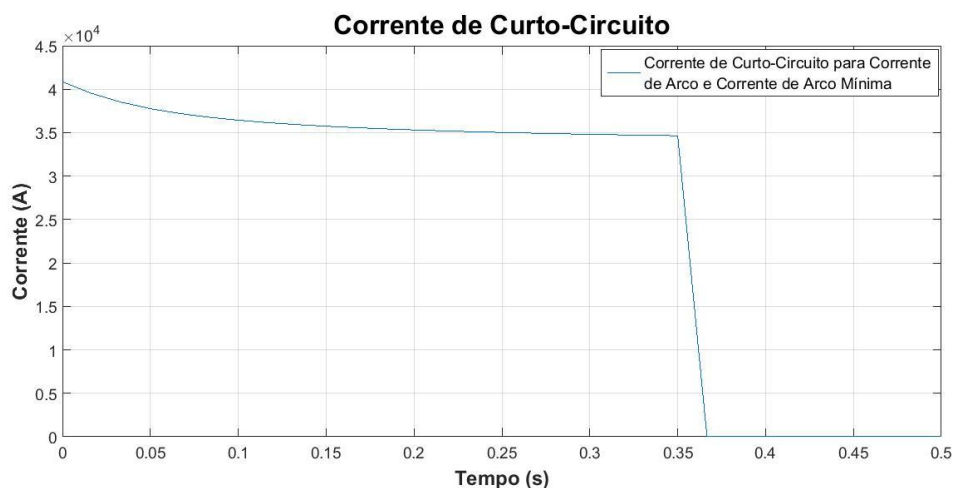
Figura 7. 7 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima

Fonte: Elaborado pelo autor

- **Falta no barramento QDG-BT 440 V**

O dispositivo de proteção do barramento QDG-BT 440 V é o disjuntor DJ Sec TR3, conforme figura 7.1. A contribuição do gerador, concessionária e motores são calculados segundo os scripts desenvolvidos em Matlab.

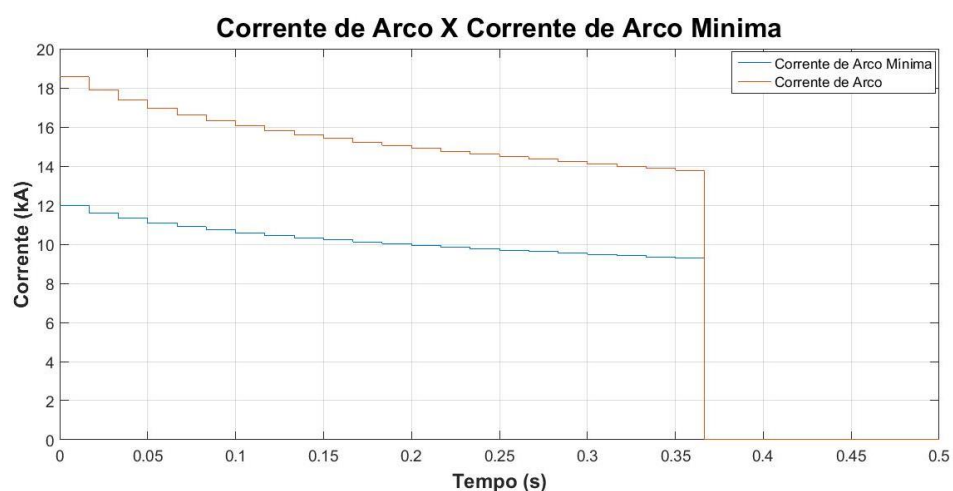
A figura 7.8 apresenta a corrente de curto-circuito total para os cálculos da corrente de arco e corrente de arco mínima. O valor da corrente de curto-circuito ao longo do tempo é apresentado na tabela 10.15 do Anexo 10.3.



**Figura 7. 8 - Correntes de curto-circuito total para cálculo da corrente de arco e para cálculo da corrente de arco mínima**

**Fonte: Elaborado pelo autor**

As correntes de arco e de arco mínima são apresentadas na figura 7.9. Em todo intervalo a corrente de arco possui maior valor eficaz. Como o ajuste da proteção é tempo definido, a proteção atua no mesmo tempo para ambas as correntes. Os valores da corrente de arco e corrente de arco mínima são apresentados na tabela 10.15 do Anexo 10.3.



**Figura 7. 9 - Corrente de arco calculada para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) corrente de arco e (azul) corrente de arco mínima**

**Fonte: Elaborado pelo autor**

O tempo de atuação do disjuntor DJ Sec TR3 e o tempo total de eliminação da falta são fornecidos na tabela 7.13.

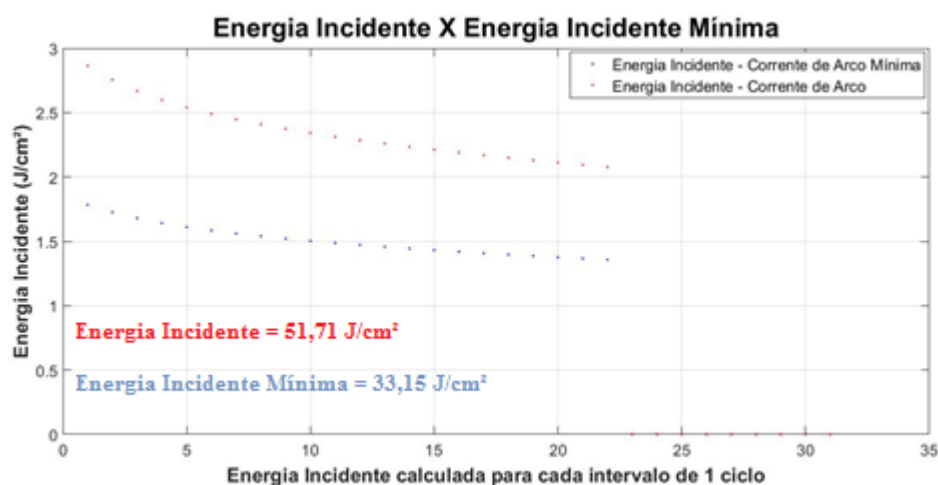


**Tabela 7. 13 - Tempo de atuação do disjuntor DJ Sec TR3 para a Corrente de Arco e Corrente de Arco Mínima**

Dispositivo	Tempo de atuação ou disparo
DJ Sec TR3 (Fixo)	0,3500 s (22 amostras)
<b>Tempo total</b>	<b>0,3500 s (22 amostras)</b>

Fonte: Elaborado pelo autor

A energia incidente é então calculada para as correntes de arco e arco mínimo conforme apresentado na figura 7.9. Para o cálculo da energia incidente total, são somadas as contribuições parciais de energia incidente. A energia incidente parcial para as correntes de arco e arco mínimo podem ser visualizadas na figura em 7.10 ou na tabela 10.15 do Anexo 10.3.



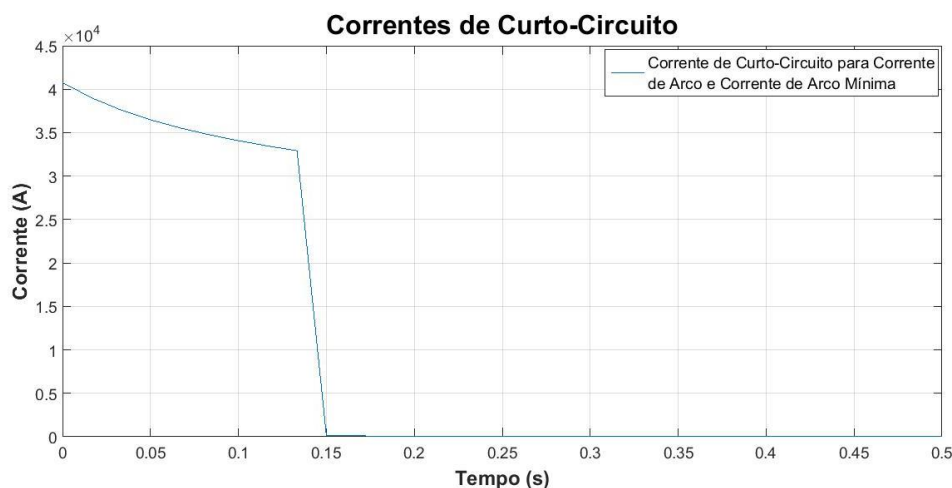
**Figura 7. 10 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima**

Fonte: Elaborado pelo autor

- **Falta no barramento CCM-BT 440V**

O dispositivo de proteção do barramento CCM-BT 440 V é o disjuntor DJ CCM BT, conforme figura 7.1. A contribuição do gerador, concessionária e motores são calculados segundo os scripts desenvolvidos em Matlab.

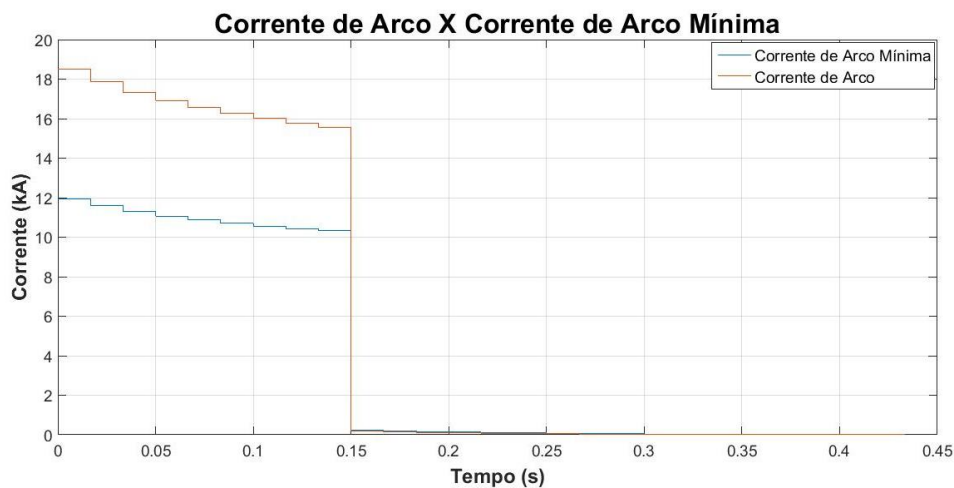
A figura 7.11 apresenta a corrente de curto-circuito total para os cálculos da corrente de arco e corrente de arco mínimo. O valor da corrente de curto-circuito total ao longo do tempo é apresentado conforme tabela 10.16 do Anexo 10.3.



**Figura 7.11 - Corrente de curto-circuito total para cálculo da corrente de arco e para cálculo da corrente de arco mínima**

**Fonte: Elaborado pelo autor**

A corrente de arco e corrente de arco mínima são apresentadas conforme figura 7.12. Em todo intervalo a corrente de arco possui maior valor eficaz. Dado que o ajuste da proteção é tempo definido, a proteção atua no mesmo instante. Os valores da corrente de arco e corrente de arco mínima ao longo do tempo são apresentados conforme tabela 10.16 do Anexo 10.3.



**Figura 7.12 - Corrente de arco calculada para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) corrente de arco e (azul) corrente de arco mínima**

**Fonte: Elaborado pelo autor**

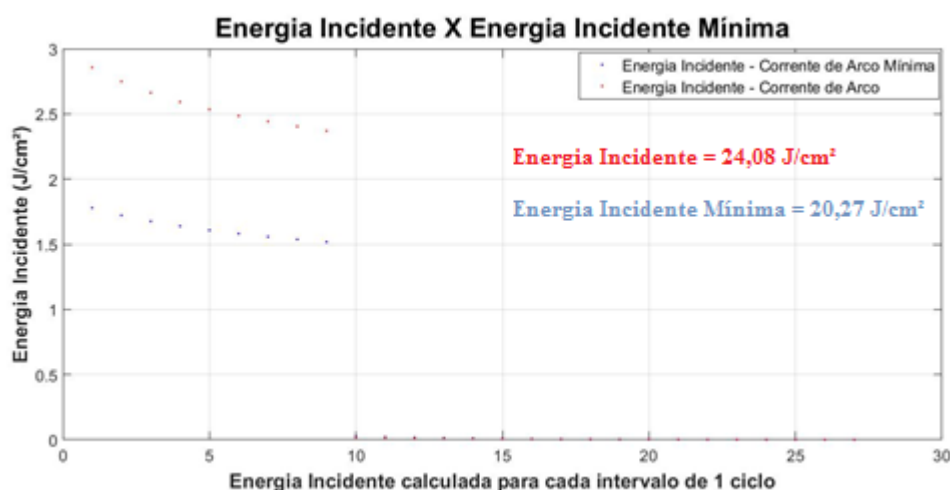
O tempo de atuação do disjuntor DJ CCM BT e o tempo total de eliminação da falta são fornecidos na tabela 7.14.

**Tabela 7. 14 - Tempo de atuação do disjuntor DJ CCM BT para a Corrente de Arco e Corrente de Arco Mínima**

Dispositivo	Tempo de atuação ou disparo
DJ CCM BT (Fixo)	0,1333 s (9 amostras)
<b>Tempo total</b>	<b>0,1333 s (9 amostras)</b>

Fonte: Elaborado pelo autor

A energia incidente é então calculada para as correntes de arco e arco mínimo conforme apresentado na figura 7.12. Para o cálculo da energia incidente total, são somadas as diversas contribuições parciais até que a falta seja totalmente eliminada. A energia incidente parcial para as correntes de arco e arco mínimo podem ser visualizadas tanto na figura em 7.13 como na tabela 10.16 do Anexo 10.3.



**Figura 7. 13 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima**

Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 7.15 apresenta os valores calculados referentes à energia incidente total para a corrente de arco e corrente de arco mínimo, bem como os valores das correntes de primeiro ciclo da corrente de curto-circuito total, corrente de arco e corrente de arco mínima.

**Tabela 7. 15 - Resultados da análise de arco elétrico segundo o método IEEE Std 1584 – 2002 (considerando o decaimento AC das correntes de curto-circuito)**

Nome do Barramento	Corrente de Falta Franca – Primeiro Ciclo (kA)	Corrente de Arco – Primeiro Ciclo (kA)	Corrente de Arco mínima – Primeiro Ciclo (kA)	Energia Incidente Total (J/cm <sup>2</sup> )	Energia Incidente mínima Total (J/cm <sup>2</sup> )
CCM BT 440V	40,76	18,52	11,95	23,18	14,74
CCM MT 4,16kV	8,11	7,90	5,79	11,69	13,22
QDG-BT 440V	40,86	18,55	11,97	51,71	33,15
QDG-MT 13,8kV	8,84	8,60	6,23	24,08	20,27

Fonte: Elaborado pelo autor

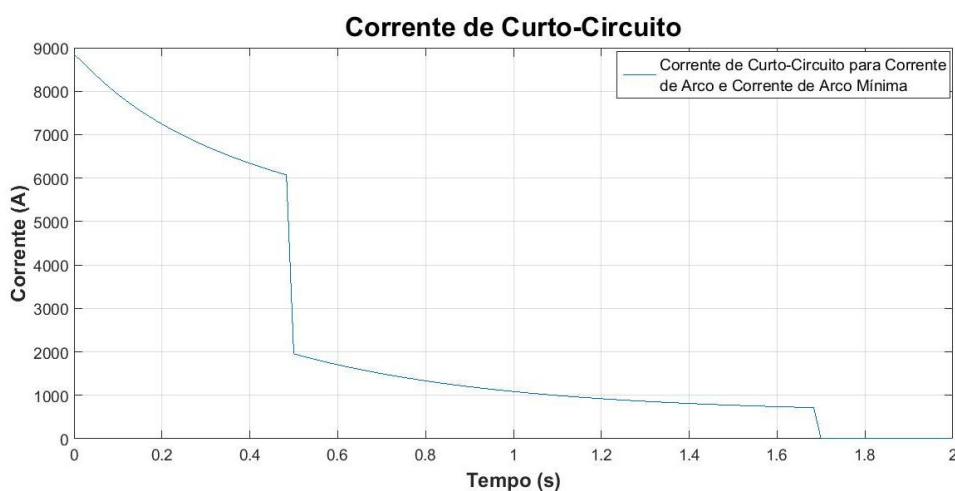
## 7.7 Resultados dos cálculos segundo Método IEEE STD 1584 – 2018 utilizando o programa desenvolvido em Matlab e considerando o decaimento AC

Para a realização do cálculo do arco elétrico foi utilizado o script desenvolvido em Matlab. Os passos para realizar os cálculos foram apresentados no fluxograma da figura 6.6 e os resultados para cada barramento serão apresentados conforme a seguir.

- **Falta no barramento QDG-MT 13,8 kV**

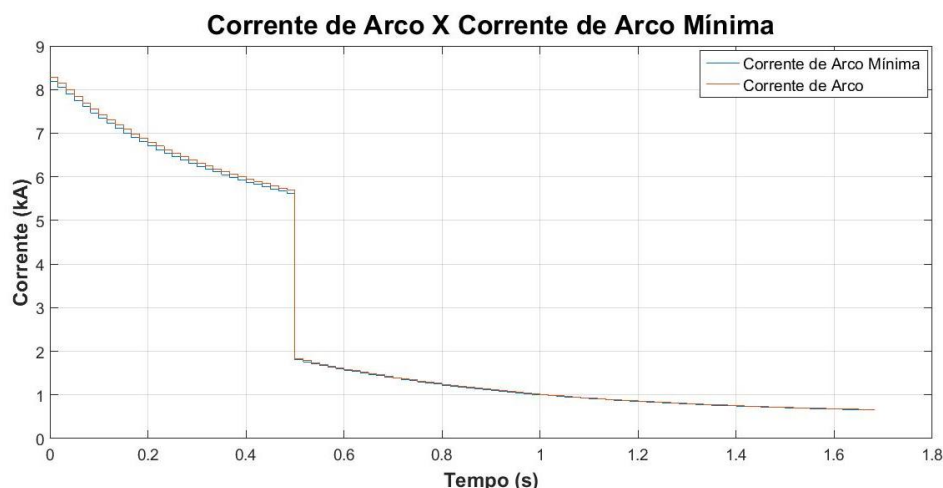
Os dispositivos de proteção do barramento QDG-MT 13,8 kV são os relés R Sec TR1 e R GER, conforme figura 7.1. A contribuição do gerador, concessionária e motores são calculados segundo os scripts desenvolvidos em Matlab.

A figura 7.14 apresenta a corrente de curto-circuito total para os cálculos realizados da corrente de arco e corrente de arco mínima. Tais valores ao longo do tempo também são apresentados conforme tabela 10.17 do Anexo 10.3.



**Figura 7. 14 - Corrente de curto-circuito total para cálculo das correntes de arco e arco mínima**  
**Fonte: Elaborado pelo autor**

A corrente de arco e corrente de arco mínima são apresentadas conforme figura 7.15. Em todo intervalo, a corrente de arco apresenta valor eficaz maior que a corrente de arco mínima, porém, devido a pouca diferença entre os valores eficazes destas correntes, a atuação do relé R Sec TR1 ocorre no mesmo instante. Os valores da corrente de arco e corrente de arco mínima também são apresentados conforme tabela 10.17 do Anexo 10.3.



**Figura 7. 15 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima**  
**Fonte: Elaborado pelo autor**

Os tempos de atuação do relé R Sec TR1, de abertura do disjuntor e o tempo total de eliminação da falta são fornecidos na tabela 7.16. Vale salientar que a determinação do tempo de atuação do relé R Sec TR1 utiliza o método descrito na seção 6.3.2.

**Tabela 7. 16 - Tempo de atuação do relé R Sec TR1 para a Corrente de Arco e Corrente de Arco Mínima**

Dispositivo	Tempo de atuação ou disparo
R Sec TR1	0,4000 s (25 amostras)
Disjuntor	0,0833 s (5 ciclos)
<b>Tempo total</b>	<b>0,4833 s (30 amostras)</b>

**Fonte: Elaborado pelo autor**

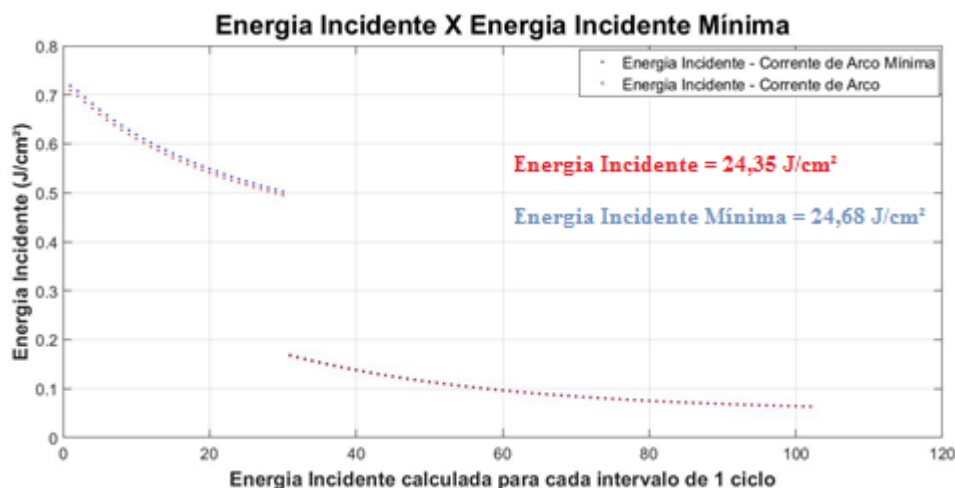
Os tempos de atuação da proteção do gerador R GER, de abertura do disjuntor e o tempo total de eliminação de falta são fornecidos na tabela 7.17. O relé R GER é ajustado para um tempo de atuação fixo, portanto, não se faz necessário o uso dos procedimentos descritos na seção 6.3.2.

**Tabela 7. 17 - Tempo de atuação do relé R GER para correntes de Arco e Arco Mínima**

Dispositivo	Tempo de atuação ou disparo
R GER (Tempo Definido)	1,6 s (97 amostras)
Disjuntor	0,0833 s (5 ciclos)
<b>Tempo total</b>	<b>1,6833 s (102 amostras)</b>

**Fonte: Elaborado pelo autor**

A energia incidente é então calculada para as correntes de arco e arco mínimo conforme apresentado na figura 7.15. Conforme já citado, para o cálculo da energia incidente total é realizado somando-se as contribuições parciais de energia incidente. Os resultados obtidos podem ser visualizados na figura 7.16 ou na tabela 10.17 do Anexo 10.3.

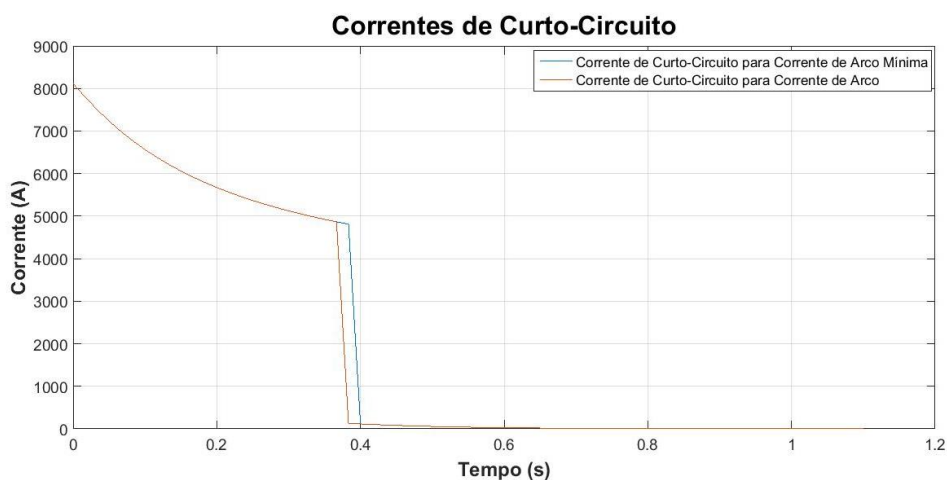


**Figura 7. 16 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima**  
**Fonte: Elaborado pelo autor**

- **Falta no barramento CCM-MT 4,16 kV**

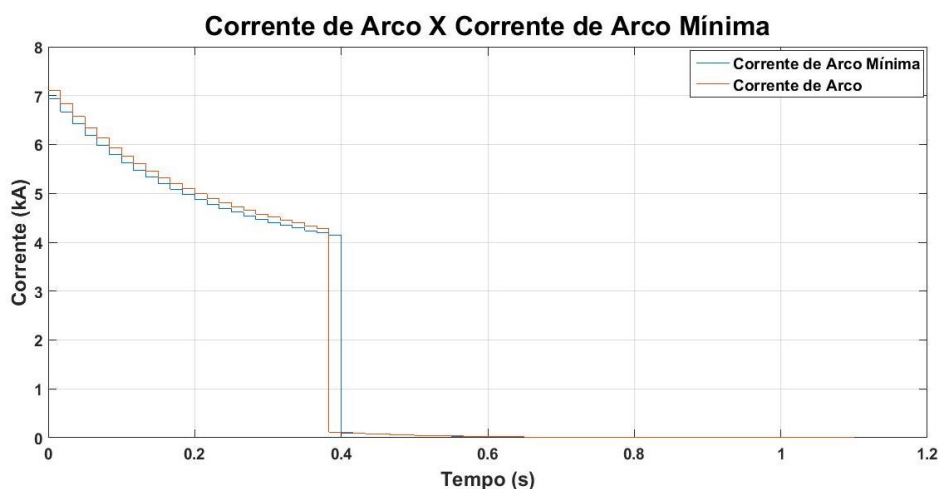
O dispositivo de proteção do barramento CCM-MT 4,16 kV é o relé R Sec TR2, conforme figura 7.1. A contribuição do gerador, concessionária e motores são calculados segundo os scripts desenvolvidos em Matlab.

A figura 7.17 apresenta as correntes de curto-circuito total para os cálculos da corrente de arco e corrente de arco mínima. A curva de corrente de curto-circuito para cálculo da corrente de arco mínima, no intervalo de 0,38 a 0,40 segundos, apresenta valores maiores. Isto acontece porque a corrente de arco mínima possui valor eficaz menor e prolonga a contribuição da corrente através do secundário do transformador. Os valores das correntes de curto-circuito ao longo do tempo são apresentados conforme tabela 10.18 do Anexo 10.3.



**Figura 7. 17- Correntes de curto-circuito total: (vermelho) para cálculo da corrente de arco e (azul) para cálculo da corrente de arco mínima**  
**Fonte: Elaborado pelo autor**

As correntes de arco e de arco mínima são apresentadas conforme figura 7.18. No intervalo de 0 a 0,38 segundos a corrente de arco possui maior valor eficaz, resultando na atuação mais rápida do relé R Sec TR2. Em contrapartida, no intervalo 0,38 a 0,40 segundos, a corrente de arco mínima é maior que a corrente de arco. Este comportamento influencia diretamente no cálculo da energia incidente do barramento. Os valores das correntes de arco e corrente de arco mínima são apresentados conforme tabela 10.18 do Anexo 10.3.



**Figura 7. 18 - Corrente de arco calculada para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) corrente de arco e (azul) corrente de arco mínima**  
**Fonte: Elaborado pelo autor**

Os tempos de atuação do relé R Sec TR2, de abertura do disjuntor e o tempo total de eliminação de falta são fornecidos na tabela 7.18. Vale salientar que a determinação do tempo de atuação do relé R Sec TR2 utiliza o método descrito na seção 6.3.2 do capítulo 6.

**Tabela 7. 18 - Tempo de atuação do relé R Sec TR2 para a Corrente de Arco**

Dispositivo	Tempo de atuação ou disparo
R Sec TR2	0,2833 s (18 amostras)
Disjuntor	0,0833 s (5 ciclos)
<b>Tempo total</b>	<b>0,3666 s (23 amostras)</b>

**Fonte: Elaborado pelo autor**

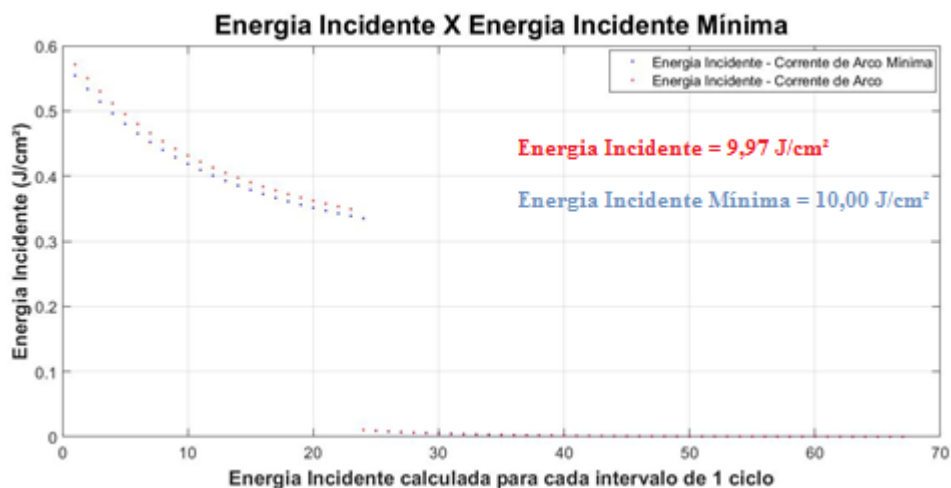
Para os valores calculados da corrente de arco mínima, é verificado novamente o tempo de atuação do dispositivo de proteção R Sec TR2 cujo valor obtido é apresentado na tabela 7.19.

**Tabela 7. 19 - Tempo de atuação do relé R Sec TR2 para a Corrente de Arco Mínima**

Dispositivo	Tempo de atuação ou disparo
R Sec TR2	0,3000 s (19 amostras)
Disjuntor	0,0833 s (5 ciclos)
<b>Tempo total</b>	<b>0,5167 (s) (23 amostras)</b>

**Fonte: Elaborado pelo autor**

A energia incidente é, portanto, calculada para as corrente de arco e arco mínima conforme mostrado na figura 7.18. Para o cálculo da energia incidente total, são somados os valores parciais de energia incidente, cujos valores podem ser visualizados na figura 7.19 e na tabela 10.18 do Anexo 10.3.

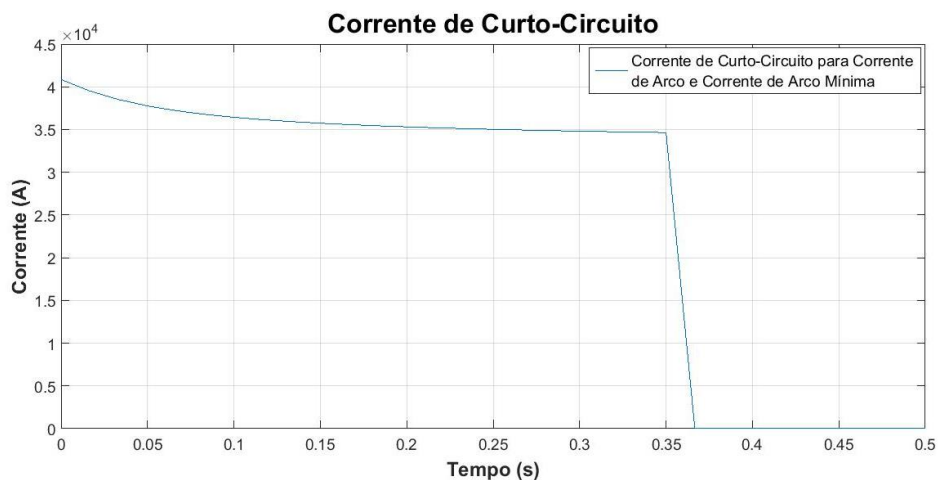


**Figura 7. 19 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima**  
**Fonte: Elaborado pelo autor**

- **Falta no barramento QDG-BT 440 V**

O dispositivo de proteção do barramento QDG-BT 440 V é o disjuntor DJ Sec TR3, conforme figura 7.1.

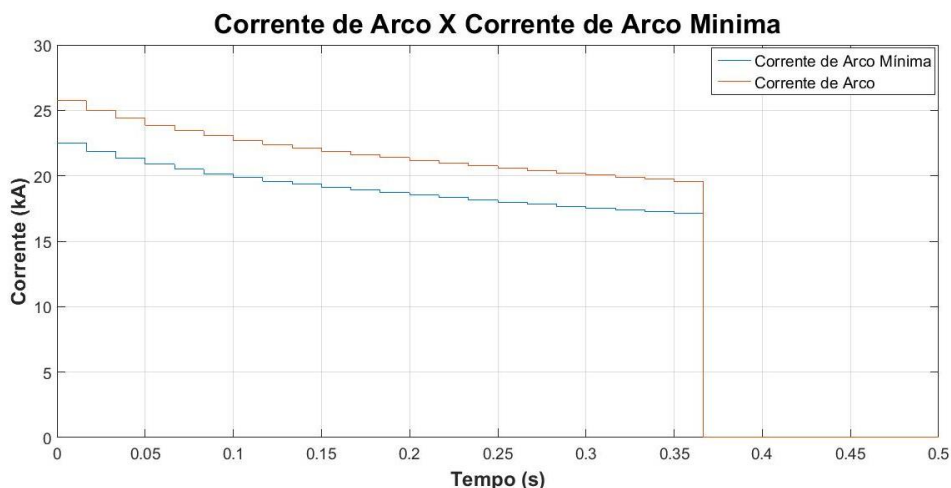
A figura 7.20 apresenta a corrente de curto-circuito total para os cálculos da corrente de arco e corrente de arco mínima. Cada valor da corrente de curto-circuito ao longo do tempo também é apresentado conforme tabela 10.19 do Anexo 10.3.



**Figura 7. 20 - Correntes de curto-circuito total para cálculo das correntes de arco e arco mínima**  
**Fonte: Elaborado pelo autor**



A corrente de arco e corrente de arco mínima são apresentadas na figura 7.21. Em todo intervalo de tempo considerado a corrente de arco possui maior valor eficaz. Porém, como o ajuste da proteção é tempo definido, o tempo de atuação da proteção é o mesmo. Os valores da corrente de arco e corrente de arco mínima podem ser observados na tabela 10.19 do Anexo 10.3.



**Figura 7. 21 - Corrente de arco calculada para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) corrente de arco e (azul) corrente de arco mínima**

**Fonte: Elaborado pelo autor**

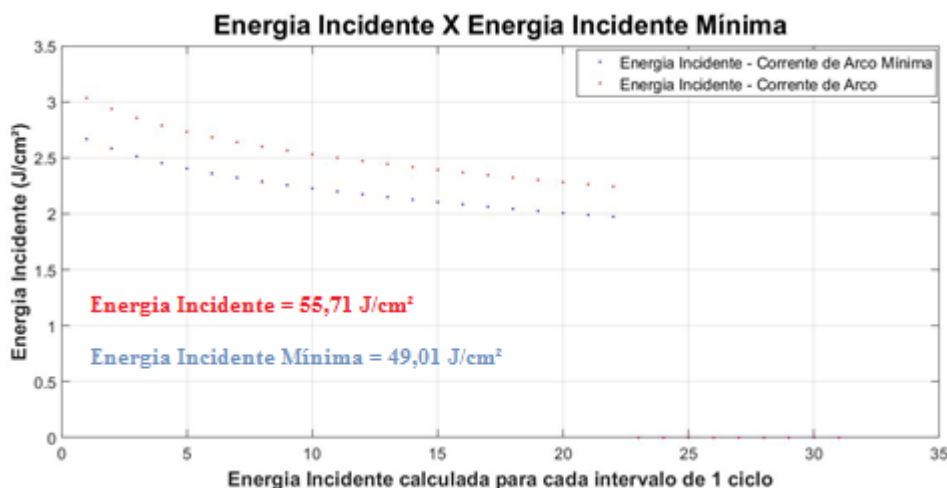
O tempo de atuação do disjuntor DJ Sec TR3 assim como o tempo total de eliminação da falta são fornecidos na tabela 7.20.

**Tabela 7. 20 - Tempo de atuação do disjuntor DJ Sec TR3 para a Corrente de Arco e Corrente de Arco Mínima**

Dispositivo	Tempo de atuação ou disparo
DJ Sec TR3 (Fixo)	0,3500 s (22 amostras)
<b>Tempo total</b>	<b>0,3500 s (22 amostras)</b>

**Fonte: Elaborado pelo autor**

A energia incidente é então calculada para as correntes de arco e arco mínima conforme apresentado na figura 7.21. Para o cálculo da energia incidente total, são somadas todas as contribuições parciais cujos resultados obtidos podem ser visualizados na figura 7.22. Os valores das energias incidentes parciais também são apresentados conforme tabela 10.19 do Anexo 10.3.



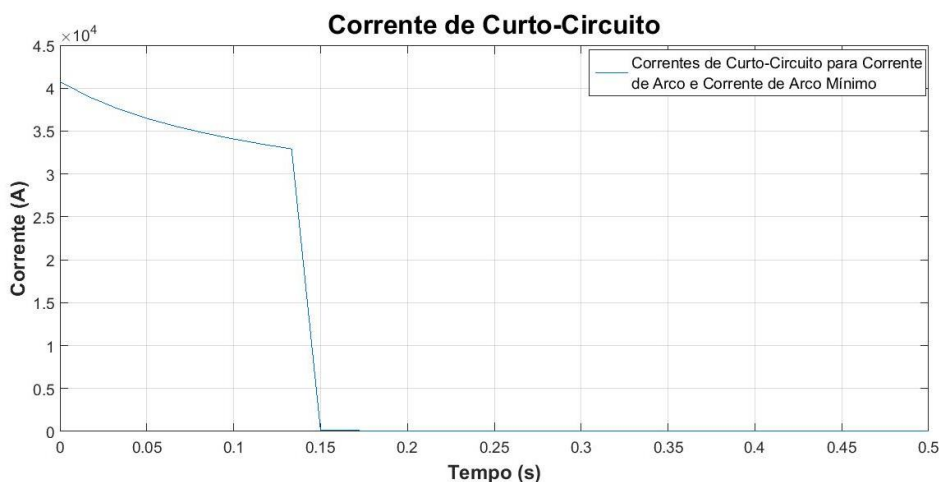
**Figura 7. 22 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima**

**Fonte: Elaborado pelo autor**

- Falta no barramento CCM-BT 440V**

O dispositivo de proteção do barramento CCM-BT 440 V é o disjuntor DJ CCM BT, conforme figura 7.1.

A figura 7.23 apresenta a corrente de curto-circuito total para os cálculos da corrente de arco e corrente de arco mínima. O valor da corrente de curto-circuito total ao longo do tempo é apresentados na tabela 10.20 do Anexo 10.3.

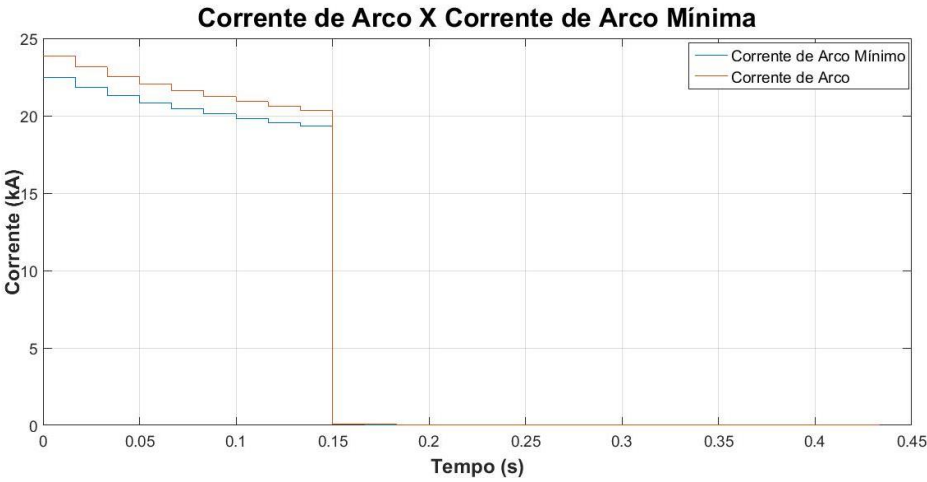


**Figura 7. 23 - Correntes de curto-circuito total para cálculo da corrente de arco e para cálculo da corrente de arco mínima**

**Fonte: Elaborado pelo autor**

A correntes de arco e corrente de arco mínima são apresentadas conforme figura 7.24. Em todo intervalo a corrente de arco possui maior valor eficaz. No entanto, como o ajuste da proteção é tempo definido, a proteção terá o mesmo tempo de atuação. Os valores das

correntes de arco e corrente de arco mínima ao longo do tempo são exibidos na tabela 10.20 do Anexo 10.3.



**Figura 7. 24 - Corrente de arco calculada para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) corrente de arco e (azul) corrente de arco mínima**  
**Fonte: Elaborado pelo autor**

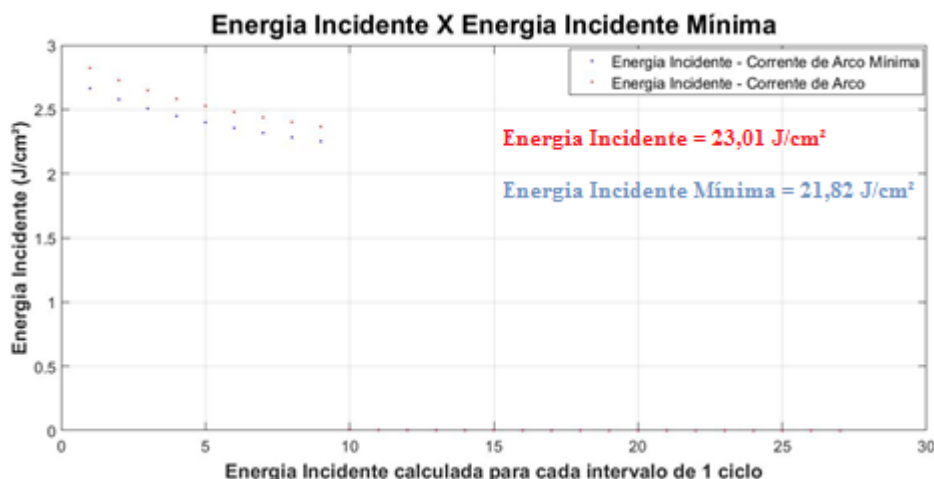
O tempo de atuação do disjuntor DJ CCM BT e o tempo de eliminação da falta são fornecidos na tabela 7.21.

**Tabela 7. 21 - Tempo de atuação do disjuntor DJ CCM BT para a Corrente de Arco e Corrente de Arco Mínima**

Dispositivo	Tempo de atuação ou disparo
DJ CCM BT (Fixo)	0,1333 s (9 amostras)
Tempo total	0,1333 s (9 amostras)

**Fonte: Elaborado pelo autor**

A energia incidente é então calculada para as correntes de arco e arco mínima conforme resultados apresentados na figura 7.24. Para o cálculo da energia incidente total, são somadas as contribuições das diversas parcelas. A energia incidente parcial para as correntes de arco e arco mínima podem ser visualizadas tanto na figura 7.25 como na tabela 10.20 do Anexo 10.3.



**Figura 7. 25 - Energias Incidentes calculadas para cada intervalo de 1 ciclo: (vermelho) energia para corrente de arco e (azul) energia para corrente de arco mínima**  
**Fonte: Elaborado pelo autor**

A tabela 7.22 apresenta os valores calculados referentes à energia incidente total para as correntes de arco e de arco mínima, bem como, os valores das correntes de primeiro ciclo da corrente de curto-circuito total, corrente de arco e corrente de arco mínima.

**Tabela 7. 22 - Resultado da análise de arco elétrico segundo o método IEEE STD 1584 – 2018 considerando o decremento AC das correntes de curto-circuito**

Nome do Barramento	Corrente de Falta Franca – Primeiro Ciclo (kA)	Corrente de Arco – Primeiro Ciclo (kA)	Corrente de Arco mínima – Primeiro Ciclo (kA)	Energia Incidente Total (J/cm²)	Energia Incidente mínima Total (J/cm²)
CCM BT 440V	40,76	23,87	22,47	23,01	21,82
CCM MT 4,16kV	8,11	7,10	6,94	9,97	10,00
QDG-BT 440V	40,86	25,73	22,51	55,71	49,01
QDG-MT 13,8kV	8,84	8,28	8,19	24,35	24,68

**Fonte: Elaborado pelo autor**

## **7.8 Comparações entre os cálculos da energia incidente para os quatro metodologias avaliadas**

Com intuito de analisar a diferença nos valores calculados da energia incidente e comparar às classificações de risco considerando as diferentes metodologias avaliadas, as tabelas 7.23 e 7.24 apresentam as diferenças percentuais observadas e as classificações de risco obtidas, respectivamente. Os valores da energia incidente calculados (i) usando o PTW – IEEE 1584 – 2002 são tomados como referência e a partir deles as diferenças percentuais são calculadas.

Tabela 7. 23 - Comparação dos níveis de energia incidente para os diferentes métodos

Nome do Barramento	Método 1 - Software “PTW”			Método 2 - Programa “MATLAB”			
	IEEE STD 1584 – 2002	IEEE STD 1584 – 2018		IEEE STD 1584 – 2002	IEEE STD 1584 – 2018		
	Referência (J/cm <sup>2</sup> )	Valor Calculado (J/cm <sup>2</sup> )	Variação (%)	Valor Calculado (J/cm <sup>2</sup> )	Variação (%)	Valor Calculado (J/cm <sup>2</sup> )	Variação (%)
CCM BT 440V	20,00	21,30	+ 6,50	23,18	+ 15,90	23,01	+ 15,05
CCM MT 4,16kV	10,70	9,14	- 14,50	13,22	+ 23,55	10,00	- 6,54
QDG-BT 440V	56,10	60,10	+ 7,13	51,71	- 7,82	55,71	- 0,69
QDG-MT 13,8kV	45,10	44,09	- 2,21	24,08	- 46,58	24,68	- 45,28

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 7. 24 - Classificação de risco/perigo conforme NFPA 70E - 2012 (NFPA, 2012)

Nome do Barramento	Método 1 - Software “PTW”		Método 2 - Programa “MATLAB”	
	IEEE STD 1584 – 2002	IEEE STD 1584 – 2018	IEEE STD 1584 – 2002	IEEE STD 1584 – 2018
CCM BT 440V	2	2	2	2
CCM MT 4,16kV	1	1	1	1
QDG-BT 440V	3	3	3	3
QDG-MT 13,8kV	3	3	2	2

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos resultados apresentados nas tabelas 7.23 e 7.24, pode-se extrair as seguintes conclusões:

- Os valores de energia incidente calculados pelo PTW/IEEE 1584-2018 nos barramentos de baixa tensão são maiores que aqueles obtidos pelo PTW/IEEE 1584 – 2002, chegando a 7,13%;
- Em contrapartida, a energia incidente determinada pelo PTW/IEEE 1584 – 2018 nos barramentos de média tensão são menores que aqueles obtidos pelo PTW/IEEE 1584 – 2002, sendo que a maior diferença ocorre para o CCM MT 4,16 kV (-14,5%);
- Ao se considerar o decaimento AC, a energia incidente resultante no barramentos de baixa tensão calculada pelo *script* em Matlab pode aumentar ou diminuir, caso a caso, dependendo do tanto valor do decremento da corrente de arco como do tempo de atuação da proteção;k
- Ao se considerar o decaimento AC, a energia incidente resultante nos barramentos de média tensão calculada pelo *script* em Matlab diminui, sendo que a maior redução (- 46,58%) ocorre no QDG-MT 13,8 kV devido a redução da corrente de contribuição do gerador local;

- De modo geral, as categorias das vestimentas foram mantidas independentemente do procedimento de cálculo utilizado, principalmente quando o valor da energia incide no meio da faixa que define as categorias conforme tabela 5.2. A única exceção ocorre no QDG-MT 13,8 kV, situação que a vestimenta foi reduzida da categoria 3 para categoria 2. Tal fato ocorre devido à presença do gerador cujo decaimento AC da contribuição local influencia substancialmente no cálculo da energia incidente resultante.

## 8 CONCLUSÕES

### 8.1 Considerações Finais

O acidente com arco elétrico tem potencial de expor trabalhadores a lesões que podem causar desde afastamentos temporários, para tratar pequenas lesões, ao caso extremo de levar o trabalhador a afastamentos definitivos, e até mesmo à morte. Isto se deve à produção de ondas de pressão, ondas sonoras, projeção de estilhaços e material fundido na ocorrência de um acidente com arco elétrico.

Na tentativa de quantificar os efeitos trazidos a trabalhadores e equipamentos, o guia IEEE Std 1584 – 2002 foi desenvolvido para realizar uma análise do arco elétrico e quantificar a energia incidente final ao qual trabalhadores são expostos, permitindo assim, selecionar até 2018 os EPI's adequados para cada atividade.

Embora fosse possível calcular e analisar o arco elétrico através do IEEE Std 1584 – 2002, as limitações na escolha das configurações dos eletrodos, reduzido número de testes para levantamento das equações e questionamentos em relação às considerações acerca do fenômeno para desenvolvimento do modelo, levaram ao desenvolvimento e apresentação do guia IEEE 1584 – 2018.

A versão 2018 do guia IEEE Std 1584, foi desenvolvida após realização de mais de 1800 testes em laboratórios, contemplando uma maior gama de configurações de eletrodos para análise e produzindo resultados mais precisos, embora tenha trazido mais complexidade na aplicação das equações.

Os efeitos da ocorrência do arco elétrico devem ser minimizados implementando medidas passivas e ativas nos ambientes industriais. Medidas passivas, implantadas no dia a dia da indústria, costumam não ser onerosas e ajudam a prevenir que acidentes aconteçam.

Medidas ativas envolvem um certo nível de conhecimento em engenharia e são onerosas para as indústrias, pois, necessitam de equipamentos para serem implantadas. O uso de equipamentos como fusíveis limitadores de corrente, resistores de aterramento e escolhas de equipamentos com maior impedância atuam no controle da corrente de curto-circuito e minimização da corrente de arco e seus efeitos.

Um programa de manutenção e acompanhamento das instalações elétricas e seus equipamentos, com diagramas elétricos atualizados, aplicados juntamente com programas de segurança e higiene industrial contribuem para diminuição dos riscos. A delimitação de

fronteiras de aproximação e aumento das distâncias de trabalho para operação e manutenção de equipamentos são fundamentais para minimizar os efeitos na ocorrência do fenômeno.

A especificação de equipamentos resistentes ao arco elétrico e fornecimento de equipamentos de proteção individuais adequados aos trabalhadores envolvidos nas tarefas da indústria ajudam a garantir uma segurança maior. Pode-se também, com auxílio de relés e dispositivos detectores de arco, atuar na proteção do sistema elétrico em tempo suficiente para que lesões graves ou fatalidades sejam minimizados.

Em trabalhos de manutenção, ajustes podem ser feitos ao reduzir os tempos de atuação e as correntes de pick-up da proteção. A implementação de uma chave externa, permite a seleção do modo de operação de manutenção e altera as parametrizações do sistema de proteção, reduzindo assim a energia incidente em caso de um acidente.

Softwares desenvolvidos, a exemplo do PTW, permitem a análise do arco elétrico, e entre os métodos de análises estão os guias IEEE Std 1584 – 2002 e 2018. Em geral aplicam as formas convencionais de análise da corrente de curto-circuito para determinação do arco elétrico (considerando a corrente de curto-circuito constante ou com decaimento em patamares). Neste contexto, foi proposta e implementada neste trabalho de pesquisa uma terceira forma de análise que considera o decaimento AC das contribuições de correntes de curto-circuito provenientes de geradores e motores, cujo objetivo foi aproximar os resultados da situação real.

A proposta de cálculo do arco elétrico considerando o decremento AC das correntes de curto-circuito permitiu a comparação das energias incidentes calculadas pelas versões 2002 e 2018 do guia IEEE 1584, além da comparação com os resultados de energias obtidos pelo software PTW não considerando o decremento AC.

Os resultados obtidos mostraram a variação percentual das energias incidentes, sendo que, o ponto de destaque foi a redução – 46,58% na energia incidente calculada para o barramento QDG MT 13,8 kV. Neste caso, a influência do decremento AC da corrente de curto-circuito do gerador permitiu inclusive a mudança na classificação de risco/perigo da categoria 3 para categoria 2. As variações nos demais barramentos, não resultaram em trocas de categoria de vestimenta, já que o valor da energia calculada está situada no meio da faixa de classificação.

A NFPA 70E declara que estudos de arco elétrico devam ser realizados a cada cinco anos, ou antecipados caso ocorra mudanças nos sistema elétrico. Dessa forma, caso o estudo não seja refeito, medidas adicionais devem ser adotadas para garantir a segurança dos



trabalhadores até que novo estudo seja realizado. Uma primeira análise é verificar se a energia calculada para o sistema está no meio da faixa que define a troca de categoria, caso seja esta situação encontrada, a revisão do estudo de caso existente poderá ser programada com maior tranquilidade. Caso contrário, se a energia incidente estiver no limiar de troca de categoria, o estudo deverá ser revisado com urgência.

## **8.2 Propostas de futuros trabalhos**

Com o objetivo de prosseguir com os estudos sobre arco elétrico, são apresentadas a seguir sugestões para desenvolvimentos futuros:

- Pesquisar quais são os outros softwares disponíveis no mercado para análise de arco além do PTW e avaliar se consideram ou não o decaimento AC da corrente de curto-circuito;
- Analisar a influência do decaimento AC em outros casos teste para ampliar a amostragem e consolidar a aplicação do modelo proposto;
- Analisar a influência do decaimento AC considerando a versão 2018, porém, considerando todas as configurações de painéis apresentados no guia IEEE Std 1584 - 2018 (VCBB, VCB, VOA, HCB e HOA).

## 9 REFERÊNCIAS

- (ABRACOPEL, 2021) Agência Brasileira de Conscientização para os Perigos Da Eletricidade, Anuário Estatístico de Acidentes de Origem elétrica 2021 – ano base 2020. Disponível em: [https://abracopel.org/wp-content/uploads/2021/03/Abracopel-APROVA\\_baixa.pdf](https://abracopel.org/wp-content/uploads/2021/03/Abracopel-APROVA_baixa.pdf) . Acesso em: 29 mar. 2021 às 15:30h
- (ABNT, 2007) ABNT, “NBR IEC 62271-200: Conjunto de manobra e controle de alta-tensão – Parte 200:Conjunto de manobra e controle em invólucro metálico para tensões acima de 1 kV até e inclusive 52 kV ”. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2007
- (CAVALHO FILHO, 2019) J. M. Carvalho Filho, Proteção de Sistemas Elétricos UNIFEI – CEPSE - 2019
- (CAWLEY, BRENNER, 2013) J. C. Cawley and B. C. Brenner, "Analyzing on-the-job electrical injuries: A survey of selected U.S. occupational electrical injuries from 2003 to 2009," in *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 19, no. 3, pp. 16-20, May-June 2013, doi: 10.1109/MIAS.2012.2215657.
- (DAS, 2012) J.C Das, Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation,First Edition – Ney Jersey: Wiley – IEEE Press, 2012.
- (ESFI, 2019) Electrical Safaty Foundation International, Workplace Injury & Fatality Statistics. Disponível em: <https://www.esfi.org/workplace-injury-and-fatality-statistics#Summary> . Acesso em: 29 mar. 2021 às 15:00h
- (GALINDO, 2015) F. Galindo, "The ABC of arc flash and mitigation techniques," 2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXV), Tegucigalpa, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/CONCAPAN.2015.7428444.
- (IEEE Std 1584, 2002) IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations," in *IEEE Std 1584-2002* , vol., no., pp.1-113, 23 Sept. 2002, doi: 10.1109/IEEESTD.2002.94138.
- (IEEE Std 1584, 2018) IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations," in *IEEE Std 1584-2018 (Revision of IEEE Std 1584-2002)* , vol., no., pp.1-134, 30 Nov. 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8563139.
- (LEE, 1982) R. H. Lee, "The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-18, no. 3, pp. 246-251, May 1982, doi: 10.1109/TIA.1982.4504068.
- (MARDEGAN, PARISE, 2018) C. S. Mardegan, G. Parise, “Equipamentos, dispositivos e técnicas para melhorar a segurança,” *O Setor Elétrico, Fascículos: Proteção Contra Arco Elétrico*, Edição 148, pp. 38-40, Mai 2018. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/capitulo-v-equipamentos-dispositivos-e-tecnicas-para-melhorar-a-seguranca/>
- (MARDEGAN, PARISE, 2018) C. S. Mardegan, G. Parise, “O Arco Elétrico,” *O Setor Elétrico, Fascículos: Proteção Contra Arco Elétrico*, Edição 144, pp. 30-35, Fev 2018. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/capitulo-ii-o-arco-eletrico/>
- (MCCONNELL, 2019) McConnell, Edward A., Jr. "IEEE 1584-2018 changes offer a robust upgrade: Comprehensive standard review impacts arc flash analysis." *Plant Engineering* 73, no. 2 (2019): 36+. Gale Academic OneFile (accessed May 18, 2021). <https://link.gale.com/apps/doc/A586241291/AONE?u=capes&sid=AONE&xid=1690e83e>

(MOHLA, 2019) D. Mohla, "The 2018 Revision of IEEE 1584 Is Here! [Standards News]," in IEEE Industry Applications Magazine, vol. 25, no. 2, pp. 84-85, March-April 2019, doi: 10.1109/MIAS.2018.2884816.

(NFPA 70E, 2012) National Fire Protection Association, NFPA 70E: Standard for Electrical Safety in the Workplace.

(QUEIROZ, SENER, 2012) A. R. S. Queiroz, E. C. Senger, "Capítulo 3 - A NFPA 70E e os requisitos de segurança para arco elétrico Seleção de EPIs", O setor elétrico, Fascículos: EPIs e proteção contra arco elétrico, Edição 74, pp. 30 – 35, Mar 2012 Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/capitulo-iii-a-nfpa-70e-e-os-requisitos-de-seguranca-para-arco-eletrico-selecao-de-epis/>

(QUEIROZ, SENER, 2012) A. R. S. Queiroz, E. C. Senger, "A Natureza e os Riscos do Arco Elétrico," *O Setor Elétrico: Proteção Contra Arco Elétrico*, Edição 72, pp. 46-51, Jan 2012. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/capitulo-i-a-natureza-e-os-riscos-do-arco-eletrico/>

(SCHNEIDER ELECTRIC, 2021) Schneider Electric, Relés de proteção contra arco voltagem. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/product-subcategory/4605-relés-de-proteção-contrar-arco-voltagem/>. Acesso em: 22 ago. 2021 às 07:30h.

(SEL, 2021) Schweitzer Engineering Laboratories, Soluções para arco elétrico. Disponível em: <https://selinc.com/pt/solutions/arc-flash-solutions/>. Acesso em: 22 ago. 2021 às 08:03.

(SILVEIRA, 1991) P. M. SILVEIRA, "Um equipamento didático utilizando microcomputador para treinamento em relés de proteção," in: Dissertação de Mestrado, Itajubá, Universidade Federal de Itajubá - Instituto de Sistemas Elétricos e Energia. (Rossi, Ronaldo; oriente.), 1991.

(SKM, 2019) SKM PTW – Power Tools for Windows Arc Flash Reference Manual - 2019

(STOKES, SWEETING, 2006) A. D. Stokes and D. K. Sweeting, "Electric arcing burn hazards," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, no. 1, pp. 134-141, Jan.-Feb. 2006, doi: 10.1109/TIA.2005.861911.

(VARIXX, 2021) Varixx, Zyggot arco: Sistema de proteção contra arco voltagem através de sensores que detectam ultravioleta. Disponível em: <https://www.varixx.com.br/products/product/25>. Acesso em: 22 ago. 2021 às 07:42.

(VERSTRATEN, LUCHTENBERG, 2013) H. Picard, J. Verstraten and R. Luchtenberg, "Practical approaches to mitigating arc flash exposure in Europe," PCIC Europe 2013, Istanbul, 2013, pp. 1-10.

(ZHANG, WANG, et al., 2020) Z. Zhang, P. Wang, S. Rau and W. Lee, "Effect of Electrode Geometry on Arc Flash Protection Boundary," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 1, pp. 57-64, Jan.-Feb. 2020, doi: 10.1109/TIA.2019.2947858.

## 10 ANEXOS

### 10.1 COEFICIENTES PARA AS EQUAÇÕES DO GUIA IEEE 1584 – 2018

Tabela 10. 1 – Coeficientes para Equação (4.1)

Configuração Eletrodo	V <sub>oc</sub> (V)	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>	k <sub>5</sub>	k <sub>6</sub>	k <sub>7</sub>	k <sub>8</sub>	k <sub>9</sub>	k <sub>10</sub>
VCB	600	- 0,04287	1,035	-0,083	0	- 0,04287	0	-4,783E-09	1,962E-06	-0,000229	0,003141
	2.700	0,0065	1,001	-0,024	-1,557E-12	0,0065	4,556E-10	-4,186E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,003191
	14.300	0,005795	1,015	-0,011	-1,557E-12	0,005795	4,556E-10	-4,186E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,003191
VCBB	600	-0,017432	0,98	-0,05	0	-0,017432	0	-5,767E-09	2,524E-06	-0,00034	0,01187
	2.700	0,002823	0,995	-0,0125	0	0,002823	-9,204E-11	2,901E-08	-3,262E-06	0,0001569	-0,004003
	14.300	0,014827	1,01	-0,01	0	0,014827	-9,204E-11	2,901E-08	-3,262E-06	0,0001569	-0,004003
HCB	600	0,054922	0,988	-0,11	0	0,054922	0	-5,382E-09	2,316E-06	-0,000302	0,0091
	2.700	0,001011	1,003	-0,0249	0	0,001011	0	4,859E-10	-1,814E-07	-9,128E-06	-0,0007
	14.300	0,008693	0,999	-0,02	0	0,008693	-5,043E-11	2,233E-08	-3,046E-06	0,000116	-0,001145
VOA	600	0,043785	1,04	-0,18	0	0,043785	0	-4,783E-09	1,962E-06	-0,000229	0,003141
	2.700	-0,02395	1,006	-0,0188	-1,557E-12	-0,02395	4,556E-10	-4,186E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,003191
	14.300	0,005371	1,0102	-0,029	-1,557E-12	0,005371	4,556E-10	-4,186E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,003191
HOA	600	0,111147	1,008	-0,24	0	0,111147	0	-3,895E-09	1,641E-06	-0,000197	0,002615
	2.700	0,000435	1,006	-0,038	0	0,000435	0	7,859E-10	-1,914E-07	-9,128E-06	-0,0007
	14.300	0,000904	0,999	-0,02	0	0,000904	0	7,859E-10	-1,914E-07	-9,128E-06	-0,0007

Fonte: Adaptado IEEE Std 1584 (2018)

Tabela 10. 2 – Coeficientes para as Equações (4.11) e (4.18)

600 V	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	$k_7$	$k_8$	$k_9$	$k_{10}$	$k_{11}$	$k_{12}$	$k_{13}$
<b>VCB</b>	0,753364	0,566	1,752636	0	0	-4,783E-09	0,000001962	-0,000229	0,003141	1,092	0	-1,598	0,957
<b>VCBB</b>	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
<b>HCB</b>	4,073745	0,344	-0,370259	0	0	-5,382E-09	0,000002316	-0,000302	0,0091	0,9725	0	-2,03	1,036
<b>VOA</b>	0,679294	0,746	1,222636	0	0	-4,783E-09	0,000001962	-0,000229	0,003141	1,092	0	-1,598	0,997
<b>HOA</b>	3,470417	0,465	-0,261863	0	0	-3,895E-09	0,000001641	-0,000197	0,002615	1,1	0	-1,99	1,04

Fonte: Adaptado IEEE Std 1584 (2018)

Tabela 10. 3 – Coeficientes para as Equações (4.12) e (4.19)

2700 V	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	$k_7$	$k_8$	$k_9$	$k_{10}$	$k_{11}$	$k_{12}$	$k_{13}$
<b>VCB</b>	2,40021	0,165	0,3542202	-1,557E-12	4,556E-10	-4,186E-08	8,346E-07	5,482E-05	-0,00319	0,9729	0	-1,569	0,9778
<b>VCBB</b>	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
<b>HCB</b>	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
<b>VOA</b>	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
<b>HOA</b>	3,616266	0,149	-0,761561	0	0	7,859E-10	-1,914E-07	-9,128E-06	-0,0007	0,9981	0	-1,639	1,078

Fonte: Adaptado IEEE Std 1584 (2018)

Tabela 10. 4 – Coeficientes para as Equações (4.13) e (4.20)

14300 V	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	$k_7$	$k_8$	$k_9$	$k_{10}$	$k_{11}$	$k_{12}$	$k_{13}$
<b>VCB</b>	2,825917	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
<b>VCBB</b>	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
<b>HCB</b>	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
<b>VOA</b>	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
<b>HOA</b>	2,04049	0,177	1,005092	0	0	7,859E10	-1,914E-07	-9,128E-06	-0,0007	0,9981	-0,05	-1,633	1,151

Fonte: Adaptado IEEE Std 1584 (2018)

Tabela 10. 5 - Coeficientes para cálculo da corrente de arco mínimo conforme equação (4.25)

Configuração Eletrodo	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	$k_7$
<b>VCB</b>	0	-0,0000014269	0,000083137	-0,0019382	0,022366	-0,12645	0,30226
<b>VCBB</b>	1,138E-06	-6,0287E-05	0,0012758	-0,013778	0,080217	-0,24066	0,33524
<b>HCB</b>	0	-3,097E-06	0,00016405	-0,0033609	0,033308	-0,16182	0,34627
<b>VOA</b>	9,5606E-07	-5,1543E-05	0,0011161	-0,01242	0,075125	-0,23584	0,33696
<b>HOA</b>	0	-3,1555E-06	0,0001682	-0,0034607	0,034124	-0,1599	0,34629

Fonte: Adaptado IEEE Std 1584 (2018)

**NOTA -** O fator de correção ( $1 - (0,5 \times \text{VarCf})$ ) é aplicado da seguinte maneira:

-  $208 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 600 \text{ V}$ : Para  $I_{arc}$  (somente corrente final)

-  $600 \text{ V} < V_{oc} \leq 15000 \text{ V}$ : Para  $I_{arc\_600}$ ,  $I_{arc\_2700}$  e  $I_{arc\_14300}$  (correntes de arco médias intermediárias). O valor final do  $I_{arc}$  herda o fator de correção.

O coeficiente "0,5" indica que a variação é aplicada à corrente de arco média para obter um valor de limite mais baixo.

## 10.2 DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO - CASOS TESTE

**Tabela 10. 6 - Dados da concessionária de energia elétrica**

Nome Barramento	Nome contribuição	Tensão L-L	MVA	X''d	X/R
SE Principal	Fonte	138.000	832,00		
Contribuição trifásica			832,00		11,49
Contribuição monofásica a terra			300,00		11,49
Impedância de Sequência Positiva (100 MVA)			0,0104 + j 0,1197 pu		
Impedância de Sequência Zero (100 MVA)			0,0081 + j 0,0926 pu		

Fonte: Adaptado SKM (2019)

**Tabela 10. 7 - Parâmetros do gerador**

Nome Barramento	Nome contribuição	Tensão L-L	MVA	X''d	X/R
QDG-MT 13,8 kV	Gerador	138.000	20,40	0,2050	40,00
Impedância de Neutro			19,92 + j 0,0000 Ohms		
Impedância de Sequência Positiva (100 MVA)			0,0251 + j 1,00		
Impedância de Sequência Negativa (100 MVA)			0,0173 + j 0,7353		
Impedância de Sequência Zero (100 MVA)			31,40 + j 0,7353		

Fonte: Adaptado SKM (2019)

**Tabela 10. 8 - Parâmetros dos transformadores**

Nome Transformador	Registro primário	Tensão L – L	Registro Secundário	Tensão L – L	Carga Máxima (kVA)	kVA Nominal
<b>TR1</b>	<b>SE Principal - D</b>	<b>138.000</b>	<b>QDG-MT 13,8 kV YG</b>	<b>13.800</b>	<b>12500</b>	<b>10.000</b>
	Sequência Positiva: Z%: 0,560 + j 9,06 (Zpu 0,056 + j 0,906)					
	Sequência Zero. Z%: 0,560 + j 9,06 (Sec 31,43 + j 0,906 Pri aberto)					
	Taps Pri. 0,000% Sec. 0,000% Defasagem Pri. – Sec.: 30 graus					
	Impedância neutro secundário Z: 19,92 + j 0,000 Ohms					
<b>TR2</b>	<b>QDG-MT 13,8 kV-D</b>	<b>13.800</b>	<b>CCM MT 4, YG</b>	<b>4.160</b>	<b>3.000</b>	<b>3.000</b>
	Sequência Positiva: Z%: 0,596 + j 5,41 (Zpu 0,198 + j 1,80)					
	Sequência Zero. Z%: 0,596 + j 5,41 (Sec 208,3 + j 1,80 Pri aberto)					
	Taps Pri. 0,000% Sec. 0,000% Defasagem Pri. – Sec.: 30 graus					
	Impedância neutro secundário Z: 12,01 + j 0,000 Ohms					
<b>TR3</b>	<b>QDG-MT 13,8 kV-D</b>	<b>13.800</b>	<b>CCM MT4, YG</b>	<b>440</b>	<b>2.000</b>	<b>2.000</b>
	Sequência Positiva: Z%: 0,777 + j 6,06 (Zpu 0,388 + j 3,03)					
	Sequência Zero. Z%: 0,777 + j 6,06 (Sec 0,388 + j 3,03 Pri aberto)					
	Taps Pri. 0,000% Sec. 0,000% Defasagem Pri. – Sec.: 30 graus					
	Impedância neutro secundário Z: 12,01 + j 0,000 Ohms					

Fonte: Adaptado SKM (2019)

Tabela 10. 9 - Parâmetros dos cabos

Nome cabo	Origem	Destino	Quantidade Fases	Tensão L- L	Comprimento	Seção	Tipo
<b>Cabo CCM BT</b>	QDG-BT 4	CCM BT 440 V	1	440	0,1	0,6/1 kV	Cobre
	Material do duto: Não-magnético, Tipo Isolação: PVC e Classe Isolamento: 0,6/1 kV						
	Impedância (+) e (-): 0,0900 + j 0,1000 Ohms/1000 m - 0,0046 + j 0,0052 pu						
	Impedância Z0: 0,0900 + j 0,1000 Ohms/1000 m - 0,0046 + j 0,0052 pu						
<b>Cabo</b>	CCM BT 440 V	BUS - 0016	1	440	0,1 metro	16	Cobre
<b>Motor BT</b>	Material do duto: Não-magnético, Tipo Isolação: PVC e Classe Isolamento: 0,6/1 kV						
	Impedância (+) e (-): 1,38 + j 0,1200 Ohms/1000 m - 0,0713 + j 0,0062 pu						
	Impedância Z0: 1,38 + j 0,1200 Ohms/1000 m - 0,0713 + j 0,0062 pu						
<b>Cabo</b>	CCM MT 4	BUS - 0019	1	4.160	0,1 metro	25	Cobre
<b>Motor MT</b>	Material do duto: Não-magnético, Tipo Isolação: EPR e Classe Isolamento: 3,66 kV						
	Impedância (+) e (-): 0,9700 + j 0,1400 Ohms/1000 m - 0,00056 + j 0,00008 pu						
	Impedância Z0: 0,9700 + j 0,1400 Ohms/1000 m - 0,00056 + j 0,00008 pu						

Fonte: Adaptado SKM (2019)

Tabela 10. 10 – Parâmetro dos motores

Nome Barramento	Nome Contribuição	Tensão L-L	kVA Base	X”d	X/R	Número Motor
<b>CCM BT 440V</b>	Motor BT 01	440	46,88	0,17	8,00	1,00
	Impedância de Sequência Positiva (Base 100 MVA ) 45,32 + j 362,56 pu					
<b>CCM MT 4,16 kV</b>	Motor MT 01	4.160	636,69	0,1670	20,0	1,0
	Impedância de Sequência Positiva (Base 100 MVA ) 1,31+ j 26,23 pu					
<b>CCM BT 440V</b>	Motor BT 02	440	46,88	0,17	8,00	1,00
	Impedância de Sequência Positiva (Base 100 MVA ) 45,32 + j 362,56 pu					
<b>CCM BT 440V</b>	Motor BT 03	440	46,88	0,17	8,00	1,00
	Impedância de Sequência Positiva (Base 100 MVA ) 45,32 + j 362,56 pu					
<b>CCM BT 440V</b>	Motor BT 04	440	46,88	0,17	8,00	1,00
	Impedância de Sequência Positiva (Base 100 MVA ) 45,32 + j 362,56 pu					
<b>CCM BT 440V</b>	Motor BT 05	440	46,88	0,17	8,00	1,00
	Impedância de Sequência Positiva (Base 100 MVA ) 45,32 + j 362,56 pu					
<b>CCM BT 440V</b>	Motor BT 06	440	46,88	0,17	8,00	1,00
	Impedância de Sequência Positiva (Base 100 MVA ) 45,32 + j 362,56 pu					
<b>CCM MT 4,16 kV</b>	Motor MT 02	4.160	636,69	0,1670	20,0	1,0
	Impedância de Sequência Positiva (Base 100 MVA ) 1,31+ j 26,23 pu					
<b>CCM MT 4,16 kV</b>	Motor MT 03	4.160	636,69	0,1670	20,0	1,0
	Impedância de Sequência Positiva (Base 100 MVA ) 1,31+ j 26,23 pu					
<b>CCM MT 4,16 kV</b>	Motor MT 04	4.160	636,69	0,1670	20,0	1,0
	Impedância de Sequência Positiva (Base 100 MVA ) 1,31+ j 26,23 pu					
<b>QDG – BT 440 V</b>	Motor 02 BT	440	100,00	0,1687	8,00	1
	Impedância de Sequência Positiva (Base 100 MVA ) 21,09 + j 168,69 pu					
<b>QDG – BT 440 V</b>	Motor 03 BT	440	100,00	0,1687	8,00	1
	Impedância de Sequência Positiva (Base 100 MVA ) 21,09 + j 168,69 pu					

Fonte: Adaptado SKM (2019)



**Tabela 10. 11 - Dados entrada para equações do guia IEEE 1584 - 2002**

<b>Barramento</b>	<b>Aterramento</b>	<b>Tipo Equipamento</b>	<b>GAP (mm)</b>	<b>Distância de trabalho (mm)</b>
QDG-MT 13,8 kV	Sim	SWG	152	910
CCM-MT 4,16 kV	Não	SWG	104	910
QDG-BT 440 V	Sim	SWG	32	610
CCM-BT 440 V	Sim	SWG	32	610

**Fonte: Adaptado SKM (2019)****Tabela 10. 12 - Dados de entrada para equações do guia IEEE 1584 - 2018**

<b>Barramento</b>	<b>Tipo Equipamento</b>	<b>Configuração Eletrodo</b>	<b>Largura da caixa</b>	<b>Altura da caixa</b>	<b>Profundidade da caixa</b>	<b>GAP (mm)</b>	<b>Distância trabalho (mm)</b>
QDG-MT 13,8 kV	SWG	VCB	762	1143	762	152	914
CCM-MT 4,16 kV	SWG	VCB	762	1143	762	104	914
QDG-BT 440 V	SWG	VCB	508	508	508	32	610
CCM-BT 440 V	SWG	VCB	508	508	508	32	610

**Fonte: Adaptado SKM (2019)**

## 10.3 VALORES PARCIAIS DAS CORRENTES E ENERGIAS INCIDENTES GERADOS PELOS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS EM MATLAB

### 10.3.1 Parâmetros parciais do barramento QDG-MT 13,8 kV – Equações Guia IEEE 1584 – 2002

Tabela 10. 13 - Valores intermediários - Barramento QDG-MT 13,8 kV – IEEE Std 1584 - 2002

Ciclo	Corrente de Curto-Circuito Total (A)	Corrente de arco (kA)	Corrente de arco mínima (kA)	Energia Incidente Parcial (J/cm²)	Energia Incidente Parcial Mínima (J/cm²)	Ciclo	Corrente de Curto-Circuito Total (A)	Corrente de arco (kA)	Corrente de arco mínima (kA)	Energia Incidente Parcial (J/cm²)	Energia Incidente Parcial Mínima (J/cm²)
1	8842,04	8,60	6,23	0,7634	0,5386	52	1261,75	1,27	1,22	0,0964	0,0928
2	8698,33	8,46	6,14	0,7502	0,5307	53	1239,59	1,25	1,21	0,0946	0,0913
3	8530,96	8,30	6,04	0,7349	0,5214	54	1218,18	1,23	1,19	0,0929	0,0899
4	8365,70	8,14	5,95	0,7198	0,5123	55	1197,47	1,20	1,17	0,0912	0,0885
5	8209,23	7,99	5,85	0,7055	0,5036	56	1177,45	1,19	1,16	0,0896	0,0872
6	8062,46	7,85	5,77	0,6921	0,4955	57	1158,09	1,17	1,14	0,0880	0,0859
7	7924,75	7,72	5,68	0,6795	0,4878	58	1139,37	1,15	1,12	0,0865	0,0846
8	7795,20	7,60	5,61	0,6677	0,4806	59	1121,28	1,13	1,11	0,0851	0,0834
9	7672,95	7,48	5,53	0,6566	0,4738	60	1103,78	1,11	1,09	0,0837	0,0822
10	7557,27	7,37	5,46	0,6461	0,4674	61	1086,86	1,10	1,08	0,0823	0,0811
11	7447,54	7,26	5,40	0,6361	0,4612	62	1070,49	1,08	1,07	0,0810	0,0800
12	7343,26	7,16	5,33	0,6267	0,4554	63	1054,67	1,06	1,05	0,0797	0,0789
13	7243,99	7,07	5,27	0,6177	0,4498	64	1039,37	1,05	1,04	0,0785	0,0779
14	7149,34	6,98	5,21	0,6091	0,4445	65	1024,57	1,03	1,03	0,0773	0,0769
15	7058,99	6,89	5,16	0,6009	0,4394	66	1010,26	1,02	1,02	0,0761	0,0759
16	6972,63	6,81	5,11	0,5931	0,4346	67	996,42	1,01	1,00	0,0750	0,0750
17	6890,01	6,73	5,06	0,5857	0,4299	68	983,04	0,99	0,99	0,0740	0,0741
18	6810,89	6,65	5,01	0,5785	0,4255	69	970,09	0,98	0,98	0,0729	0,0732
19	6735,07	6,58	4,96	0,5717	0,4212	70	957,57	0,97	0,97	0,0719	0,0723
20	6662,34	6,51	4,92	0,5651	0,4171	71	945,47	0,96	0,96	0,0710	0,0715
21	6592,54	6,44	4,87	0,5588	0,4131	72	933,76	0,94	0,95	0,0700	0,0707
22	6525,50	6,38	4,83	0,5528	0,4093	73	922,44	0,93	0,94	0,0691	0,0699
23	6461,08	6,32	4,79	0,5470	0,4057	74	911,49	0,92	0,93	0,0683	0,0692
24	6399,15	6,26	4,75	0,5414	0,4022	75	900,89	0,91	0,92	0,0674	0,0684
25	6339,57	6,20	4,72	0,5361	0,3988	76	890,65	0,90	0,91	0,0666	0,0677
26	6282,23	6,15	4,68	0,5309	0,3955	77	880,74	0,89	0,91	0,0658	0,0671
27	6227,03	6,09	4,65	0,5260	0,3924	78	871,16	0,88	0,90	0,0651	0,0664
28	6173,87	6,04	4,61	0,5212	0,3893	79	861,90	0,87	0,89	0,0643	0,0658
29	6122,65	5,99	4,58	0,5166	0,3864	80	852,93	0,86	0,88	0,0636	0,0651
30	2002,94	2,00	4,55	0,1576	0,3836	81	844,26	0,85	0,87	0,0629	0,0645
31	1955,35	1,95	4,52	0,1536	0,3809	82	835,88	0,85	0,87	0,0623	0,0640
32	1909,46	1,91	4,49	0,1498	0,3783	83	827,77	0,84	0,86	0,0616	0,0634
33	1865,20	1,86	4,46	0,1461	0,3757	84	819,93	0,83	0,85	0,0610	0,0629
34	1822,50	1,82	4,44	0,1425	0,3733	85	812,34	0,82	0,85	0,0604	0,0623
35	1781,30	1,78	1,63	0,1391	0,1267	86	805,01	0,82	0,84	0,0598	0,0618
36	1741,53	1,74	1,60	0,1358	0,1241	87	797,91	0,81	0,83	0,0593	0,0613
37	1703,14	1,70	1,57	0,1326	0,1217	88	791,05	0,80	0,83	0,0587	0,0609
38	1666,08	1,67	1,54	0,1296	0,1193	89	784,41	0,79	0,82	0,0582	0,0604
39	1630,30	1,63	1,52	0,1266	0,1170	90	777,99	0,79	0,82	0,0577	0,0600
40	1595,73	1,60	1,49	0,1238	0,1147	91	771,78	0,78	0,81	0,0572	0,0595

41	1562,35	1,56	1,46	0,1210	0,1125	92	765,77	0,78	0,81	0,0567	0,0591
42	1530,11	1,53	1,44	0,1184	0,1104	93	759,96	0,77	0,80	0,0563	0,0587
43	1498,96	1,50	1,41	0,1158	0,1084	94	754,35	0,77	0,80	0,0558	0,0583
44	1468,86	1,47	1,39	0,1133	0,1064	95	748,91	0,76	0,79	0,0554	0,0579
45	1439,77	1,44	1,37	0,1110	0,1045	96	743,66	0,75	0,79	0,0550	0,0576
46	1411,67	1,42	1,34	0,1087	0,1027	97	738,57	0,75	0,78	0,0546	0,0572
47	1384,51	1,39	1,32	0,1064	0,1009	98	733,65	0,74	0,78	0,0542	0,0569
48	1358,26	1,36	1,30	0,1043	0,0992	99	728,90	0,74	0,77	0,0538	0,0565
49	1332,89	1,34	1,28	0,1022	0,0975	100	724,30	0,74	0,77	0,0535	0,0562
50	1308,37	1,31	1,26	0,1002	0,0959	101	719,85	0,73	0,77	0,0531	0,0559
51	1284,66	1,29	1,24	0,0983	0,0943	102	715,55	0,73	0,76	0,0528	0,0556

Fonte: Elaborado pelo autor

### 10.3.2 Parâmetros parciais do barramento CCM-MT 4,16 kV – Equações Guia IEEE 1584 – 2002

Tabela 10. 14 - Valores intermediários - Barramento CCM-MT 4,16 kV – IEEE Std 1584 - 2002

Ciclo	Corrente de Curto-Circuito Total (A)	Corrente de arco (kA)	Corrente de arco mínima (kA)	Energia Incidente Parcial (J/cm²)	Energia Incidente Parcial Mínima (J/cm²)	Ciclo	Corrente de Curto-Circuito Total (A)	Corrente de arco (kA)	Corrente de arco mínima (kA)	Energia Incidente Parcial (J/cm²)	Energia Incidente Parcial Mínima (J/cm²)
1	8115,25	7,9043	5,797	0,80053	0,5725	35	34,74	0,0371	0,061	0,00244	0,0042
2	7799,99	7,6024	5,608	0,76753	0,5524	36	30,79	0,0330	0,055	0,00214	0,0037
3	7503,61	7,3183	5,429	0,73658	0,5334	37	27,29	0,0293	0,050	0,00188	0,0033
4	7233,09	7,0589	5,265	0,70839	0,5160	38	24,18	0,0260	0,045	0,00166	0,0030
5	6987,97	6,8237	5,116	0,68291	0,5002	39	21,43	0,0231	0,041	0,00146	0,0027
6	6765,89	6,6104	4,980	0,65987	0,4858	40	18,99	0,0205	0,037	0,00128	0,0024
7	6564,29	6,4168	4,855	0,63899	0,4727	41	16,83	0,0182	0,033	0,00113	0,0022
8	6380,82	6,2404	4,742	0,62003	0,4608	42	14,91	0,0162	0,030	0,00099	0,0019
9	6213,41	6,0794	4,637	0,60276	0,4498	43	13,22	0,0144	0,027	0,00087	0,0017
10	6060,28	5,9321	4,542	0,58699	0,4398	44	11,71	0,0127	0,025	0,00077	0,0016
11	5919,89	5,7970	4,454	0,57255	0,4306	45	10,38	0,0113	0,022	0,00067	0,0014
12	5790,88	5,6728	4,372	0,55930	0,4221	46	9,20	0,0101	0,020	0,00059	0,0013
13	5672,08	5,5584	4,297	0,54711	0,4143	47	8,15	0,0089	0,018	0,00052	0,0011
14	5562,44	5,4528	4,228	0,53588	0,4070	48	7,22	0,0079	0,016	0,00046	0,0010
15	5461,05	5,3550	4,163	0,52551	0,4003	49	6,40	0,0070	0,015	0,00040	0,0009
16	5367,09	5,2645	4,103	0,51591	0,3941	50	5,67	0,0063	0,013	0,00035	0,0008
17	5279,84	5,1803	4,048	0,50700	0,3883	51	5,03	0,0056	0,012	0,00031	0,0007
18	5198,67	5,1020	3,996	0,49872	0,3829	52	4,45	0,0049	0,011	0,00027	0,0006
19	5123,00	5,0290	3,947	0,49101	0,3779	53	3,95	0,0044	0,010	0,00024	0,0006
20	212,82	0,2205	3,901	0,01671	0,3732	54	3,50	0,0039	0,009	0,00021	0,0005
21	188,60	0,1958	3,859	0,01470	0,3687	55	3,10	0,0035	0,008	0,00019	0,0005
22	167,14	0,1739	3,819	0,01293	0,3646	56	2,75	0,0031	0,007	0,00016	0,0004
23	148,11	0,1544	3,781	0,01137	0,3607	57	2,43	0,0027	0,007	0,00014	0,0004
24	131,25	0,1371	3,745	0,01000	0,3570	58	2,16	0,0024	0,006	0,00013	0,0003
25	116,32	0,1218	3,712	0,00880	0,3536	59	1,91	0,0021	0,005	0,00011	0,0003
26	103,08	0,1081	3,680	0,00774	0,3503	60	1,69	0,0019	0,005	0,00010	0,0003
27	91,35	0,0960	3,650	0,00680	0,3472	61	1,50	0,0017	0,004	0,00009	0,0002
28	80,95	0,0853	0,123	0,00598	0,0089	62	1,33	0,0015	0,004	0,00008	0,0002
29	71,74	0,0757	0,112	0,00526	0,0080	63	1,18	0,0013	0,004	0,00007	0,0002
30	63,57	0,0672	0,101	0,00463	0,0072	64	1,04	0,0012	0,003	0,00006	0,0002
31	56,34	0,0597	0,091	0,00407	0,0064	65	0,93	0,0011	0,003	0,00005	0,0002
32	49,92	0,0530	0,082	0,00358	0,0058	66	0,82	0,0009	0,003	0,00005	0,0001
33	44,24	0,0471	0,074	0,00315	0,0052	67	0,73	0,0008	0,002	0,00004	0,0001
34	39,21	0,0418	0,067	0,00277	0,0046						

Fonte: Elaborado pelo autor

### 10.3.3 Parâmetros parciais do barramento QDG-BT 440 V – Equações Guia IEEE 1584 – 2002

Tabela 10. 15 - Valores intermediários - Barramento QDG-BT 440 V – IEEE Std 1584 - 2002

Ciclo	Corrente de Curto-Circuito Total (A)	Corrente de arco (kA)	Corrente de arco mínima (kA)	Energia Incidente Parcial (J/cm²)	Energia Incidente e Parcial Mínima (J/cm²)	Ciclo	Corrente de Curto-Circuito Total (A)	Corrente de arco (kA)	Corrente de arco mínima (kA)	Energia Incidente Parcial (J/cm²)	Energia Incidente e Parcial Mínima (J/cm²)
1	40863,47	18,555	11,973	2,86365	1,7834	17	29755,06	14,348	9,622	2,16868	1,4081
2	39101,31	17,904	11,615	2,75514	1,7258	18	29442,42	14,226	9,552	2,14870	1,3970
3	37699,93	17,382	11,326	2,66843	1,6795	19	29143,91	14,109	9,486	2,12959	1,3865
4	36571,21	16,959	11,092	2,59829	1,6419	20	28858,47	13,997	9,421	2,11131	1,3763
5	35638,73	16,608	10,896	2,54015	1,6106	21	28585,18	13,889	9,360	2,09378	1,3666
6	34847,02	16,308	10,729	2,49063	1,5839	22	28323,23	13,786	9,301	2,07695	1,3573
7	34158,02	16,046	10,582	2,44743	1,5605	23	2,81	0,008	0,016	0,00064	0,0014
8	33545,9	15,813	10,451	2,40895	1,5396	24	2,07	0,006	0,013	0,00049	0,0011
9	32993,06	15,601	10,332	2,37413	1,5207	25	1,53	0,005	0,011	0,00038	0,0009
10	32487,23	15,407	10,223	2,34221	1,5033	26	1,13	0,004	0,009	0,00029	0,0007
11	32019,73	15,227	10,121	2,31265	1,4871	27	0,84	0,003	0,007	0,00022	0,0006
12	31584,24	15,059	10,026	2,28506	1,4720	28	0,62	0,002	0,006	0,00017	0,0005
13	31176,05	14,901	9,936	2,25916	1,4578	29	0,46	0,002	0,005	0,00013	0,0004
14	30791,56	14,752	9,852	2,23473	1,4444	30	0,34	0,001	0,004	0,00010	0,0003
15	30427,98	14,611	9,772	2,21159	1,4317	31	0,25	0,001	0,003	0,00008	0,0002
16	30083,09	14,476	9,695	2,18961	1,4196						

Fonte: Elaborado pelo autor

### 10.3.4 Parâmetros parciais do barramento CCM-BT 440 V – Equações Guia IEEE 1584 – 2002

Tabela 10. 16 - Valores intermediários - Barramento CCM-BT 440 V – IEEE Std 1584 - 2002

Ciclo	Corrente de Curto-Circuito Total (A)	Corrente de arco (kA)	Corrente de arco mínima (kA)	Energia Incidente Parcial (J/cm²)	Energia Incidente Parcial Mínima (J/cm²)	Ciclo	Corrente de Curto-Circuito Total (A)	Corrente de arco (kA)	Corrente de arco mínima (kA)	Energia Incidente Parcial (J/cm²)	Energia Incidente Parcial Mínima (J/cm²)
1	40756,46	18,516	11,951	2,8571	1,7799	15	31,39	0,055	0,086	0,0053	0,0085
2	38999,59	17,866	11,594	2,7489	1,7224	16	23,20	0,043	0,069	0,0041	0,0068
3	37603,06	17,346	11,306	2,6624	1,6763	17	17,15	0,034	0,056	0,0031	0,0054
4	36478,83	16,924	11,072	2,5925	1,6388	18	12,68	0,027	0,046	0,0024	0,0043
5	35550,55	16,574	10,877	2,5346	1,6076	19	9,38	0,021	0,037	0,0019	0,0035
6	34762,81	16,276	10,711	2,4854	1,5810	20	6,93	0,016	0,030	0,0014	0,0028
7	34077,59	16,016	10,565	2,4424	1,5577	21	5,12	0,013	0,025	0,0011	0,0022
8	33469,09	15,783	10,434	2,4041	1,5370	22	3,79	0,010	0,020	0,0008	0,0018
9	32919,71	15,573	10,316	2,3695	1,5181	23	2,80	0,008	0,016	0,0006	0,0014
10	142,13	0,189	0,242	0,0201	0,0263	24	2,07	0,006	0,013	0,0005	0,0011
11	105,07	0,148	0,197	0,0154	0,0210	25	1,53	0,005	0,011	0,0004	0,0009
12	77,68	0,116	0,160	0,0118	0,0168	26	1,13	0,004	0,009	0,0003	0,0007
13	57,43	0,090	0,130	0,0091	0,0134	27	0,84	0,003	0,007	0,0002	0,0006
14	42,45	0,071	0,105	0,0070	0,0107						

Fonte: Elaborado pelo autor

### 10.3.5 Parâmetros parciais do barramento QDG-MT 13,8 kV – Equações Guia IEEE 1584 – 2018

**Tabela 10. 17 - Valores intermediários - Barramento QDG-MT 13,8 kV – IEEE Std 1584 - 2018**

Ciclo	Corrente de Curto-Circuito Total (A)	Corrente de arco (kA)	Corrente de arco mínima (kA)	Energia Incidente Parcial (J/cm²)	Energia Incidente Parcial Mínima (J/cm²)	Ciclo	Corrente de Curto-Circuito Total (A)	Corrente de arco (kA)	Corrente de arco mínima (kA)	Energia Incidente Parcial (J/cm²)	Energia Incidente Parcial Mínima (J/cm²)
1	8842,04	8,28	8,19	0,71	0,72	52	1261,75	1,17	1,16	0,11	0,11
2	8698,33	8,15	8,05	0,70	0,71	53	1239,59	1,15	1,14	0,11	0,11
3	8530,96	7,99	7,90	0,68	0,69	54	1218,18	1,13	1,12	0,11	0,11
4	8365,70	7,84	7,75	0,67	0,68	55	1197,47	1,11	1,10	0,10	0,11
5	8209,23	7,69	7,60	0,66	0,67	56	1177,45	1,09	1,08	0,10	0,10
6	8062,46	7,56	7,47	0,65	0,66	57	1158,09	1,08	1,06	0,10	0,10
7	7924,75	7,43	7,34	0,64	0,65	58	1139,37	1,06	1,05	0,10	0,10
8	7795,20	7,31	7,22	0,63	0,64	59	1121,28	1,04	1,03	0,10	0,10
9	7672,95	7,19	7,11	0,62	0,63	60	1103,78	1,02	1,01	0,10	0,10
10	7557,27	7,09	7,00	0,61	0,62	61	1086,86	1,01	1,00	0,09	0,10
11	7447,54	6,98	6,90	0,60	0,61	62	1070,49	0,99	0,98	0,09	0,09
12	7343,26	6,89	6,80	0,59	0,60	63	1054,67	0,98	0,97	0,09	0,09
13	7243,99	6,79	6,71	0,59	0,59	64	1039,37	0,96	0,95	0,09	0,09
14	7149,34	6,70	6,62	0,58	0,59	65	1024,57	0,95	0,94	0,09	0,09
15	7058,99	6,62	6,54	0,57	0,58	66	1010,26	0,94	0,93	0,09	0,09
16	6972,63	6,54	6,46	0,57	0,57	67	996,42	0,92	0,91	0,09	0,09
17	6890,01	6,46	6,38	0,56	0,57	68	983,04	0,91	0,90	0,09	0,09
18	6810,89	6,39	6,31	0,55	0,56	69	970,09	0,90	0,89	0,08	0,09
19	6735,07	6,32	6,24	0,55	0,55	70	957,57	0,89	0,88	0,08	0,08
20	6662,34	6,25	6,17	0,54	0,55	71	945,47	0,88	0,87	0,08	0,08
21	6592,54	6,18	6,11	0,54	0,54	72	933,76	0,87	0,86	0,08	0,08
22	6525,50	6,12	6,05	0,53	0,54	73	922,44	0,85	0,84	0,08	0,08
23	6461,08	6,06	5,99	0,53	0,53	74	911,49	0,84	0,83	0,08	0,08
24	6399,15	6,00	5,93	0,52	0,53	75	900,89	0,83	0,82	0,08	0,08
25	6339,57	5,95	5,88	0,52	0,52	76	890,65	0,82	0,82	0,08	0,08
26	6282,23	5,89	5,82	0,51	0,52	77	880,74	0,82	0,81	0,08	0,08
27	6227,03	5,84	5,77	0,51	0,51	78	871,16	0,81	0,80	0,08	0,08
28	6173,87	5,79	5,72	0,50	0,51	79	861,90	0,80	0,79	0,08	0,08
29	6122,65	5,74	5,68	0,50	0,51	80	852,93	0,79	0,78	0,07	0,08
30	6073,29	5,70	5,63	0,50	0,50	81	844,26	0,78	0,77	0,07	0,07
31	1955,35	1,83	1,80	0,17	0,17	82	835,88	0,77	0,76	0,07	0,07
32	1909,46	1,78	1,76	0,16	0,17	83	827,77	0,77	0,76	0,07	0,07
33	1865,20	1,74	1,72	0,16	0,16	84	819,93	0,76	0,75	0,07	0,07
34	1822,50	1,70	1,68	0,16	0,16	85	812,34	0,75	0,74	0,07	0,07
35	1781,30	1,66	1,64	0,15	0,15	86	805,01	0,74	0,74	0,07	0,07
36	1741,53	1,62	1,61	0,15	0,15	87	797,91	0,74	0,73	0,07	0,07
37	1703,14	1,59	1,57	0,15	0,15	88	791,05	0,73	0,72	0,07	0,07
38	1666,08	1,55	1,53	0,14	0,14	89	784,41	0,73	0,72	0,07	0,07
39	1630,30	1,52	1,50	0,14	0,14	90	777,99	0,72	0,71	0,07	0,07
40	1595,73	1,49	1,47	0,14	0,14	91	771,78	0,71	0,71	0,07	0,07
41	1562,35	1,46	1,44	0,13	0,14	92	765,77	0,71	0,70	0,07	0,07
42	1530,11	1,43	1,41	0,13	0,13	93	759,96	0,70	0,69	0,07	0,07
43	1498,96	1,40	1,38	0,13	0,13	94	754,35	0,70	0,69	0,07	0,07
44	1468,86	1,37	1,35	0,13	0,13	95	748,91	0,69	0,68	0,07	0,07
45	1439,77	1,34	1,32	0,12	0,13	96	743,66	0,69	0,68	0,07	0,07
46	1411,67	1,31	1,30	0,12	0,12	97	738,57	0,68	0,67	0,06	0,07
47	1384,51	1,29	1,27	0,12	0,12	98	733,65	0,68	0,67	0,06	0,07
48	1358,26	1,26	1,25	0,12	0,12	99	728,90	0,67	0,67	0,06	0,06
49	1332,89	1,24	1,23	0,12	0,12	100	724,30	0,67	0,66	0,06	0,06
50	1308,37	1,22	1,20	0,11	0,11	101	719,85	0,67	0,66	0,06	0,06
51	1284,66	1,19	1,18	0,11	0,11	102	715,55	0,66	0,65	0,06	0,06

### 10.3.6 Parâmetros parciais do barramento CCM-MT 4,16 kV – Equações Guia IEEE 1584 – 2018

Tabela 10. 18 - Valores intermediários - Barramento CCM-MT 4,16 kV – IEEE Std 1584 - 2018

	Corrent e de Curto-Circuit o Total (A)	Corrent e de arco (kA)	Corrente de arco mínima (kA)	Energia Incidente Parcial (J/cm <sup>2</sup> )	Energia Incidente Parcial Mínima (J/cm <sup>2</sup> )	Ciclo	Corrent e de Curto-Circuit o Total (A)	Corrent e de arco (kA)	Corrent e de arco mínima (kA)	Energia Incidente Parcial (J/cm <sup>2</sup> )	Energia Incidente Parcial Mínima (J/cm <sup>2</sup> )
1	8115,25	7,1029	6,9365	0,5714	0,55430	35	34,74	0,0306	0,0299	0,00281	0,00273
2	7799,99	6,8313	6,6712	0,5501	0,53361	36	30,79	0,0271	0,0265	0,00250	0,00242
3	7503,61	6,5756	6,4215	0,5300	0,51412	37	27,29	0,0240	0,0235	0,00222	0,00215
4	7233,09	6,3420	6,1934	0,5116	0,49630	38	24,18	0,0213	0,0208	0,00197	0,00191
5	6987,97	6,1302	5,9865	0,4950	0,48012	39	21,43	0,0189	0,0184	0,00175	0,00170
6	6765,89	5,9381	5,7989	0,4798	0,46544	40	18,99	0,0167	0,0163	0,00156	0,00151
7	6564,29	5,7636	5,6285	0,4661	0,45209	41	16,83	0,0148	0,0145	0,00138	0,00134
8	6380,82	5,6046	5,4733	0,4535	0,43993	42	14,91	0,0131	0,0128	0,00123	0,00119
9	6213,41	5,4595	5,3315	0,4421	0,42881	43	13,22	0,0116	0,0113	0,00109	0,00106
10	6060,28	5,3266	5,2018	0,4316	0,41863	44	11,71	0,0103	0,0101	0,00097	0,00094
11	5919,89	5,2048	5,0828	0,4219	0,40929	45	10,38	0,0091	0,0089	0,00086	0,00084
12	5790,88	5,0928	4,9734	0,4131	0,40069	46	9,20	0,0081	0,0079	0,00077	0,00074
13	5672,08	4,9895	4,8726	0,4049	0,39277	47	8,15	0,0072	0,0070	0,00068	0,00066
14	5562,44	4,8942	4,7795	0,3974	0,38545	48	7,22	0,0063	0,0062	0,00060	0,00059
15	5461,05	4,8060	4,6934	0,3904	0,37867	49	6,40	0,0056	0,0055	0,00054	0,00052
16	5367,09	4,7243	4,6136	0,3839	0,37239	50	5,67	0,0050	0,0049	0,00048	0,00046
17	5279,84	4,6484	4,5394	0,3779	0,36655	51	5,03	0,0044	0,0043	0,00042	0,00041
18	5198,67	4,5777	4,4704	0,3723	0,36111	52	4,45	0,0039	0,0038	0,00038	0,00037
19	5123,00	4,5118	4,4061	0,3670	0,35604	53	3,95	0,0035	0,0034	0,00033	0,00032
20	212,82	4,4502	4,3459	0,3622	0,35130	54	3,50	0,0031	0,0030	0,00030	0,00029
21	188,60	4,3926	4,2897	0,3576	0,34686	55	3,10	0,0027	0,0027	0,00026	0,00026
22	167,14	4,3386	4,2369	0,3533	0,34270	56	2,75	0,0024	0,0023	0,00023	0,00023
23	148,11	2,7180	4,1873	0,2239	0,33878	57	2,43	0,0021	0,0021	0,00021	0,00020
24	131,25	0,1161	4,1406	0,0103	0,33510	58	2,16	0,0019	0,0018	0,00019	0,00018
25	116,32	0,1029	0,1005	0,0092	0,00890	59	1,91	0,0017	0,0016	0,00016	0,00016
26	103,08	0,0911	0,0890	0,0082	0,00791	60	1,69	0,0015	0,0014	0,00015	0,00014
27	91,35	0,0807	0,0788	0,0072	0,00703	61	1,50	0,0013	0,0013	0,00013	0,00013
28	80,95	0,0715	0,0698	0,0064	0,00624	62	1,33	0,0012	0,0011	0,00012	0,00011
29	71,74	0,0634	0,0619	0,0057	0,00555	63	1,18	0,0010	0,0010	0,00010	0,00010
30	63,57	0,0561	0,0548	0,0051	0,00493	64	1,04	0,0009	0,0009	0,00009	0,00009
31	56,34	0,0497	0,0486	0,0045	0,00438	65	0,93	0,0008	0,0008	0,00008	0,00008
32	49,92	0,0441	0,0430	0,0040	0,00389	66	0,82	0,0007	0,0007	0,00007	0,00007
33	44,24	0,0390	0,0381	0,0036	0,00346	67	0,73	0,0006	0,0006	0,00006	0,00006
34	39,21	0,0346	0,0338	0,0032	0,00307						

### 10.3.7 Parâmetros parciais do barramento QDG-BT 440 V – Equações Guia IEEE 1584 – 2018

Tabela 10. 19 - Valores intermediários - Barramento QDG-BT 440 V – IEEE Std 1584 - 2018

Ciclo	Corrente de Curto-Circuito Total (A)	Corrente de arco (kA)	Corrente de arco mínima (kA)	Energia Incidente Parcial (J/cm <sup>2</sup> )	Energia Incidente Parcial Mínima (J/cm <sup>2</sup> )	Ciclo	Corrente de Curto-Circuito Total (A)	Corrente de arco (kA)	Corrente de arco mínima (kA)	Energia Incidente Parcial (J/cm <sup>2</sup> )	Energia Incidente Parcial Mínima (J/cm <sup>2</sup> )
1	40863,47	25,7353	22,5082	3,03341	2,668363	17	29755,06	20,3871	17,8307	2,34496	2,062763
2	39101,31	25,0000	21,8651	2,93625	2,582900	18	29442,42	20,2119	17,6774	2,32301	2,043458
3	37699,93	24,3854	21,3276	2,85574	2,512078	19	29143,91	20,0433	17,5300	2,30193	2,024915
4	36571,21	23,8708	20,8775	2,78879	2,453186	20	28858,47	19,8810	17,3880	2,28166	2,007084
5	35638,73	23,4324	20,4941	2,73207	2,403287	21	28585,18	19,7246	17,2512	2,26215	1,989921
6	34847,02	23,0507	20,1602	2,68290	2,360038	22	28323,23	19,5737	17,1192	2,24336	1,973388
7	34158,02	22,7114	19,8635	2,63937	2,321741	23	2,81	0,0014	0,0012	0,00010	0,000089
8	33545,90	22,4044	19,5950	2,60011	2,287205	24	2,07	0,0010	0,0009	0,00007	0,000064
9	32993,06	22,1227	19,3486	2,56418	2,255601	25	1,53	0,0007	0,0006	0,00005	0,000046
10	32487,23	21,8612	19,1199	2,53092	2,226344	26	1,13	0,0005	0,0005	0,00004	0,000033
11	32019,73	21,6163	18,9057	2,49985	2,199015	27	0,84	0,0004	0,0003	0,00003	0,000024
12	31584,24	21,3854	18,7038	2,47063	2,173309	28	0,62	0,0003	0,0002	0,00002	0,000018
13	31176,05	21,1667	18,5125	2,44299	2,148999	29	0,46	0,0002	0,0002	0,00001	0,000013
14	30791,56	20,9585	18,3304	2,41675	2,125911	30	0,34	0,0002	0,0001	0,00001	0,000009
15	30427,98	20,7598	18,1566	2,39174	2,103910	31	0,25	0,0001	0,0001	0,00001	0,000007
16	30083,09	20,5696	17,9902	2,36784	2,082890						

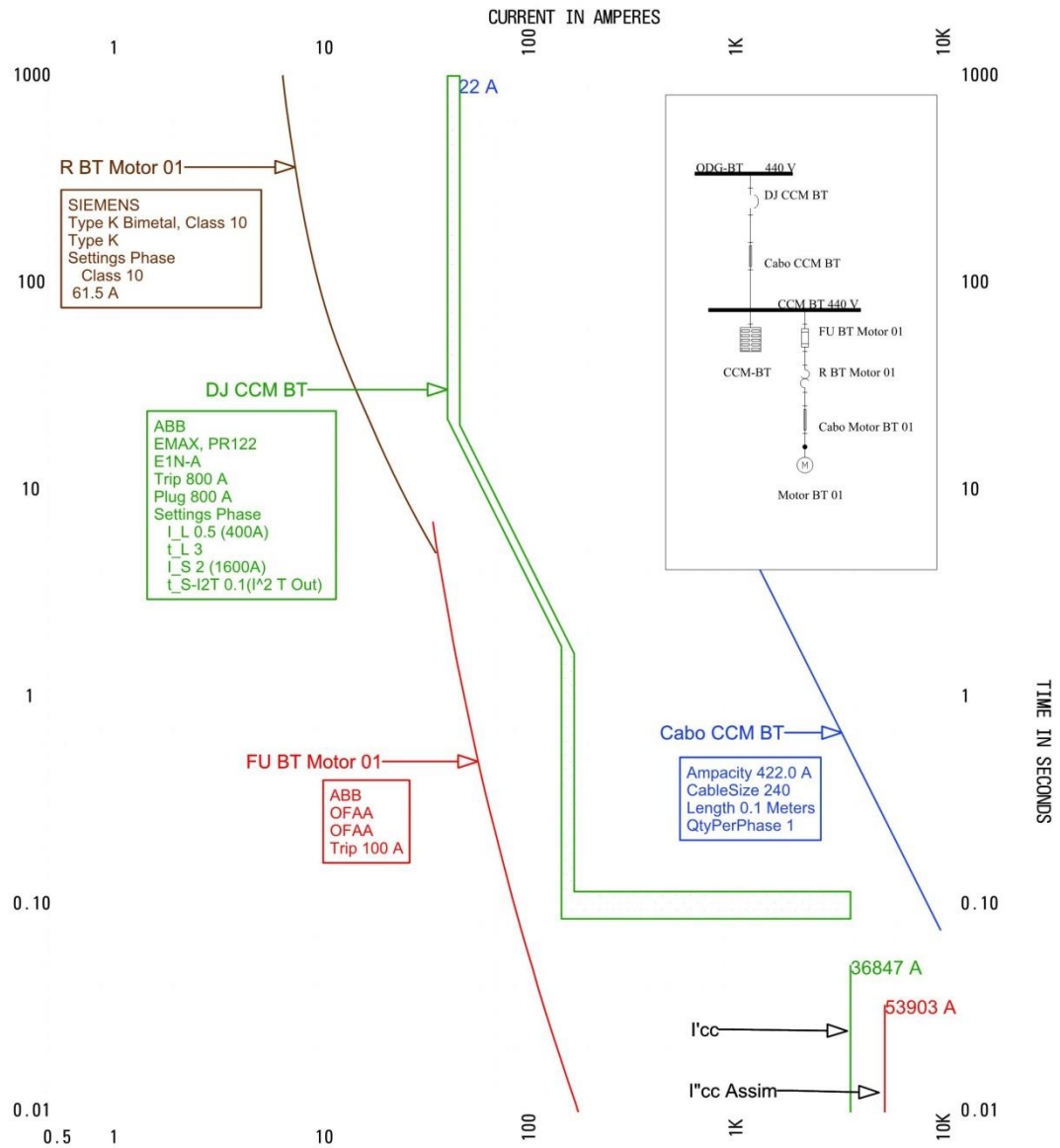
### 10.3.8 Parâmetros parciais do barramento CCM-BT 440 V – Equações Guia IEEE 1584 – 2018

Tabela 10. 20 - Valores intermediários - Barramento CCM-BT 440 V – IEEE Std 1584 - 2018

Ciclo	Corrente de Curto-Circuito Total (A)	Corrente de arco (kA)	Corrente de arco mínima (kA)	Energia Incidente Parcial (J/cm <sup>2</sup> )	Energia Incidente e Parcial Mínima (J/cm <sup>2</sup> )	Ciclo	Corrente de Curto - Circuito Total (A)	Corrente de arco (kA)	Corrente de arco mínima (kA)	Energia Incidente e Parcial (J/cm <sup>2</sup> )	Energia Incidente e Parcial Mínima (J/cm <sup>2</sup> )
1	40756,46	23,8762	22,4702	2,82256	2,66329	15	31,39	0,0160	0,0148	0,00130	0,00120
2	38999,59	23,1446	21,8269	2,72659	2,57784	16	23,20	0,0117	0,0108	0,00094	0,00087
3	37603,06	22,5380	21,2896	2,64762	2,50709	17	17,15	0,0085	0,0079	0,00068	0,00062
4	36478,83	22,0335	20,8400	2,58232	2,44829	18	12,68	0,0062	0,0057	0,00049	0,00045
5	35550,55	21,6061	20,4573	2,52726	2,39851	19	9,38	0,0046	0,0042	0,00035	0,00033
6	34762,81	21,2356	20,1243	2,47972	2,35539	20	6,93	0,0033	0,0031	0,00025	0,00023
7	34077,59	20,9076	19,8285	2,43778	2,31723	21	5,12	0,0024	0,0022	0,00018	0,00017
8	33469,09	20,6118	19,5610	2,40006	2,28284	22	3,79	0,0018	0,0016	0,00013	0,00012
9	32919,71	20,3412	19,3156	2,36564	2,25138	23	2,80	0,0013	0,0012	0,00010	0,00009
10	142,13	0,0770	0,0717	0,00665	0,00621	24	2,07	0,0010	0,0009	0,00007	0,00006
11	105,07	0,0562	0,0523	0,00479	0,00447	25	1,53	0,0007	0,0006	0,00005	0,00005
12	77,68	0,0411	0,0381	0,00345	0,00321	26	1,13	0,0005	0,0005	0,00004	0,00003
13	57,43	0,0300	0,0278	0,00249	0,00231	27	0,84	0,0004	0,0003	0,00003	0,00002
14	42,45	0,0219	0,0203	0,00180	0,00167						

## 10.4 CURVAS DE SELETIVIDADE – TCC's

### 10.4.1 TCC – DJ CCM BT



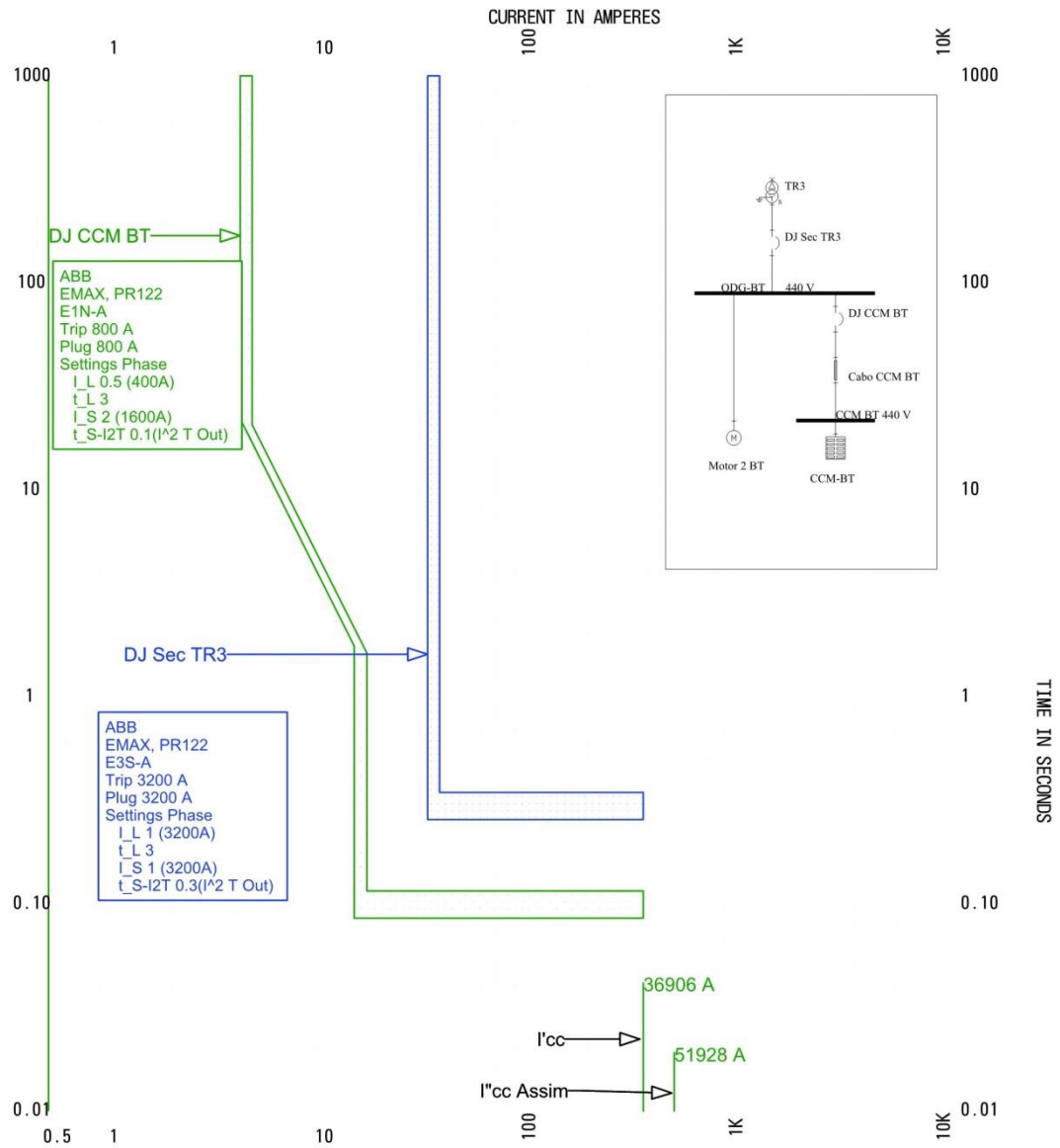
TCC Name: QDG-BT Phase  
Online: QDG-BT  
June 2, 2010 11:35 AM

Current Scale x 10

Reference Voltage: 440  
SKM Systems Analysis, Inc.



## 10.4.2TCC – DJ Sec TR3

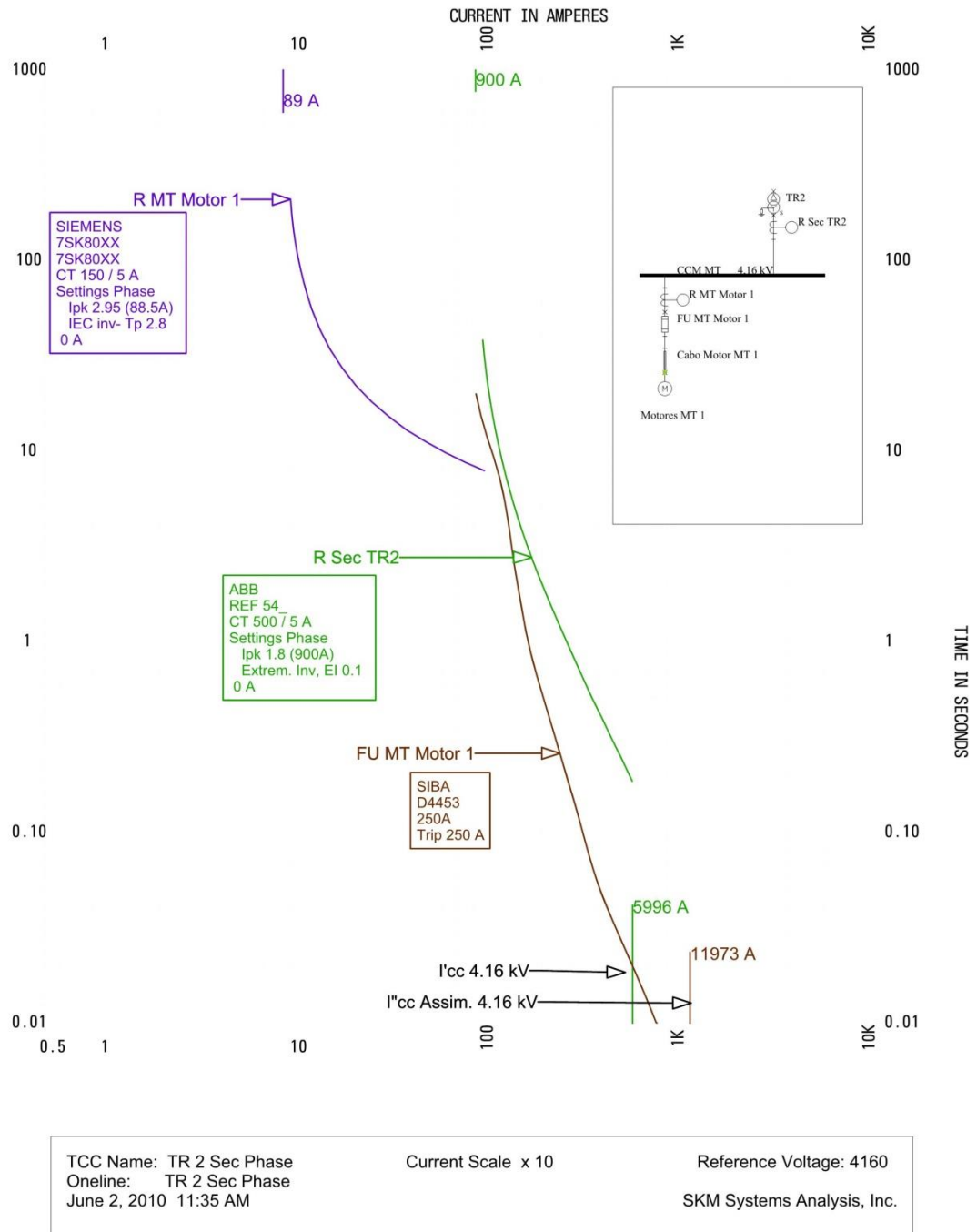


TCC Name: TR 3 Sec Phase  
Online: TR 3 Sec  
June 7, 2010 5:33 PM

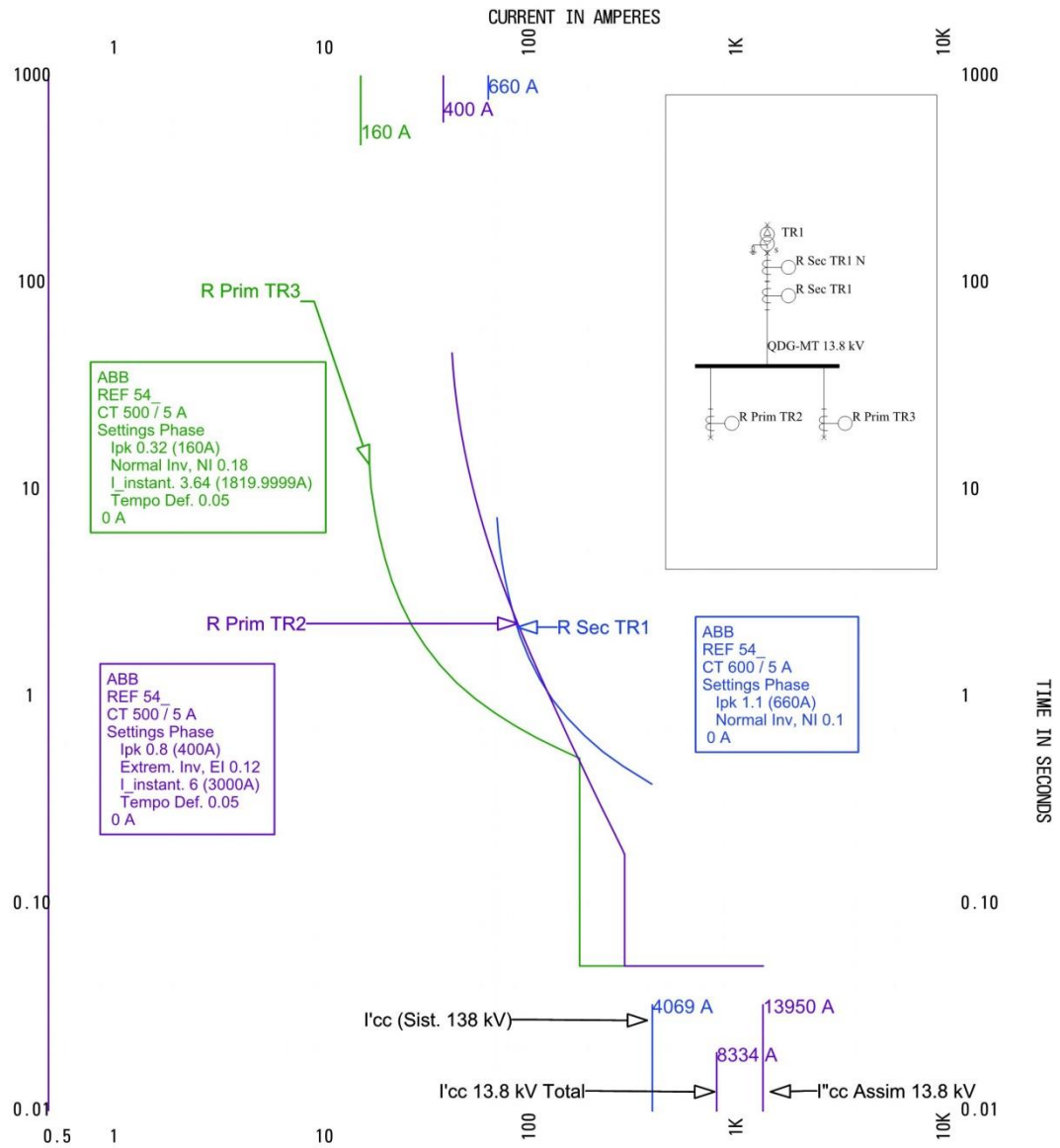
Current Scale x 100

Reference Voltage: 440  
SKM Systems Analysis, Inc.

### 10.4.3TCC – R Sec TR2



## 10.4.4TCC – R Sec TR1



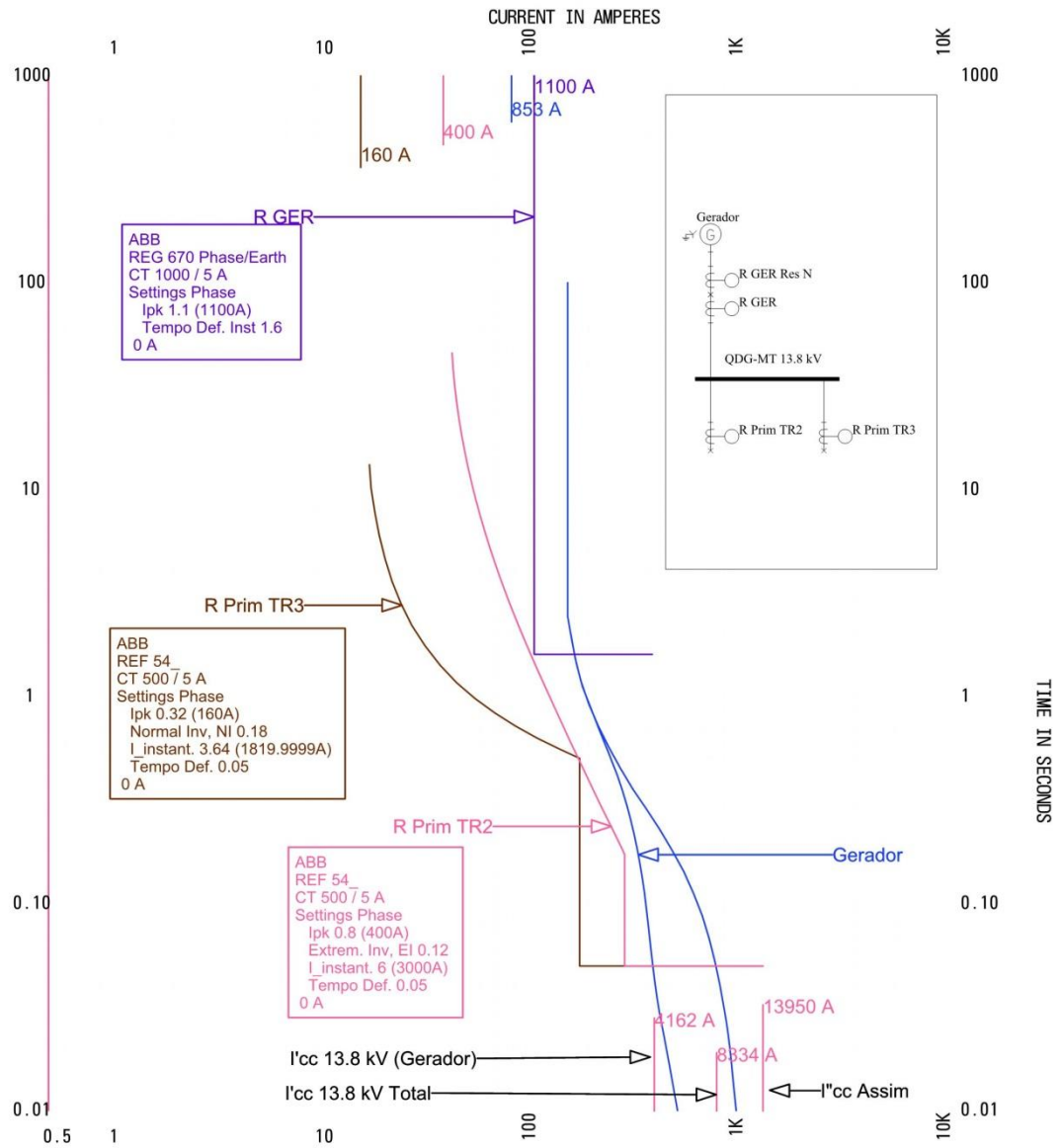
TCC Name: TR 1 Sec Phase  
 Online: TR 1 Sec Phase  
 June 7, 2010 5:34 PM

Current Scale x 10

Reference Voltage: 13800

SKM Systems Analysis, Inc.

## 10.4.5TCC – R GER



TCC Name: Gerador Phase  
 Online: Gerador Phase  
 June 7, 2010 5:34 PM

Current Scale x 10

Reference Voltage: 13800

SKM Systems Analysis, Inc.